

文章编号:1674-8190(2017)03-321-07

近距离平行跑道配对进近方式的安全区域

何昕^{1,2}, 蒋豪³, 韩丹⁴

(1. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 广汉 618307)

(2. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031)

(3. 中国民用航空飞行学院 教务处, 广汉 618307)

(4. 中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 广汉 618307)

摘要: 为了提高我国近距离平行跑道的运行效率,对配对进近方式的安全区域进行研究。根据配对过程中快机和慢机的相对运动关系和速度特征,将配对进近分为快机不可超越慢机和快机超越慢机两种方式。将慢机作为参考量,分析快机的相对运动状态,定性地给出两种配对方式的安全区域范围。在此基础上,考虑慢机错误地闯入快机航向道,建立防撞安全边界计算模型;考虑配对前机在最大不利侧风影响下的尾流对后机的影响,建立尾流安全边界模型。利用虹桥机场的相关数据,采用C类航空器B737-800,D类航空器B747-400作为配对进近的两架飞机,对模型进行验证。结果表明:该方法可以实现实时定量地计算两种配对方式下的安全区域范围。

关键词: 配对进近;安全区域;快机不可超越慢机配对方式;快机超越慢机配对方式;防撞安全边界;尾流安全边界

中图分类号: V355.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.03.012

Research on the Safe Zones for Paired Approaches to Closely Spaced Parallel Runways

He Xin^{1,2}, Jiang Hao³, Han Dan⁴

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

(2. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(3. China Civil Aviation Flight College Office of Academic Affairs, Guanghan 618307, China)

(4. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: In order to improve the operating efficiency of closely spaced parallel runways, safe zones of paired approaches is analyzed. Combined with the relative motion relationship and speed characteristics of paired aircraft, paired approaches is divided into fast aircraft can not pass the slow aircraft pairing mode and fast aircraft beyond the slow aircraft pairing mode. Regarding the slow aircraft as the reference volume, the relative motion state of the fast is analyzed, and the safe area of the two pairing modes is given qualitatively. And then, taking account blunder, the model of collision-safety boundary is established. Meanwhile, considering the effect of the lead aircraft to the trailing because of side wind, the model of collision-safety boundary is established. The model is verified by using the C class aircraft B737-800 and the D class of aircraft B747-400 as the paired aircraft on the base of relevant data of Hongqiao international airport. The results show that the proposed method can be used to quantitatively calculate the safe zones of the paired approaches in real time.

Key words: paired approaches; safe zones; fast aircraft can not pass the slow aircraft pairing mode; fast aircraft beyond the slow aircraft pairing mode; collision-safety boundary; wake-safety boundary

收稿日期:2017-01-12; 修回日期:2017-02-28

基金项目:2015年民航局科技创新引导资金项目(20150226)

通信作者:韩丹,419025046@qq.com

0 引言

随着航空运输需求的不断增加,近距离平行跑道

的数量逐年增加。但是受当前我国民航相关法规的限制, 近距平行跑道机场实施的是一条主用于起飞、一条主用于降落的运行方式, 运行效率不高, 仅比单条跑道节约了约 10 s 的进跑道时间^[1]。与航空发达国家相比, 我国的近距平行跑道尚未发挥其最大作用。目前, 国外在近距平行跑道的运行方面已研发并投入使用了一些新技术, 例如, 微波着陆系统 (Microwave Landing System, 简称 MLS)、同时偏置仪表进近 (Simultaneous Offset Instrument Approaches, 简称 SOIA)、用于侧向距离的机载信息 (The Airborne Information for Lateral Spacing, 简称 AILS) 和配对进近 (Paired Approaches) 等。综合考虑配对进近的特点和运行要求^[2], 认为该方式用于我国机场具有一定的可行性。

美国 (以 NASA 兰利研究中心为代表) 已对配对进近方式进行了大量的研究工作^[3-11]。1996 年, R. Stone^[7] 在 NASA 召开的基于驾驶舱的平行跑道进近程序会议上提出了配对进近的概念; 2000 年, J. Hammer^[8] 提出了近距平行跑道配对进近的概念, 并给出了运行程序; 2003 年, Rodney Teo 等^[9] 对配对进近危险区域进行了研究; 2012 年, D. C. Burnham 等^[10] 研究了侧风情况下尾流对近距平行跑道配对进近的影响; 2014 年, Michael M. Madden^[11] 采用运动学模型对近距平行跑道配对进近的间隔压缩量进行了研究。

