

# 滑行道安全间距不满足要求时飞机滑行风险评价

韦雅之<sup>1</sup>, 种小雷<sup>1</sup>, 王思佳<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 西安, 710049)

**摘要** 针对机场飞行区滑行道宽度及滑行道与固定物体、平行滑行道间距不满足标准要求,飞机滑行过程中存在风险的问题,分析了飞机滑行的轨迹偏差,基于极值理论和广义 Pareto 分布的主要原理,分析滑行道偏离的高尾数据,选取合适的阈值,建立了偏离超阈值碰撞风险模型;在此基础上,对基础数据样本选取、阈值确定以及模型参数确定进行分析,最终给出了滑行道偏差的概率分布。

**关键词** 滑行道偏差;偏离超阈值碰撞风险模型;滑行道设计

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.05.004

**中图分类号** V272 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)05-0019-06

## Risk Assessment of Aircraft Taxiing When the Safety Distance of Taxiway Fails to Meet the Requirement

WEI Yazhi<sup>1</sup>, CHONG Xiaolei<sup>1</sup>, WANG Sijia<sup>2</sup>

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Residential Environment and Construction Engineering College, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Aimed at the problems that the width of taxiway, the separation between taxiways and other fixed objects of the flying area fails to meet the standard requirement and the risk of aircraft operation, this paper analyzes the route deviation caused by aircraft during taxiing. Based on the extreme value theory, by using the main principle of generalized Pareto distribution, the high tail of the data is analyzed, the appropriate threshold is selected and the exceed threshold model is established. On this basis, the selection of the data base sample is analyzed. Then, the paper determines the appropriate threshold and tunes the model parameters, and finally the taxiway deviation probability distribution is given. By running the taxiway deviation risk model.

**Key words:** taxiway deviation; exceed threshold deviation risk model; taxiway design

滑行道安全间距是指为保证滑行道上飞机的运行安全,在滑行道两侧设置的不允许存在固定或移动物体的安全区宽度。根据飞行区构型不同,滑行道安全间距指标主要包括滑行道中心线至固定物体的安全间距,以及平行滑行道中心线之间的距离。这些安全距离的确定,主要依据运行飞机的平面尺

寸和滑行性能。随着航空运输业的发展,飞机的尺寸越来越大,原有机场滑行道安全间距和宽度不满足新型飞机运行标准的情况时有发生<sup>[1]</sup>。对此种情况下飞机的运行风险进行评估,对滑行道改建方案决策和无法改建时滑行道运行策略制定具有十分重要的意义。目前国内尚未见到关于该方面的研究成

**收稿日期:** 2018-03-13

**作者简介:** 韦雅之(1994—),女,陕西泾阳人,硕士生,主要从事机场规划研究。E-mail:2651742406@qq.com

**引用格式:** 韦雅之,种小雷,王思佳. 滑行道安全间距不满足要求时飞机滑行风险评价[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(5): 19-24. WEI Yazhi, CHONG Xiaolei, WANG Sijia. Risk Assessment of Aircraft Taxiing When the Safety Distance of Taxiway Fails to Meet the Requirement[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(5): 19-24.

果,相关研究主要有飞机在航线及跑道的运行分析和飞机运行安全间隔的确定。主要包括侧向间隔评估<sup>[2-4]</sup>、纵向间隔评估<sup>[5-7]</sup>以及垂直间隔评估<sup>[8-9]</sup>,特别是在1966年,国外P. G. Reich<sup>[10-12]</sup>首次在纵向、侧向、垂直方向建立安全间隔评估碰撞风险模型,田勇<sup>[13]</sup>、王健<sup>[14]</sup>、朱博<sup>[15]</sup>和Guerreiro N. M.<sup>[16-17]</sup>在跑道进近配对安全间隔碰撞风险评估及影响因素探究方面,对本文的研究思路具有一定的启示作用。

