

同时仪表进近模式下平行跑道碰撞风险

王莉莉¹, 位 放¹✉

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津, 300300)

摘要 针对同时仪表进近模式下的平行跑道进行碰撞风险评估,首先通过调研首都机场进近管制员的管制过程,建立仪表进近飞机的运动状态变化方程;其次,基于概率论位置误差模型思想,建立了同时仪表进近模式下平行跑道碰撞风险模型;最后运用 MATLAB 软件进行仿真,得出同时仪表进近整个过程每个时刻的碰撞风险,从而得出整个过程碰撞风险的变化趋势,为同时仪表进近模式的实际运行和未来优化提供支持。

关键词 平行跑道;同时仪表进近;位置误差;碰撞风险

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.01.003

中图分类号 V355;X949 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)01-0015-05

Research on Collision Risk of Parallel Runway in Simultaneous Instrument Approach Mode

WANG Lili¹, WEI Fang¹✉

(College of Air Traffic Management, CAUC, Tianjing 300300, China)

Abstract: In order to research on collision risk of parallel runway with simultaneous instrument approach mode. First, through the investigation into the control process of Beijing Capital Airport controllers, the paper analyzes the moving state process of aircraft in simultaneous instrument approach mode. Secondly, based on the position error model, the equations of motion state of two aircraft with simultaneous instrument approach mode are established, and then the parallel runway collision risk model in simultaneous instrument approach mode is established. The key of the position error and velocity parameters in the model are based on the actual operation ADS-B data, and the other parameters are ICAO recommended values or controllers experience values. Finally, the paper utilizes MATLAB software for simulating the collision risk of per moment in the whole process of simultaneous instrument approach mode, thus, obtaining the variation trend of the whole process, which provides support for the practical operation and future optimization of simultaneous instrument approach mode.

Key words: parallel runways; simultaneous instrument approach mode; position error model; collision risk

近年来,我国民航业发展迅速,飞机流量不断增加,为满足发展需求,各地机场纷纷建设多平行跑

道。同时进近模式可有效提高平行跑道的容量,但在一定程度上增加了飞机之间的碰撞风险,所以实

收稿日期: 2017-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(U1633124);民航局科技创新引导项目(20150231)

作者简介: 王莉莉(1973—),女,陕西兴平人,教授,博士,主要从事空中交通管理、空域规划研究. E-mail:llwang@cauc.edu.cn

通信作者: 位 放(1992—),女,河北辛集人,硕士生,主要从事空中交通管理安全风险研究. E-mail:15831107113@163.com

引用格式: 王莉莉,位放. 同时仪表进近模式下平行跑道碰撞风险[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(1): 15-19. WANG Lili, WEI Fang. Research on Collision Risk of Parallel Runway in Simultaneous Instrument Approach Mode[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(1): 15-19.

施同时仪表进近模式机场还不是很多,近期某一线运行单位提出,自身具备的跑道间隔等条件是否能够保障同时仪表进近模式的安全运行?而关于对同时仪表进近模式下的平行跑道的碰撞风险评估的研究很少,基于此,本文对同时仪表进近模式下的平行跑道进行碰撞风险研究,为一线运行单位是否可以采用同时仪表进近模式提供理论参考。

1964年10月, Filkins 和 Little 建立了基于位置误差概率的碰撞风险模型,对飞行间隔标准进行了研究^[1]。2001年,徐肖豪等学者用 Lyle. D. Filkins 的概率论方法在不考虑另外2个方向的情况下分别分析了纵向、侧向和垂直方向碰撞风险问题^[2]。2002年, Stone R 对配对进近模式进行了相关研究^[3]。2003年, Feigh K M, 通过空域运行仿真进行空中交通安全和容量的相关研究^[4]。2008年,张秀辉采用 Reich 碰撞模板分别研究了在不同运行方式下,空中进近和跑道上的飞机间碰撞风险模型^[5]。2011年,蔡明等学者根据模糊事故树分析法和各因素对飞行碰撞风险的影响分析建立了自由飞行环境下的飞行碰撞事故树^[6]。2011年, Bone R 等学者提出平行跑道配对进近模式的相关概念^[7]。2013年,韩松臣等学者,提出了一种航路交叉点处标称距离随时间变化的碰撞风险估计方法^[8]。2015年,吕宗平等学者基于速度误差分布和导航设备测量误差分布进行配对进近碰撞风险研究^[9]。2016年,朱博基于位置误差概率论理论建立近距平行跑道碰撞风险模型^[10]。近些年,张兆宁等学者对配对进近模式下近距平行跑道进行碰撞风险安全评估^[11-16]。从相关研究文献可以看出,关于碰撞风险的研究很多,但是关于同时仪表进近模式下的平行跑道碰撞风险研究很少。