近年来, 我国也开始对配对进近展开研究, 主要侧重于对配对进近方式的引进和初步分析^[12-16]。2009 年, 刘源^[2] 从空管角度在我国首次提出了配对进近概念, 并从可行性角度分析了必须考虑的四个方面内容; 2013 年, 吕宗平等^[12] 基于事故树分析法, 对配对进近过程中碰撞风险的影响因素进行了分析; 同年, 孙佳等^[14] 对相关进近模式下的尾流危险区域进行了研究; 2014 年, 孙佳等^[15] 还采用蒙特卡洛方法对配对进近过程中, 配对后机有无机动避让下的碰撞风险进行了分析; 2015 年, 田勇等^[16] 基于速度和导航误差, 对配对进近的碰撞风险模型进行了研究。

本文结合以往有关近距平行跑道配对进近方式的相关研究, 根据配对进近过程中快机和慢机的相对运动关系及速度特征, 对快机相对于慢机的安全区域进行分析, 研究防撞安全边界和尾流安全边界, 以期能够实时定量地确定出配对进近过程中快机相对于慢机的安全范围。

1 配对进近方式

配对进近是针对间距在 700 ft (213 m) 至 2 500 ft (762 m) 之间的平行跑道上, 仪表气象条件下 (Instrument Meteorological Conditions, 简称 IMC) 实施类似于相关仪表进近的程序, 配对的两架航空器在避免碰撞和尾流影响的双重条件下, 一前一后陆续完成进近着陆过程的一种运行方式。

根据配对的两架航空器的速度和相对位置关系, 将配对进近方式分为两种: 快机不可超越慢机配对方式和快机超越慢机配对方式。快机不可超越慢机配对方式指在配对过程中慢机始终为前机, 快机始终为后机; 快机超越慢机配对方式即在配对过程中快机超越慢机由配对后机变为配对前机, 慢机由配对前机变为配对后机。

2 安全区域边界的研究

针对两种配对进近方式, 在两机配对的过程中, 可以将慢机作为参考量, 分析快机的相对运动状态。对于快机不可超越慢机配对方式, 为了确保安全, 快机需要避免慢机误入自己的进近航径, 并在慢机尾流的影响下, 与慢机保持足够“近”的距离, 即两机间隔需避免碰撞和尾流的双重危险。快机必须在慢机后与其保持一定的纵向间隔, 以避免慢机误入快机的航径时与其发生危险接近或重叠; 同时, 这一合理的纵向间隔还应保证快机在最大不利侧风下能够避免来自慢机尾流的影响。快机不可超越慢机配对方式的安全区域, 即防撞安全边界和尾流安全边界所确定的区域如图 1 所示。该运行方式下, 快机不需要配备特殊的机载设备。

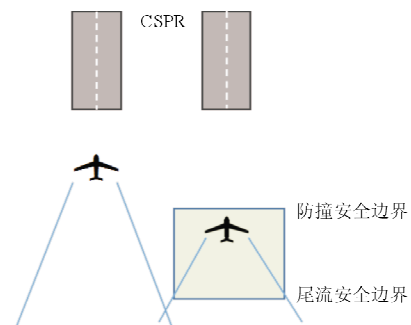


图 1 快机不可超越慢机配对方式下的安全区域
Fig. 1 Safe zones for fast aircraft can not pass the slow aircraft pairing mode

对于快机超越慢机配对方式, 为了确保安全, 快机需要避免遭受来自慢机尾流的影响, 同时还要保证慢机不受其自身尾流的影响。即两机间隔需考虑避免两机尾流的影响, 快机必须在后尾流安全边界前, 以避免遭受慢机的尾流影响; 同时, 快机也必须在前尾流安全边界后, 以保证慢机不会遭遇快机的尾流影响。快机超越慢机配对方式的安全区域, 即尾流安全间隔前界和尾流安全间隔后界所确定的区域如图 2 所示。该运行方式下, 快机需要配备空中防撞系统。