## 1 飞机在滑行道上滑行的特征分析

### 1.1 影响飞机滑行的因素

飞机在滑行道上滑行时,典型特征是速度低,相对于跑道上的滑行属低速滑行。依据机型不同,速度一般保持在20~60 km/h的范围。但飞机在滑行过程中,同样受飞行员驾驶、滑行道状况、飞机操控性、周边建筑物、气象条件等环境因素影响。因此,飞机在滑行道上并不能完全按照预定路线滑行,存在一定偏差,尤其是大型飞机使用低等级机场时,这种偏差对飞机运行存在安全隐患。

### 1.2 飞机在滑行道上滑行轨迹分析

通过对某机场X型飞机机载数据的分析,得到从2000年9月24日起,不同时间飞机在1号平行滑行道、2号平行滑行道滑行偏离的统计数据,其中9月24日至10月3日的部分数据见表1<sup>[1]</sup>。

表1 飞机滑行道偏离数据

Tab.1 Data of taxiway deviation

序号	记录时间	滑行道 编号	偏离 量/m	序号	记录时间	滑行道 编号	偏离 量/m
1	2000.09.24	1	0.312	11	2000.09.29	1	0.324
2	2000.09.24	2	0.613	12	2000.09.29	2	0.155
3	2000.09.25	1	0.407	13	2000.09.30	1	0.621
4	2000.09.25	2	0.584	14	2000.09.30	2	0.102
5	2000.09.26	1	0.133	15	2000.10.01	1	0.366
6	2000.09.26	2	0.129	16	2000.10.01	2	0.455
7	2000.09.27	1	1.514	17	2000.10.02	1	1.529
8	2000.09.27	2	0.311	18	2000.10.02	2	0.377
9	2000.09.28	1	0.268	19	2000.10.03	1	0.126
10	2000.09.28	2	0.558	20	2000.10.03	2	0.412

通过表中数据可以发现,飞机滑行偏离具有较大的随机性和较强的时变性。

## 2 滑行道偏离超阈值碰撞风险模型

### 2.1 极值分布原理分析

通过收集偏离量数据并进行统计分析,绘制分

布图发现偏离量服从广义极值分布。极值理论认为,对于滑行道偏离数据样本 $\{X\} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ,当随机变量 $X_i$ 服从同一概率分布 $F(x)$ 且 $X_i$ 相互独立,同时,采用的数据基础底分布能够准确表达数据的分布特征时,令最大偏离量 $M_n = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ,若存在 $a_n > 0, b_n \in R$ 以及非退化分布函数 $H(x)$ ,使:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{M_n - b_n}{a_n} \leq x\right) = H(x) \quad (1)$$

则认为 $H(x)$ 为滑行道偏离量的极值分布, $F(x)$ 为极值分布 $H(x)$ 的最大值吸引场。

然而在分析偏离样本时,很难找到能够完整描述样本特性的底分布 $F(x)$ ,因此,对样本的极值渐进分布进行分析,基于Fisher-Tippett定理,极值分布可由广义极值分布(Generalized Extreme Value Distribution, GEV),即式(2)统一表述。

$$H(x, \mu, \sigma, \xi) = \exp[-(1 + \xi(x - \mu)/\sigma)^{-1/\xi}] \quad (2)$$

式中: $\mu$ 为位置参数; $\sigma$ 为尺度参数且大于零; $\xi$ 为形状参数,且 $1 + \xi(x - \mu/\sigma) \geq 0$ 。

在实际对滑行道偏离进行分析时,经典的极值理论忽视了数据分组中较大的样本值,数据浪费现象严重,这里,为了解决这一问题,本文直接研究高尾分布,建立阈值模型,利用超出某一临界值的所有数据样本建立模型。

对于选定的阈值为 $u$ ,若 $X > u$ ,其偏离量超出阈值的超出量分布函数可表示为:

$$F_u(x) = P(X - u \leq x | X > u) = \frac{F(x+u) - F(u)}{1 - F(u)} \quad (3)$$

记 $x^+ = \sup\{x : 0 < F(x) < 1\}$ 为极值分布的右端点,偏离量分布 $F(x)$ 隶属于 $H(x)$ 的最大值吸引场,此时:

$$\lim_{u \rightarrow x^+} \sup_{0 \leq x \leq x^+ - u} |Fu(x) - g(x; \bar{\sigma}, \xi)| = 0 \quad (4)$$