1 基本假设和参数定义

基本假设如下:①假设飞机转 90° 弯,转弯轨迹为 $1/4$ 圆周;②假设飞机转弯过程速率不变,从中间进近定位点(IF点)到最终进近定位点(FAF点)过程和从最终进近定位点到跑道入口过程均为匀减速运动,且每段过程的下降梯度保持不变;③假设2架飞机同时开始转弯;④假设2架飞机大小相等;⑤假设飞机1速度较大,即前机;则飞机2为后机。

参数定义如下: λ_x 为飞机机身长; λ_y 为飞机翼展长; λ_z 为飞机机身高度; R_1 为前机转弯半径; R_2 为后机转弯半径; V_{IF1} 为前机转弯速度; V_{IF2} 为后机转弯速度; V_{FAF1} 为前机到最终进近定位点的速度; V_{FAF2} 为后机到最终进近定位点的速度; V_{L1} 为前机

到跑道入口的速度; V_{L2} 为后机到跑道入口的速度; D 为两跑道之间的距离。 S_z 为两飞机之间的起始垂直间隔; $\tan\alpha_1$ 为前机转弯时的下降梯度; $\tan\alpha_2$ 为后机转弯时的下降梯度; a_{r1} 为前机从中间进近定位点到最后进近定位点之间的加速度(矢量,为负); a_{r2} 为后机从中间进近定位点到最后进近定位点之间的加速度(同上); a_{f1} 为前机从最后进近定位点到跑道入口之间的加速度(同上); a_{f2} 为后机从最后进近定位点到最后进近定位点之间的加速度(同上); $\tan\beta_1$ 为前机中间进近定位点到最后进近定位点之间的下降梯度; $\tan\beta_2$ 为后机中间进近定位点到最后进近定位点之间的下降梯度; $\tan\varphi_1$ 为前机最后进近定位点到跑道入口之间的下降梯度; $\tan\varphi_2$ 为后机最后进近定位点到跑道入口之间的下降梯度。

2 航空器同时进近理论位置研究

飞机在飞行过程中,关于飞机位置的确定,对于飞行员和管制员来说是不同的。对于飞行员来说,通常是通过飞机自带的仪表来确定位置的,而对于管制员来说,主要是通过雷达来确定飞机的位置。由于设备误差和人为因素等,每架飞机都存在位置误差,那么在相邻2架飞机之间的间隔存在差异,这种间隔的大小直接影响到两机的碰撞风险。因而,研究两机的碰撞风险就可以从两机之间的实际距离入手建立碰撞风险模型。而2架飞机之间的实际距离是2架飞机之间的理论距离和位置误差共同作用的结果,所以本节主要对2架同时进近的航空器进行理论位置研究。

根据同时仪表进近模式的管制规则,绘制2架飞机的理论运动轨迹图,见图1,作为建立2架飞机的运动状态变化方程的主要依据。

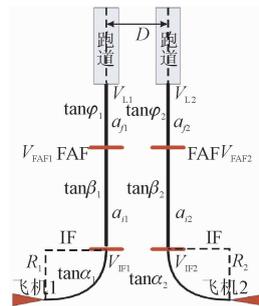


图1 同时仪表进近飞机的理论运动轨迹

Fig. 1 The theoretical trajectory of aircraft insimultaneous instrument approach mode