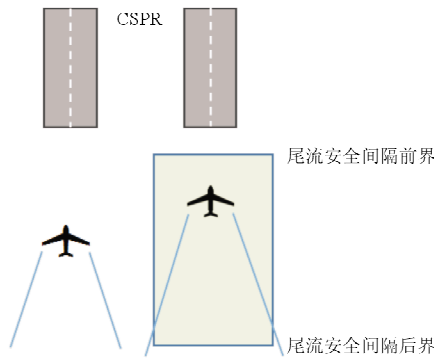


图 2 快机超越慢机配对方式下安全区域
Fig. 2 Safe zones for fast aircraft beyond the slow aircraft pairing mode

2.1 防撞安全边界的计算

防撞安全边界是指由于前机错误进近至后机的航迹后, 为了保证不会引起两机危险接近甚至重叠这一前提条件而确定的。即在保证安全的前提下, 当前机改变航向误闯入后机的进近航径飞行时, 后机继续进近但要与前机必须保持的最小纵向间隔。

配对进近过程中前机错误进近示意图如图 3 所示。

在进近过程中, 假设前机改变航向闯入后机航径, 后机仍按照原飞行路线飞行。忽略两架航空器的高度差, 将两架航空器看作两个质点, 记配对前机的位置为 (x_f, y_f) , 配对后机的位置为 (x_l, y_l) , 如图 4 所示, Δt 为前机从开始错误进近至误入后机航道时所用时间。记错误进近开始时配对前机的位置为坐标零点, 即 $(x_f(0), y_f(0)) = (0, 0)$ 。

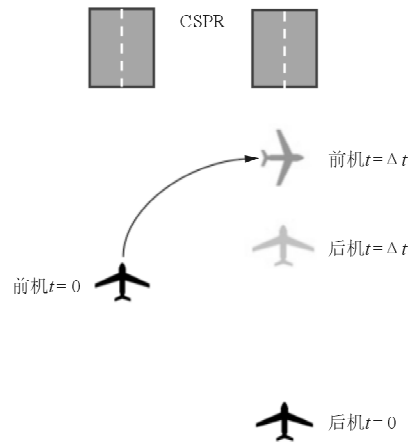


图 3 错误进近示意图
Fig. 3 Schematic diagram of blunders approach

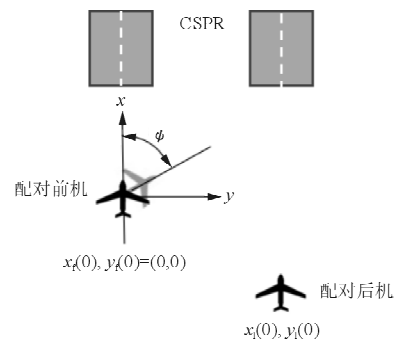


图 4 错误进近速度示意图
Fig. 4 Speed schematic diagram of blunders approach

根据欧几里得距离公式, 前机与后机之间的距离为

$$D = \sqrt{[x_f(t) - x_l(t)]^2 + [y_f(t) - y_l(t)]^2} \quad (1)$$

式中: $x(t), y(t)$ 为 t (单位为 s) 时刻航空器的位置 (单位为 ft)。

假设前机以某一转弯角度转入某一航向, 然后按照该航向继续进近, 则式(1)中的两架航空器的位置可通过式(2)计算得到:

$$\begin{cases} x_f(t) = \int_0^{t_0} v_f \cos(\dot{\psi}\tau) d\tau + v_f(t - t_0) \cos\psi \\ y_f(t) = \int_0^{t_0} v_f \sin(\dot{\psi}\tau) d\tau + v_f(t - t_0) \sin\psi \\ x_l(t) = x_l(0) + v_l t \\ y_l(t) = y_l(0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_0 为前机的转弯时间; v_f 为前机的速度 (单位为 kt); v_l 为后机的速度; ψ 为前机错误进近的航向改变量; $\dot{\psi}$ 为航向改变率。