式中: $G(x; \bar{\sigma}, \xi) = 1 - (1 + \xi x/\bar{\sigma})^{-1/\xi}$ 为广义Pareto分布。此时, $x \geq 0, 1 + \xi x/\bar{\sigma} \geq 0$ 且 $\bar{\sigma} = \sigma + \xi(u - \mu)$ 。

由此,可以认为,当最大偏离量服从GEV分布时,对于足够大的偏离阈值 $u$ ,其偏离超出量 $X - u$ 服从于广义Pareto分布。

### 2.2 偏离数据的统计分析

在实际利用极值模型对滑行道偏离极值进行外推时,基础数据是影响外推准确性的重中之重,本文基于阈值模型,对基础数据进行了确定。

将解析数据总时长 $T$ 以 $\Delta T$ 为间隔分为 $n$ 段,在不同时段对偏离数据进行分析,偏离距离集合为 $\{D\} = \{\{D_1\}, \{D_2\}, \dots, \{D_n\}\}$ ,式中 $\{D\}_i$ 为样本第 $i$ 段时间内的偏离量集合。以各段解析数据最大值建立新的集合,即令 $X_i = \max\{\{D\}_i\}$ ,由极值理论

可知,当  $\Delta T$  时间合适时,  $X_i$  服从于极值分布。

对各时段偏离量数据最大值进行统计分析,可得概率密度对应各时段最大偏离量  $X_i$  的分布见图 1。可知,统计的主要数据大致服从于如式(5)所示的广义极值分布,但其尾部数据拟合情况不佳。

$$F_1(x) = \exp\left[-\left(1 + 0.065 \frac{x - 0.963}{0.172}\right)^{-1/15.38}\right] \quad (5)$$

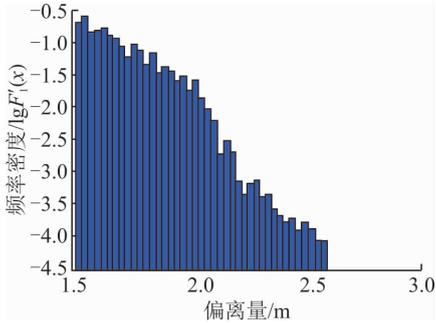


图 1 偏离分布拟合图

Fig. 1 Distribution fitting map of deviation

### 2.3 滑行道偏离超阈值碰撞风险模型建立

针对尾部数据拟合不佳的情况,设定数据选择的阈值为  $u$ ,可知尾部数据服从于广义 Pareto 分布。记  $X$  中超过阈值  $u$  的个数为  $n_u$ ,  $e(u) = E(X - u | X > u)$  为偏离量超过阈值的平均超出函数,易知服从广义 Pareto 分布的平均超出量函数为:

$$e(u) = \tilde{\sigma} / (1 - \xi) + \xi u / (1 - \xi) \quad (6)$$

该函数为阈值  $u$  的线性函数。

样本的平均超出量函数可以表示为:

$$e_n u(u) = \frac{1}{n_u} \sum_{i=1}^n (X_i - u), u > 0, X_i > u \quad (7)$$

由式(3)可知:

$$1 - F(x + u) = (1 - F_u(x))(1 - F(u)) \quad (8)$$

式中:  $1 - F(u)$  为偏离量超过阈值  $u$  的概率,  $1 - F(u)$  可以由  $n_u/n$  估计得到;  $1 - F_u(x)$  为滑行道偏离超出量的尾部,近似于广义 Pareto 分布。

此时,偏离数据的尾部分布为:

$$F(x) = 1 - \frac{n_u}{n} (1 + \xi(x - u) / \tilde{\sigma})^{-1/\xi} \quad (9)$$

### 2.4 模型参数估计

#### 2.4.1 解析时长 $T$ 的确定

考虑到飞机滑行道偏离量的显著时变性,基础数据时长的选取是进行偏离量极值预测的关键影响因素。考虑到飞机偏离最大值出现的随机性,同时更好地观察高尾数据的走势,本文分别对 20% 高尾数据、10% 高尾数据和 5% 高尾数据的变异系数随解析时长  $T$  变化进行了统计,其变化规律见图 2。