整个进近过程可分为2种情况,一是前机到达跑道入口时,后机还未飞过最后进近定位点;二是前机到达跑道入口时,后机飞过最后进近定位点。

则两机侧向距离 $L_y(t)$,纵向距离 $L_x(t)$ 和垂直距离 $L_z(t)$,分别为:

$$L_y(t) = \begin{cases} D + R_1 - R_1 \sin\left(\frac{V_{IF1}t}{R_1}\right) + R_2 - R_2 \sin\left(\frac{V_{IF2}t}{R_2}\right), & 0 \leq t \leq t_1 \\ D + R_2 - R_2 \sin\left(\frac{V_{IF2}t}{R_2}\right), & t_1 < t \leq t_4 \\ D, & t_4 < t \leq t_1 + t_2 + t_3 \end{cases} \quad (1)$$

$$L_x(t) = \begin{cases} S_z + V_{IF1}t \tan\alpha_1 - V_{IF2}t \tan\alpha_2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ S_z + \frac{1}{2}\pi R_1 \tan\alpha_1 + \left[V_{IF1}(t-t_1) + \frac{1}{2}a_{i1}(t-t_1)^2 \right] \tan\beta_1 - V_{IF2}t \tan\alpha_2, & t_1 < t \leq t_4 \\ S_z + \frac{1}{2}\pi R_1 \tan\alpha_1 + \left[V_{IF1}(t-t_1) + \frac{1}{2}a_{i1}(t-t_1)^2 \right] \tan\beta_1 - \frac{1}{2}\pi R_2 \tan\alpha_2 - \left[V_{IF2}(t-t_4) + \frac{1}{2}a_{i2}(t-t_4)^2 \right] \tan\beta_2, & t_4 < t \leq t_1 + t_2 \\ \text{第 1 种情况:} \\ S_z + \left[V_{FAF1}(t-t_1-t_2) + \frac{1}{2}a_{f1}(t-t_1-t_2)^2 \right] \tan\varphi_1 + \frac{1}{2}\pi R_1 \tan\alpha_1 + \left[\frac{V_{FAF1}^2 - V_{IF1}^2}{2a_{i1}} \right] \tan\beta_1 - \frac{1}{2}\pi R_2 \tan\alpha_2 - \left[V_{IF2}(t-t_4) + \frac{1}{2}a_{i2}(t-t_4)^2 \right] \tan\beta_2, & t_1 + t_2 < t \leq t_1 + t_2 + t_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \text{第 2 种情况:} \\ S_z + \left[V_{FAF1}(t-t_1-t_2) + \frac{1}{2}a_{f1}(t-t_1-t_2)^2 \right] \tan\varphi_1 + \frac{1}{2}\pi R_1 \tan\alpha_1 + \left[\frac{V_{FAF1}^2 - V_{IF1}^2}{2a_{i1}} \right] \tan\beta_1 - \frac{1}{2}\pi R_2 \tan\alpha_2 - \left[V_{IF2}(t-t_4) + \frac{1}{2}a_{i2}(t-t_4)^2 \right] \tan\beta_2, & t_1 + t_2 < t \leq t_4 + t_5 \\ S_z + \left[V_{FAF1}(t-t_1-t_2) + \frac{1}{2}a_{f1}(t-t_1-t_2)^2 \right] \tan\varphi_1 + \frac{1}{2}\pi R_1 \tan\alpha_1 + \left[\frac{V_{FAF1}^2 - V_{IF1}^2}{2a_{i1}} \right] \tan\beta_1 - \frac{1}{2}\pi R_2 \tan\alpha_2 - \left[\frac{V_{FAF2}^2 - V_{IF2}^2}{2a_{i2}} \right] \tan\beta_2 - \left[V_{FAF2}(t-t_4-t_5) + \frac{1}{2}a_{f2}(t-t_4-t_5)^2 \right] \tan\varphi_2, & t_4 + t_5 < t \leq t_1 + t_2 + t_3 \end{cases}$$