$(x_1(0), y_1(0))$ 是航空器实施配对时后机的位置(即配对后机相对于配对前机的位置坐标)。

假设两架配对进近航空器的位置和速度已知,发生危险接近的时间未知,则有:

$$\begin{cases} x_f(t) = \frac{v_f}{\dot{\psi}} \sin(\psi) + v_f(t - t_0) \cos\psi \\ y_f(t) = \frac{v_f}{\dot{\psi}} (1 - \cos\psi) + v_f(t - t_0) \sin\psi \\ x_1(t) = x_1(0) + v_1 t \\ y_1(t) = y_1(0) \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)的参数代入式(1),整理可得:

$$D^2 = x_f^2(0) + A_0 + A_1 t^2 + A_2 + A_3 t^2 \quad (4)$$

s. t. $x_0 = \frac{v_f}{\dot{\psi}} \sin\psi, y_0 = \frac{v_f}{\dot{\psi}} - \frac{v_f}{\dot{\psi}} \cos\psi$

$$A_0 = x_0 - v_f \frac{\psi}{\dot{\psi}} \cos\psi$$

$$A_1 = v_1 \cos\psi - v_1$$

$$A_2 = y_0 - y_1(0) - v_1 \frac{\psi}{\dot{\psi}} \sin\psi$$

$$A_3 = v_1 \sin\psi$$

美国对配对进近技术的应用较为成熟,且 NASA 在尾流方面做了大量的研究及模拟仿真工作。因此,在本文两机间隔的计算中,危险接近的概念参照 FAA 8020.16 文件中的定义:规定在飞行过程中,当两架航空器之间的间隔小于 500 ft 或是由机组报告两架及以上航空器之间存在碰撞风险。

在防撞安全边界的计算中,以 500 ft 作为配对的两架航空器发生危险接近的距离,即 D 为 500 ft。对于式(4),当 D 为 500 ft 时,把 t 看做为 T ,则 T 为前机错误进近到与后机发生危险接近过程中飞行所用时间;若该式无解,则后机需按照尾流间隔标准与前机保持规定的间隔。 $x_1(0)$ 为错误进近开始时后机相对于前机的位置,即两机的纵向间隔。建立 $x_1(0)$ 的二次求解方程式:

$$x_1^2(0) - 2(A_0 + A_0 T)x_1(0) + A_1^2 + A_3^2 T^2 + 2A_0 A_1 + A_2 A_3 T + A_0^2 + A_2^2 - 500^2 = 0 \quad (5)$$

一般取航向转弯率 $\dot{\psi}$ 为 12° ,最大不超过 30° ,即

$$\frac{\pi}{15} \leq \dot{\psi} < \frac{\pi}{12} \quad (6)$$

采用非线性方法对式(5)进行求解,可得:

$$x_1(0) = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (7)$$

s. t. $a = 1$

$$b = -2(A_0 + A_0 T)$$

$$c = A_1^2 + A_3^2 T^2 + 2A_0 A_1 + A_2 A_3 T + A_0^2 + A_2^2 - 500^2$$

$$b^2 - 4ac > 0$$

$$\frac{\pi}{15} \leq \dot{\psi} < \frac{\pi}{12}$$

已知两条近距平行跑道的间隔及配对两架航空器的速度,即 $(y_1(0), v_f, v_1)$ 。通过式(7)便可求得配对前机误入后机航道后,后机为了避免发生危险接近或重叠,需要保持的最小纵向间隔值。

2.2 尾流安全边界的计算

配对进近方式下,后机基本不受前机尾流影响的区域是指发生在前机尾流产生的初始阶段,如图 5 所示。在前机尾流产生的初期,即使通过侧风和自身的扩散运动,该尾流在短时间内也很难对后机的安全性造成威胁,不足以影响后机的运动,即安全区域 I;而安全区域 II 是指随着时间的推移,在尾流的消散阶段,尾流强度很快消失而产生的安全区域。针对安全区域 II,我国已制定了相关的尾流间隔标准^[17]。因此,分析尾流安全边界即对安全区域 I 进行研究。通过对尾流运动特征进行研究,计算在该区域内后机运动不受前机影响下可以保持的最大纵向尾流间隔。

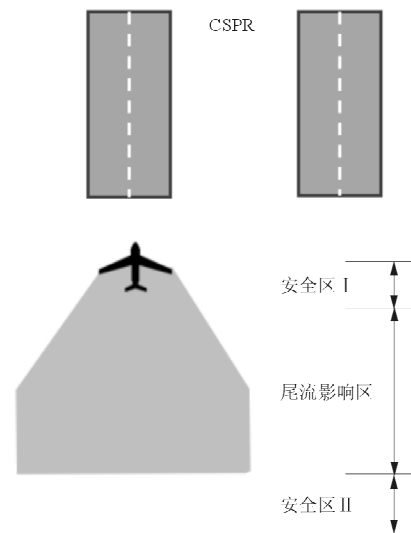


图 5 航空器尾流影响区域示意图
Fig. 5 Vortex hazardous region of CSPPR

配对进近方式下后机尾流安全边界的确定需考虑进近过程中前后机的相对位置。应保证即使在最大不利侧风的影响下,前机的尾流运动到后机航道的位置恰好在后机的运动轨迹之后,不至于对后机的飞行安全造成影响。