由统计结果可知,数据变异系数在 15 个月左右趋于稳定,因此应选取至少 15 个月的偏离量解析数据进行极值外推。

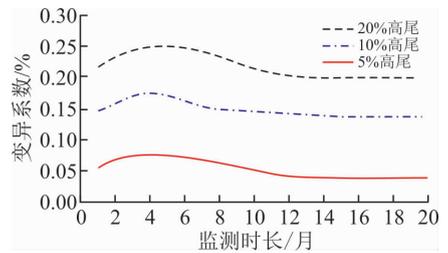


图 2 变异系数随监测时长变化规律

Fig. 2 Variation law of coefficient of variation with monitoring time

#### 2.4.2 阈值 $u$ 的选取

基于广义 Pareto 分布对阈值超出量进行拟合时,一个核心问题就是对于阈值  $u$  的选取,  $u$  值过大,数据样本太少,致使进行分布估计时方差过大,不准确;  $u$  值太小,使得高尾数据利用率降低,超出量分布与广义 Pareto 分布不相适应,不能有效反映极限偏离的正确分布,导致模型不可靠。因此阈值的选取十分重要。

当合适的阈值  $u$  选定后,其平均超出量函数  $e(u)$  应与  $u$  呈线性关系,由图 3 所示统计结果可知,当  $2.1 < u < 2.67$  时,  $e(u)$  与  $u$  呈线性负相关;当  $2.67 < u < 3.0$  时,  $e(u)$  与  $u$  呈线性正相关;当  $u > 3.0$  时,由于数据样本过少,  $e(u)$  急剧下降。

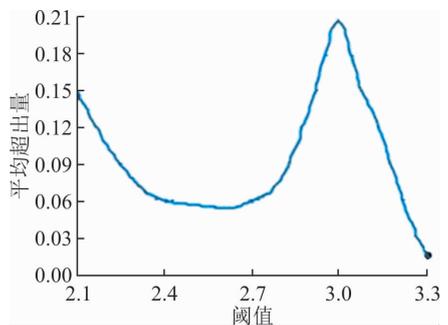


图 3 平均超出量随阈值变化规律

Fig. 3 Variation law of mean excess value with threshold

同时,当阈值在合适的范围波动时,参数  $\xi, \tilde{\sigma}$  应保持不变,本文对不同阈值下  $\xi, \tilde{\sigma}$  的取值进行了计算,考虑到抽样的随机性,  $\xi, \tilde{\sigma}$  应保持相对稳定。  $\xi, \tilde{\sigma}$  随阈值变化规律见图 4。

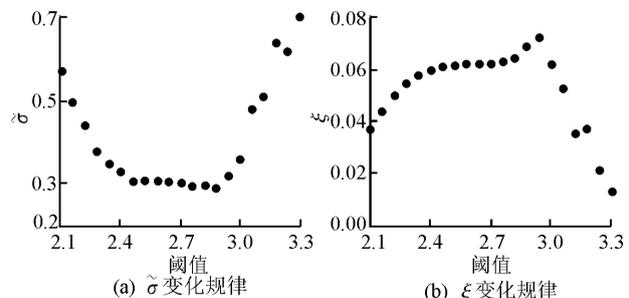


图 4 参数随阈值变化规律

Fig. 4 Variation law of parameters with threshold

由结果可见,当阈值  $u$  取 2.683 时,参数  $\xi, \bar{\sigma}$  能够基本保持稳定,当  $u > 3.0$ , 参数  $\xi, \bar{\sigma}$  的估计值波动较大,这一结果与平均超出量观测到的结果基本一致。此时,超阈值数据约占总数据的 0.03%, 能够很好地反应尾部数据的特征。