$$L_z(t) = \begin{cases} R_1 - R_1 \cos\left(\frac{V_{IF1}t}{R_1}\right) - R_2 + R_2 \cos\left(\frac{V_{IF2}t}{R_2}\right) & 0 \leq t \leq t_1 \\ R_1 + V_{IF1}(t-t_1) + \frac{1}{2}a_{i1}(t-t_1)^2 - R_2 + R_2 \cos\left(\frac{V_{IF2}t}{R_2}\right), & t_1 < t \leq t_4 \\ R_1 + V_{IF1}(t-t_1) + \frac{1}{2}a_{i1}(t-t_1)^2 - \left[R_2 + V_{IF2}(t-t_4) + \frac{1}{2}a_{i2}(t-t_4)^2 \right], & t_4 < t \leq t_1 + t_2 \\ \text{第 1 种情况:} \\ R_1 + \frac{V_{FAF1}^2 - V_{IF1}^2}{2a_{i1}} + V_{FAF1}(t-t_1-t_2) + \frac{1}{2}a_{f1}(t-t_1-t_2)^2 - \left[R_2 + V_{IF2}(t-t_4) + \frac{1}{2}a_{i2}(t-t_4)^2 \right], & t_1 + t_2 < t \leq t_1 + t_2 + t_3 \\ \text{第 2 种情况:} \\ R_1 + \frac{V_{FAF1}^2 - V_{IF1}^2}{2a_{i1}} + V_{FAF1}(t-t_1-t_2) + \frac{1}{2}a_{f1}(t-t_1-t_2)^2 - \left[R_2 + V_{IF2}(t-t_4) + \frac{1}{2}a_{i2}(t-t_4)^2 \right], & t_1 + t_2 < t \leq t_4 + t_5 \\ R_1 + \frac{V_{FAF1}^2 - V_{IF1}^2}{2a_{i1}} + V_{FAF1}(t-t_1-t_2) + \frac{1}{2}a_{f1}(t-t_1-t_2)^2 - \left[R_2 + \frac{V_{FAF2}^2 - V_{IF2}^2}{2a_{i2}} + V_{FAF2}(t-t_4-t_5) + \frac{1}{2}a_{f2}(t-t_4-t_5)^2 \right], & t_4 + t_5 < t \leq t_1 + t_2 + t_3 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{式中: } t_1 = \frac{\pi R_1}{2V_{IF1}}; t_2 = \frac{V_{FAF1} - V_{IF1}}{a_{i1}}; t_3 = \frac{V_{L1} - V_{FAF1}}{a_{f1}};$$

$$t_4 = \frac{\pi R_2}{2V_{IF2}}; t_5 = \frac{V_{FAF2} - V_{IF2}}{a_{i2}}.$$

3 碰撞风险模型的建立

两机在进近的过程中,飞机受到 CNS 性能、人

为因素、天气因素、防撞设备精度等因素的影响,使得飞行状态的不确定性,而这种不确定性波动强度较大时则会使得飞机实际位置与计划位置产生一定的位置误差,从而导致碰撞风险。

对于纵向碰撞风险,纵向位置误差服从:

$$f(X) \sim N(\mu_X, \sigma_X^2) \quad (4)$$

式中: μ_X 为飞机纵向偏离实际位置的平均距离; σ_X^2 为飞机纵向偏离实际位置的平均距离的方差。

$$\sigma_x^2 = \sum_{a=1}^n k_a \sigma_a^2 \quad (5)$$

$$\sum_{a=1}^n k_a = 1 \quad (6)$$

式中: k_1, k_2, \dots, k_n 是各个影响因素影响碰撞风险的权重值; $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \dots, \sigma_n^2$ 为各个影响因素导致飞机纵向位置误差的方差。

飞机 i 在 t 时刻纵向误差为 $\epsilon_{ix}(t) \sim N(\mu_{ix}, \sigma_{ix}^2)$, $i=1, 2$ 。 $i=1$ 表示第 1 架飞机, $i=2$ 表示第 2 架飞机, x 表示纵向。其中 ϵ_{ix} 为飞机 i 的纵向位置误差, μ_{ix} 是飞机 i 纵向位置误差的平均距离, σ_{ix}^2 是飞机 i 纵向位置误差的方差。在 t 时刻, $d_{ix}(t)$ 为飞机 i 距离某一参考点的纵向距离, 则在 t 时刻, 飞机 i 在纵向的实际位置 $X_i(t) = d_{ix}(t) + \epsilon_{ix}(t)$, 则这 2 架飞机的实际纵向间隔为:

$$X_1(t) - X_2(t) = (d_{1x}(t) + \epsilon_{1x}(t)) - (d_{2x}(t) + \epsilon_{2x}(t)) \quad (7)$$