在配对进近过程中,前机尾流对后机的影响主要取决于:两条平行跑道中心线间距、风速、风向、前机的机型参数等,如图 6 所示。

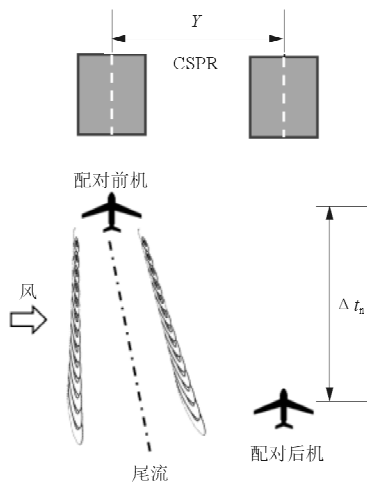


图 6 在有正侧风分量下前机尾流对后机影响示意图
Fig. 6 Affect of lead aircraft to trailing aircraft because of side wind

前机机型决定尾流影响的起始危险区域宽度。Vernon J. Rossow 等^[18-19]通过对尾流进行系统地分析后指出,尾流的起始危险区域宽度与前后两架航空器的翼展比的关系为

$$B_{h_{s0}} \approx [2 + (b_1/b_f - 0.5)]b_f \quad (8)$$

式中: b_1 为配对后机的翼展; b_f 为配对前机的翼展。

$b_1/b_f \geq 0.5$, 当 $0.29 < b_1/b_f < 0.5$ 时, $B_{h_{s0}} \approx 2b_f$ 。

由于漩涡对的长波不稳定的自诱导速度的影响,尾流危险区域的宽度会随着时间的增加而变宽。在长波不稳定之后,尾流的危险区域宽度达到最大,即

$$B_{h_z}(t) \approx b_f C_{h_z} (\Delta t_{fl})^{1/2} \quad (9)$$

式中: $C_{h_z} \approx 0.5$; Δt_{fl} 为尾流从产生到扩散至配对后机航迹之间对应的纵向间隔所用时间。

计算中取式(8)和式(9)二者中的较大值,可以得到较为保守的危险区域宽度。

尾流影响区域与侧风关系密切。NASA 研究

了 1988~1999 年发生的 165 起飞行事故,针对侧风对飞行安全的影响,其研究表明:正侧风风速为 1.0~3.0 m/s,是尾流导致事故发生的最危险环境^[20]。

因此,综合考虑风及尾流的发展趋势,配对前机的尾流对后机进近的影响时间应满足:

$$\Delta t_{fl} \leq \frac{y - B_{h_z}(t)/2 - d_1/2 - d_2/2}{|v_1| + |v_{h_z}|} \quad (10)$$

式中: v_1 为常量, $v_1 = 2$ m/s; v_{h_z} 为正侧风, m/s; $B_{h_z}(t)/2$ 为危险区域半宽; d_1 、 d_2 分别为两条近距跑道的跑道宽度。

3 实例分析

上海虹桥机场是我国近距平行跑道运行的典型代表,该机场两条跑道中心线间距 365 m,取该机场正侧向风分量为 3 m/s。选取 C 类航空器 B737-800, D 类航空器 B747-400 为配对进近的两架飞机,记 B737-800 为航空器 1, B747-400 为航空器 2。起始进近速度 v 为 335 km/h (180 kt); B737-800 和 B747-400 在进近过程中的具体参数分别为: B737-800 翼展 $b_1 = 34.3$ m, 机高 12.55 m, 最后进近速度 $v_1 = 260$ km/h, 即 140 kt; B747-400 翼展 $b_2 = 64.3$ m, 机高 19.41 m, 最后进近速度 $v_2 = 295$ km/h, 即 160 kt。