### 2.4.3 参数 $\xi, \bar{\sigma}$ 的确定

在确定阈值  $u$  之后,将超出阈值的所有数据从小到大排列,得顺序统计样本  $\{X_1^*, X_2^*, \dots, X_m^*\}$ 。

对于  $\xi$ , 选用 Hosking 与 Wallis 提出的方法<sup>[18]</sup>, 该方法在  $\xi$  接近 0 时有较高的精确度。

$$\xi = 0.5(1 - E^2(s)/\text{var}(s)), \xi < 0.5 \quad (10)$$

式中:  $\{s\} = \{X_1^* - u, X_2^* - u, \dots, X_{m-u}^*\}$ 。

在确定  $u$  及  $\xi$  后,结合广义 Pareto 分布与选定的高尾数据,构造散点图:

$$\left( \left[ 1 - \frac{k/(n+1) - (n-m)/(n+1)}{1 - (n-m)/(n+1)} \right]^{-\xi} - 1, X_k^* \right) \quad (11)$$

式中:  $k = n - m + 1, \dots, n$  通过回归分析即可得出  $\bar{\sigma}$ 。

基于上述分析,由式(9)可得飞机滑行道偏离碰撞风险分布函数的估计为:

$$F(x) = 1 - 1.021 \times 10^{-4} \times [1 - 0.186 \times (x - 2.683)]^{16.012}, x > 2.683 \quad (12)$$

则偏离碰撞风险模型为:

$$P(X > x | x > 2.683) = 1.021 \times 10^{-4} \times [1 - 0.186 \times (x - 2.683)]^{16.012} \quad (13)$$

其偏离风险概率可由图 5 直观表示。

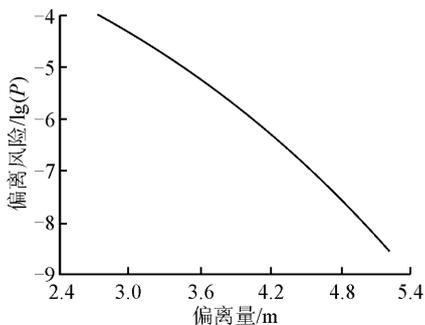


图 5 偏离风险图

Fig. 5 Deviation risk chart

## 3 飞机滑行过程中运行风险评价

### 3.1 基于风险矩阵方法的安全目标等级确立

本文采用风险矩阵法判断事故风险是否达到安全目标等级,其基础为事故发生的可能性和事故的严重性。参照 ACRP Report 51<sup>[1]</sup> 将事故发生的可能性划分为频繁、很可能、可能、有可能、极其不可能,其对应的概率分别为大于  $1.0 \times 10^{-3}$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-5}$ 、 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-7}$ 、 $1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-9}$ 、小于  $1.0 \times 10^{-9}$ , 将事故的严重

性划分轻微、较小、重大、潜在危险、灾难 5 个等级,见图 6。

表 2 风险矩阵

Tab. 2 Chart of matrix of risk

可能性	轻微	较小	重大	潜在危险	灾难
频繁	低风险	中风险	高风险	高风险	高风险
很可能	低风险	中风险	高风险	高风险	高风险
可能	低风险	低风险	中风险	高风险	高风险
有可能	低风险	低风险	低风险	中风险	高风险
极其不可能	低风险	低风险	低风险	低风险	中风险

由于单条滑行道宽度不够或与其他物体之间的间距不足,导致飞机在滑行过程中,偏出滑行道或与其他物体发生碰撞事故时有发生,对人员及财产安全造成威胁,因此,将事故的严重性定为重大。又由于飞机在滑行道滑行时速度较低,发生偏差的可能性较小,因此将事故发生的可能性定为有可能。基于以上两点,结合风险矩阵图可以判定此类事故上限风险概率为  $1.0 \times 10^{-7}$ 。

### 3.2 运行风险分析算例

以某机场为例,结合公式(13),对飞机滑行过程中的运行进行风险性评估。机场具有 1、2 号东西向两条平行滑行道,滑行道分布见图 6,机场可运行机型有 I 与 II。其中,机型 I 翼展宽  $S'_1 = 14.7$  m,主起落架间距  $W = 4.3$  m,按照滑行道 1 滑行至停机坪 I; 机型 II 翼展宽  $S'_2 = 34.19$  m,按照滑行道 2 经中间联络道滑行至停机坪 II。