由于 d_{1x}, d_{2x} 为 2 架飞机在各自航线到同一参考点的纵向距离, 则 $d_{1x} - d_{2x}$ 就是两飞机在 t 时刻的纵向距离 $L_x(t)$; 由于 $\epsilon_{ix}(t) \sim N(\mu_{ix}, \sigma_{ix}^2)$, 那么 $\epsilon_{1x}(t) - \epsilon_{2x}(t) \sim N(\mu_{1x} - \mu_{2x}, \sigma_{1x}^2 + \sigma_{2x}^2)$; 则在 t 时刻, 2 架飞机纵向实际距离又可以表示为:

$$X_1(t) - X_2(t) = L_x(t) + (\epsilon_{1x}(t) - \epsilon_{2x}(t)) \sim N(L_x(t) + (\mu_{1x} - \mu_{2x}), \sigma_{1x}^2 + \sigma_{2x}^2) \quad (8)$$

则同时进近模式两机 t 时刻纵向碰撞风险为:

$$P_X(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{1x}^2 + \sigma_{2x}^2)}} \cdot$$

$$\int_{-\lambda_x}^{\lambda_x} \exp\left(-\frac{(x - (L_x(t) + \mu_{1x} - \mu_{2x}))^2}{2(\sigma_{1x}^2 + \sigma_{2x}^2)}\right) dx \quad (9)$$

同理可得, 在同时进近模式下, 在 t 时刻, 两机的侧向碰撞风险和垂直碰撞风险为:

$$P_Y(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{1y}^2 + \sigma_{2y}^2)}} \cdot$$

$$\int_{-\lambda_y}^{\lambda_y} \exp\left(-\frac{(y - (L_y(t) + \mu_{1y} - \mu_{2y}))^2}{2(\sigma_{1y}^2 + \sigma_{2y}^2)}\right) dy \quad (10)$$

$$P_Z(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{1z}^2 + \sigma_{2z}^2)}} \cdot$$

$$\int_{-\lambda_z}^{\lambda_z} \exp\left(-\frac{(z - (L_z(t) + \mu_{1z} - \mu_{2z}))^2}{2(\sigma_{1z}^2 + \sigma_{2z}^2)}\right) dz \quad (11)$$

如果 2 架飞机存在碰撞风险, 那么一定是在侧向、纵向和垂直方向同时发生重叠, 所以, 两机在进近时碰撞风险的大小是由侧向、纵向和垂直方向的碰撞风险决定, 侧向、纵向和垂直方向的碰撞风险相互独立。则在 t 时刻两机的碰撞风险为:

$$P(t) = P_X(t)P_Y(t)P_Z(t) \quad (12)$$

4 算例与仿真

为保证得到的碰撞风险结果可靠有效, 模型中

最关键的位置误差和速度参数是根据采集的实际运行的航空器航迹的 ADS-B 数据得到的, 其他参数是国际民航推荐值或本地区一线管制员的经验值: $R_1 = 4\ 500\text{ m}$, $D = 3\ 485\text{ m}$, $R_2 = 4\ 500\text{ m}$, $S_Z = 100\text{ m}$, $V_{IF1} = 330\text{ km/h}$, $\tan\alpha_1 = 10\%$, $V_{IF2} = 310\text{ km/h}$, $\tan\alpha_2 = 10\%$, $V_{FAF1} = 160\text{ km/h}$, $\tan\beta_1 = 7\%$, $V_{FAF2} = 140\text{ km/h}$, $\tan\beta_2 = 7\%$, $V_{L1} = 50\text{ km/h}$, $\tan\varphi_1 = 4\%$, $V_{L2} = 40\text{ km/h}$, $\tan\varphi_2 = 4\%$, $a_{i1} = -0.6\text{ m/s}^2$, $\lambda_x = 64.4\text{ m}$, $a_{i2} = -0.55\text{ m/s}^2$, $\lambda_y = 64.4\text{ m}$, $a_{f1} = -0.3\text{ m/s}^2$, $\lambda_z = 19.4\text{ m}$, $a_{f2} = -0.3\text{ m/s}^2$, $\mu_x = 0$, $\sigma_x^2 = 510.7$, $\mu_y = 0$, $\sigma_y^2 = 638.4$, $\mu_z = 0$, $\sigma_z^2 = 66.3$ 。运用 MATLAB 软件进行仿真, 结果见图 2。