在该算例中,根据配对进近条件,假设在初始配对过程中, B737-800 是前机, B747-400 是后机,为快机不可超越慢机配对方式; B747-400 超越 B737-800 变成配对前机, B737-800 变成后机为快机超越慢机配对方式。

3.1 快机不可超越慢机配对方式

(1) 防撞安全边界的计算

取 $T = 30$ s, 根据式(7): $y_1(0)$ 为两条跑道间隔值 (365 m), $v_f = v_1$, $v_1 = v_2$, 带入参数计算得到 $x_1(0) = 488$ m。因此,在该配对方式下当前机错误进近至后机航道后,要使配对前后机不发生碰撞,继续进近,则两机在最后进近定位点 (Final Approach Fix, 简称 FAF 点) 的纵向间隔应不小于 488 m。

(2) 尾流安全后界的计算

配对后机与前机的翼展比 $b_2/b_1 = 1.8$, 即

$b_2/b_1 > 0.5$, 则配对前机产生的危险区域的起始宽度为 118 m。

根据式(10)有: $d_1 = 45$ m, $d_2 = 60$ m, $y = 365$ m, 带入参数计算得到 Δt_{fi} 的最大值为 39.9 s。对于尾流安全后界的计算, 显然两架飞机的速度为起始进近速度。因此, 该方式下配对两机的最大纵向间隔为 4 683 m。

3.2 快机超越慢机配对方式

(1) 尾流安全前界的计算

配对后机与前机的翼展比 $b_1/b_2 = 0.55$, 则配对前机产生的危险区域的起始宽度为 132 m。

根据式(10)有: $d_1 = 45$ m, $d_2 = 60$ m, $y = 365$ m, 带入参数计算得到 Δt_{fi} 的最大值为 28.3 s。航空器 2 在到达 FAF 点之后自行减速至其最后进近速度, 根据调研数据, 航空器 2 一般从起始进近速度达到最后进近速度过程中大概需要 30 s。以 FAF 点为坐标零点, 可知航空器 2 还未减速到其最后进近速度时, 航空器 1 与航空器 2 之间的最大纵向间隔为尾流安全前界的临界值, 即 2 782 m。

(2) 尾流安全后界的计算

该方式下的尾流安全后界的确定依据是: 航空器 2 还未运动到 FAF 点, 此时航空器 1 仍为配对前机。这种情况与快机不可超越慢机配对方式下的尾流安全后界计算一致, 即该方式下配对两机的最大纵向间隔为 4 683 m。

因此, 以慢机运动到 FAF 点为坐标零点, 对于快机不可超越慢机配对方式, 快机的安全区域范围为 [488, 4 683]; 对于快机超越慢机配对方式, 快机的安全区域范围为 [-306, 4 683]。

4 结束语

针对近距离平行跑道配对进近过程中两机的安全间隔问题, 本文分析了两种配对进近方式下两机的相对位置特点, 结合两机的相对运动特征, 建立了防撞安全边界和尾流安全边界的模型和计算方法。该方法可以用于实时定量地计算两种配对方式下快机相对于慢机的安全区域范围, 便于对配对进近方式的碰撞风险进行评估, 也有利于航空器驾驶员和管制员对配对两机安全间隔的把握。但是, 本文在对防撞安全边界进行分析的过程中未考虑