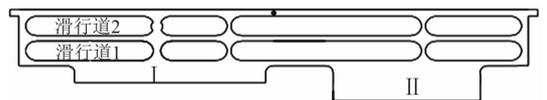


图 6 滑行道分布简图

Fig. 6 Chart of taxiway distribution

#### 3.2.1 飞机滑行偏离滑行道风险

1 号滑行道宽  $W_1 = 12$  m, 机型 I 在运行过程中产生偏差  $|d_1|$  为 4 m。将  $|d_1|$  代入式(13)中,得到其所对应的偏离概率估算值  $P_1 = 1.14 \times 10^{-6} > 1.0 \times 10^{-7}$ , 且此时飞机主轮外沿位于滑行道边缘一侧则  $|d_1| + W/2 > W_1/2 = 6$  m, 因此,判断 1 号滑行道宽度不满足机型 I 运行安全要求。

#### 3.2.2 飞机翼尖与固定物体碰撞风险

机型 II 按照 2 号滑行道滑行,经中间联络道进入停机坪 II 的过程中,与位于距其最近的固定障碍物间距(即滑行道中心线至固定障碍物离滑行道最近的边缘的距离)  $S_2 = 20$  m, 当飞机位于滑行道中心线时飞机翼尖距固定物体靠近滑行道侧边缘间隔

$D_2 = 2.91 \text{ m}$ , 则此时  $S_2 = S'_2/2 + D_2$ 。机型 II 在运行过程中产生偏差  $|d_2|$  为  $3.85 \text{ m}$  且飞机产生偏差后的间隔为  $D'_2$ , 则  $S_2 = S'_2/2 + D'_2 + d_2$ 。将  $|d_2|$  代入式(13)中, 得到其所对应的偏离概率估算值  $P_2 = 2.03 \times 10^{-6} > 1.0 \times 10^{-7}$ , 且  $D'_2 = D_2 - d_2 \leq 0$ , 因此, 判断 2 号滑行道间距不满足机型 II 运行安全要求。

### 3.2.3 2 架飞机翼尖与翼尖之间碰撞风险

将 2 架飞机在 1、2 号滑行道运行时所产生的偏差分别为  $d_3$ 、 $d_4$  2 组, 并对 2 组偏差值进行随机配对。通过对每对绝对值  $|d_3| + |d_4|$  采用极值外推法, 得到偏差概率的估算值。因偏差大小具有不稳定性且当偏差绝对值之和大于或等于 2 架飞机翼尖间隔时, 飞机会发生碰撞, 所以转化为翼尖间隔所对应的碰撞风险分布函数:

$$F(x) = 1 - 13.066 \times 10^{-4} \times [1 - 0.243 \times (x - 3.791)]^{12.314} \quad (14)$$

$x > 3.791$

则翼尖碰撞风险模型为:

$$P(X > x | x > 3.791) = 13.066 \times 10^{-4} \times [1 - 0.243 \times (x - 3.791)]^{12.314} \quad (15)$$