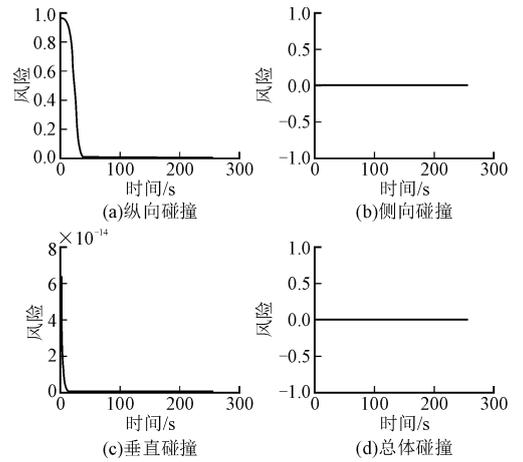


图 2 仿真结果

Fig. 2 Simulation results

图中横轴代表时间, 纵轴代表碰撞风险。由图 2 计算结果可得, 纵向碰撞风险在 101 s 时, 碰撞风险减至为 0; 侧向碰撞风险始终为 0; 垂直碰撞风险量级很小, 各个时刻的碰撞风险都接近于 0; 由于总体的碰撞风险为 3 个方向风险相乘的结果, 所以总体碰撞风险在每个时刻都为 0。

改变前机 IF 点到跑道入口阶段的下降梯度, 改变参数为: $\tan\beta_1 = 5\%$, $\tan\beta_2 = 7\%$, $\tan\varphi_1 = 3\%$, $\tan\varphi_2 = 4\%$ 。改变参数值后, 仿真结果见图 3。

由图 3 计算结果可得, 改变飞机的下降梯度, 垂直方向碰撞风险受到较大影响。纵向碰撞风险在 101 s 时, 碰撞风险减至为 0; 侧向碰撞风险始终为 0; 垂直碰撞风险在 0~145 s 时, 碰撞风险接近 0, 145~200 s 时, 碰撞风险不断增加, 200 s 时碰撞风险最大; 由于总体的碰撞风险为 3 个方向风险相乘的结果, 所以总体碰撞风险在每个时刻都为 0。

仿真结果说明, 在该参数条件下, 同时进近模式的运行是安全的。最后经过一线管制员 50 次模拟机的模拟验证, 得出与评估结果一致的结论, 进一步加强了模型和算法的可信度。

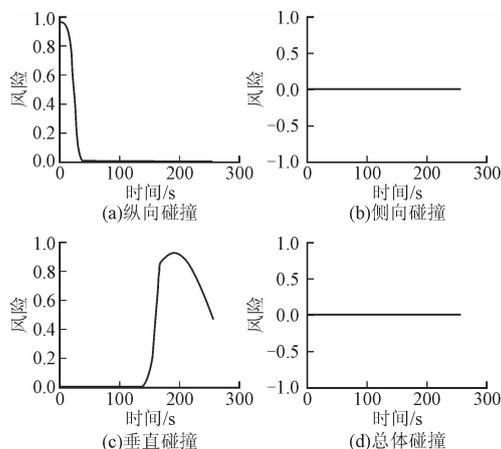


图 3 改变下降梯度仿真结果

Fig. 3 Simulation results after changing downward gravity

5 结语

本文基于概率论的思想,建立了同时仪表进近模式下平行跑道碰撞风险模型,得到了同时进近过程的碰撞风险变化趋势,仿真结果为同时仪表进近模式的实际运行和未来优化提供了理论支持。

参考文献 (References):