配对后机的机动避让。在后续研究中可以考虑该因素, 以得到更为精确的安全区域范围。

参考文献

- [1] 陈亚青, 罗亮, 詹建明. 窄距平行跑道运行新技术探讨[J]. 中国民用航空, 2013(12): 39-40.
Chen Yaqing, Luo Liang, Zhan Jianming. Discussions on new operational techniques of closely spaced parallel runways[J]. China Civil Aviation, 2013(12): 39-40. (in Chinese)
- [2] 刘源. 采用近距离平行跑道配对进近可行性探讨[J]. 空中交通管理, 2009(10): 4-6.
Liu Yuan. Discussions on feasibility of pairing approach of narrow space parallel runways[J]. Air Traffic Management, 2009(10): 4-6. (in Chinese)
- [3] Bone R S, Olmos B O, Mundra A. Paired approach: A closely spaced parallel runway approach concept[R]. The MITRE Corporation's Center for Advanced Aviation System Development, 2001.
- [4] Bryant T King, James K Kuchar. Evaluation of collision alerting system requirements for paired approach[C]. 19th Digital Avionics Systems Conference, 2000.
- [5] Anand D Mundra, Wayne W Cooper, Smith A P, et al. Potential benefits of a paired approach procedure to closely spaced parallel runways in instrument and marginal visual conditions[C]. Digital Avionics Systems Conference, 2008: 10-27.
- [6] Robert R Eftekari, Jonathan B Hammer, Havens D A, et al. Feasibility analyses for paired approach procedures for closely spaced parallel runways[C]. Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS), 2011: 1-14.
- [7] Stone R. Paired approach concept, proceedings of the NASA workshop on flight deck centered parallel runway approaches in IMC[R]. NASA Langley Research Center, Hampton, 1996.
- [8] Hammer J. Case study of paired approach procedure to closely spaced parallel runway[J]. Air Traffic Control, 2000, 8: 223-252.
- [9] Rodney Teo, Claire J Tomlin. Computing danger zones for provably safe closely spaced parallel approaches[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2003, 26(3): 434-442.
- [10] Burnham D C, Hallock J N, Greene G C. Wake turbulence limits on paired approaches to parallel runways[J]. Journal of Aircraft, 2012, 39(4): 630-637.
- [11] Michael M Madden. Kinematic modeling of separation compression for paired approaches to closely-spaced parallel runways[J]. AIAA-2014-3150, 2014.
- [12] 吕宗平, 李燕飞, 张兆宁. 基于事故树分析法的配对进近碰撞风险研究[J]. 科技和产业, 2013, 13(4): 130-134.

- Lü Zongping, Li Yanfei, Zhang Zhaoning. Research on collision risk for paired approach based on fault tree analysis method[J]. Science Technology and Industry, 2013, 13(4): 130-134. (in Chinese)
- [13] 卢飞, 张兆宁, 魏志强, 等. 近距离平行跑道配对进近纵向碰撞风险安全评估[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(8): 108-113.
- Lu Fei, Zhang Zhaoning, Wei Zhiqiang, et al. Longitudinal collision risk safety assessment of paired approach to closed spaced parallel runways[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(8): 108-113. (in Chinese)
- [14] 孙佳, 田勇, 万莉莉, 等. 相关进近模式的近距离平行跑道尾流危险区域分析[J]. 飞行力学, 2013, 31(3): 281-284.
- Sun Jia, Tian Yong, Wan Lili, et al. Vortex hazardous region analysis of closely spaced parallel runways based on the relevant parallel approach mode[J]. Flight Dynamics, 2013, 31(3): 281-284. (in Chinese)
- [15] 孙佳, 田勇. 近距离平行跑道配对进近中的碰撞风险分析[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2014, 30(2): 241-245.
- Sun Jia, Tian Yong. Collision risk analysis of closely spaced parallel runways under parallel dependent approach procedure[J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition, 2014, 30(2): 241-245. (in Chinese)
- [16] 田勇, 颜于杰, 万莉莉, 等. 近距离平行跑道配对进近运行间隔研究[J]. 航空计算技术, 2015, 45(5): 11-14.
- Tian Yong, Yan Yujie, Wan Lili, et al. Research on separation of aircrafts for paired approaches to closely spaced parallel runways[J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(5): 11-14. (in Chinese)
- [17] 中国民用航空局. CCAR-93TM-R4 中国民用航空空中交通管理规则[S]. 北京: 中国民用航空局, 2007.
- Civil Aviation Administration of China. CCAR-93TM-R4 China civil aviation air traffic management rules[S]. Beijing: CAAC, 2007. (in Chinese)
- [18] Vernon J Rossow, Larry A Meyn. Relationship between vortex meander and ambient turbulence[R]. AIAA-2006-7811, 2006.
- [19] Vernon J Rossow, Larry A Meyn. Guidelines for avoiding vortex wake during use of closely spaced parallel runways[R]. AIAA-2012-215985, 2012.
- [20] Veillette R. Data show that US wake-turbulence accidents are most frequent at low altitude and during approach and landing[J]. Flight Safety Digest, 2002, 21(3/4): 1-47.

作者简介:

何昕(1979—),女,博士,副教授。主要研究方向:空中交通管理。

蒋素(1989—),男,硕士,助教。主要研究方向:空中交通管理。

韩丹(1991—),女,硕士,助教。主要研究方向:空中交通管理。

(编辑:马文静)