翼尖间隔碰撞风险概率见图 7。

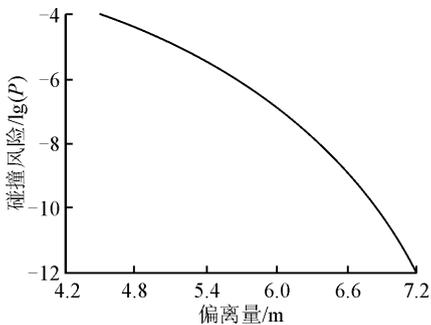


图 7 碰撞风险图

Fig.7 Collision risk chart

1、2 号为平行滑行道, 滑行道中心线间距(即平行滑行道中心线之间的距离)  $S_{34} = 30 \text{ m}$ 。其中 1 号滑行道运行机型 I, 2 号滑行道运行机型 II, 2 架飞机在运行过程中产生偏差绝对值之和  $|d_3| + |d_4| = 5.8 \text{ m}$ 。当 2 架飞机分别位于两条滑行道中心线时, 2 架飞机翼尖间隔  $D_{34} = 5.6 \text{ m}$  则  $S_{34} = S'_1/2 + D_{34} + S'_2/2$ 。当 2 架飞机运行产生偏差后间隔为  $D'_{34}$ , 则  $S_{34} = |d_2| + S'_1/2 + D'_{34} + S'_2/2 + |d_4|$ 。将  $|d_3| + |d_4|$  代入式(15)中, 得到其所对应的偏离概率估算值  $P_{34} = 3.43 \times 10^{-7} > 1.0 \times 10^{-7}$ ,  $D'_{34} = D_{34} - |d_3| - |d_4| \leq 0$ , 因此, 判断 1、2 号平行滑行道间距不能满足该 2 种飞机运行安全要求。

### 3.3 控制风险的措施

根据本文计算模型, 计算出  $1.0 \times 10^{-7}$  对应的

飞机偏离量(飞机是否发生碰撞风险对应偏离量的临界值)为会产生碰撞风险的最大偏离量  $\max |d|$ , 对于 3.2 节中前 2 种风险情况  $\max |d_1| = 4.58 \text{ m}$ , 对于第 3 种风险情况  $\max |d_2| = 6.01 \text{ m}$ 。结合最大偏离量提出降低风险的措施, 主要包括 2 个方面, 一是保持机场现有运行条件, 计算出安全的滑行道宽度或与其他物体之间的间距; 二是保持现有滑行道与其他物体之间的间距不变, 通过限制飞机的机型, 缩短飞机翼展长度, 以保证滑行道与其他物体之间的间距满足安全要求。

#### 3.3.1 飞机滑行偏离滑行道风险措施

针对算例中 3.2.1 部分, 要使得滑行道宽度能够满足飞机允许最大偏离量的运行需要, 则需对滑行道宽度作出调整。若飞机发生最大偏差, 此时飞机主轮外沿位于滑行道边缘一侧, 因此, 应将滑行道宽度确定  $W'_1 > 2 \max |d_1| + W = 13.46 \text{ m}$ 。实际工程中需取整为  $14 \text{ m}$ 。

#### 3.3.2 飞机翼尖与固定物体碰撞风险措施

针对算例中 3.2.2 部分, 提出措施如下: 一是保持机场现有运行条件, 为保证飞机在发生允许最大偏离量时翼尖不与固定物体发生碰撞, 因此, 将滑行道至固定物体间距确定为  $S_{21} > \max |d_1| + S'_2/2 = 21.68 \text{ m}$ ; 二是保持现有滑行道与固定物体之间的间距不变, 控制可运行飞机翼展长度  $S''_2 < 2(S_2 - \max |d_1|) = 30.84 \text{ m}$ , 通过限制滑行道上运行飞机类型, 从而达到安全等级的要求。

#### 3.3.3 2 架飞机翼尖与翼尖之间碰撞风险措施

针对算例中 3.2.3 部分, 提出措施如下: 一是保持机场现有运行条件, 为保证 2 架飞机在发生允许最大偏离量时翼尖之间不发生碰撞, 因此, 将 1、2 号平行滑行道间距确定为  $S'_{34} > \max(|d_3| + |d_4|) + (S'_1/2 + S'_2/2) = 30.46 \text{ m}$ (其中  $\max(|d_3| + |d_4|) = \max |d_2|$ ); 二是保持现有平行滑行道之间的间距不变, 控制可运行飞机翼展长度  $(S'_1 + S'_2)' < 2[S_{34} - \max(|d_3| + |d_4|)] = 47.98 \text{ m}$ , 通过限制 1、2 号平行滑行道上运行飞机类型, 从而达到安全等级的要求。