- [1] LYLE D F, JOSEPH W L. Study of aircraft separation criteria [D]. State of Michigan; The University of Michigan, 1964.
- [2] 王欣, 徐肖豪. 空中飞机侧向间隔标准的初步研究 [J]. 中国民航学院学报, 2001, 19(1): 1-5.
WANG X, XU X H. Study of Lateral Separation in Air Traffic Control [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2001, 19(1): 1-5. (in Chinese)
- [3] STONE R. Paired Approach concept: increasing IFR capacity to closely spaced parallel runways [J]. Journal of Aircraft, 2002, 39(4): 630-637.
- [4] FEIGH K M. An Airspace Simulator for Air Traffic Management Research [D]. Bedfordshire; Cranfield University, 2003.
- [5] 张秀辉. 平行跑道安全间隔评估模型研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2008.
ZHANG X H. Study of Safe Separation Evaluation Models on Parallel Runways [D]. Tianjin; Civil Aviation University of China, 2008. (in Chinese)
- [6] 蔡明, 张兆宁, 王莉莉. 基于模糊事故树分析法的飞行碰撞风险研究 [J]. 航空计算技术, 2011, 41(3): 22-26.
CAI M, ZHANG Z N, WANG L L. Research on Collision Risk Based on Fuzzy Fault Tree Analysis Method [J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(3): 22-26. (in Chinese)
- [7] BONE R, MUNDRA A, OLMOS B O. Paired approach operational concept [C] // Digital Avionics Systems, 2001. DASC. 20th Conference. IEEE, 2001: 5B3/1-5B3/14.
- [8] 韩松臣, 曲玉玲, 孙樊荣, 等. 航路交叉点处碰撞风险模型 [J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(2): 383-389.

- [9] HAN S C, QU Y L, SUN F R, et al. Collision Risk Model Around Intersection of Airways [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(2): 383-389. (in Chinese)
吕宗平, 张兆宁, 牛夏蕾. 基于速度和导航误差的配对进近碰撞风险研究 [J]. 航空计算技术, 2015, 45(6): 36-40.
LYU Z P, ZHANG Z N, NIU X L. Collision Risk Safety Assessment of Paired Approach Based on Velocity Error and Position Error [J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(6): 36-40. (in Chinese)
- [10] 朱博. 近距平行跑道运行碰撞风险评估研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
ZHU B. Study of Collision Risk Assessment on Closely-spaced Parallel Runway Operation [D]. Tianjin; Civil Aviation University of China, 2016. (in Chinese)
- [11] 卢飞, 张兆宁, 魏志强, 等. 近距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.
LU F, ZHANG Z N, WEI Z Q, et al. Longitudinal Collision Risk Safety Assessment of Paired Approach to Closed Spaced Parallel Runways [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(8): 108. (in Chinese)
- [12] 王维, 王美玲, 潜雪冰. 机场近距平行跑道间距和入口错开的选择研究 [J]. 中国民航学院学报, 2011, 29(2): 23-26.
WANG W, WANG M L, QIAN X B. Study on Method of Determination of Centrally Distance and Threshold Staggering Manner for Closely Spaced Parallel Runways of Airport [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(2): 23-26. (in Chinese)
- [13] 孙佳, 田勇. 近距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, 2014(2): 241-245.
SUN J, TIAN Y. Collision Risk Analysis of Closely Spaced Parallel Runways under Parallel Dependent Approach Pcedure [J]. Journal of Harbin University of Commerce, 2014(2): 241-245. (in Chinese)
- [14] 郑少行, 张兆宁. 配对进近运行模式下近距平行跑道容量研究 [J]. 航空计算技术, 2013, 43(4): 30-33.
ZHENG S X, ZHANG Z N. Research on Capacity of Closely Spaced Parallel Runways Based on Paired Approach Operation Mode [J]. Aeronautical Computing Technique, 2013, 43(4): 30-33. (in Chinese)
- [15] 张兆宁, 黎新华, 王莉莉. 基于飞行跟驰模型的纵向安全间隔计算方法 [J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(3): 73-76.
ZHANG Z N, LI X H, WANG L L. Computational Method of Longitudinal Safety Separation Based on Flight Following Theory [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(3): 73-76. (in Chinese)
- [16] 张兆宁, 刘计民, 王莉莉. 基于 CNS 性能的平行航路纵向碰撞风险评估 [J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(6): 918-925.
ZHANG Z N, LIU J M, WANG L L. Assessment of Longitudinal Collision Risk on Parallel Routes Based on Communication, Navigation and Surveillance Performances [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(6): 918-925. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)