## 4 结论

1) 机型 I 在 1 号滑行道滑行时, 滑行道宽度应大于  $14 \text{ m}$ 。

2) 机型 II 在 2 号滑行道滑行时, 在保持机场现有运行条件下, 滑行道至固定物体间距应该大于  $21.68 \text{ m}$ 。

3) 1、2 号平行滑行道分别运行机型 I、II 时, 在

保持机场现有运行条件下,平行滑行道间距应大于30.46 m。

### 参考文献(References):

- [1] TRB. ACRP Report 51: Risk Assessment Method to Support Modification of Airfield Separation Standards [R]. Washington DC: National Academy of Sciences, 2011.
- [2] 周建,周启,蒋志伟. 平行航路侧向间隔安全评估研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(8): 26-30.  
ZHOU J, ZHOU Q, JIANG Z W. Study on Safety Assessment of Parallel Route Based on Lateral Separation Model [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(8): 26-30. (in Chinese)
- [3] 党淑雯,王康乐. 飞机平行航路侧向碰撞风险预测仿真[J]. 计算机应用, 2017, 37(S1): 115-117.  
DANG S W, WANG K L. Prediction and Simulation of Aircraft Lateral Collision Risk on Parallel Route [J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(S1): 115-117. (in Chinese)
- [4] BROOKER P. Lateral Collision Risk in Air Traffic Track Systems: A 'Post-Reich' Event Model [J]. Journal of Navigation, 2003, 56(3): 399-409.
- [5] 翟文鹏,齐莉,张诗童. 采用飞行流模拟方法的ADS-B平行航路纵向安全间隔评估[J]. 飞行力学, 2015, 33(5): 464-470.  
ZHAI W P, QI L, ZHANG S T. ADS-B Parallel Route Longitudinal Safety Interval Evaluation with Flight Flow Simulation Method [J]. Flight Dynamics, 2015, 33(5): 464-470. (in Chinese)
- [6] 张勇,郝兵,杨晓嘉. 基于速度分布的纵向碰撞危险REICH模型初步研究[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28(5): 5-9.  
ZHANG Y, HAO B, YANG X J. Study on REICH Model in Longitudinal Collision Risk Based on Airspeed Distribution [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010, 28(5): 5-9. (in Chinese)
- [7] BROOKER P. Longitudinal Collision Risk for ATC Track Systems: A Hazardous Event Model [J]. Journal of Navigation, 2006, 59(1): 55-70.
- [8] 张兆宁,刘计民. 基于CNS性能的垂直间隔碰撞风险评估[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28(1): 5-8, 37.  
ZHANG Z N, LIU J M. Assessment of Collision Risk of Vertical Separation Based on CNS Performance [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010, 28(1): 5-8, 37. (in Chinese)
- [9] CREAMER S, ENTIS S, HAASE N. RVSM in U. S. Airspace: Air Traffic Control Issues and Answers [J]. Journal of Air Traffic Control, 2003, 45(4): 8-11.
- [10] REICH P G. Analysis of Long Range Air Traffic Systems: Separation Standards - I [J]. Journal of Navigation, 1966, 19(1): 88-98.
- [11] REICH P G. Analysis of Long Range Air Traffic Systems: Separation Standards - II [J]. Journal of Navigation, 1966, 19(2): 169-186.
- [12] REICH P G. Analysis of Long Range Air Traffic Systems: Separation Standards - III [J]. Journal of Navigation, 1966, 19(3): 331-347.
- [13] 田勇,颜于杰,万莉莉,等. 近距平行跑道配对进近运行间隔研究[J]. 航空计算技术, 2015, 45(5): 11-19.  
TIAN Y, YAN Y J, WAN L L, et al. Research on Separation of Aircrafts for Paired Approachs to Closely Spaced Parallel Runways [J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(5): 11-19. (in Chinese)
- [14] 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 J, ZHANG Z N, LU F. Longitudinal Collision Risk Safety Assessment of Paired Approach to Closed Spaced Parallel Runways [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(3): 286-292. (in Chinese)
- [15] 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 on Collision Risk Assessment of Closely-space Parallel Runway Operation [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016. (in Chinese)
- [16] GUERREIRO N M, NEITZKE K W. Simulated Wake Characteristics Data for Closely Spaced Parallel Runway Operations Analysis [C]//The 12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSMO Multi-disciplinary Analysis and Optimization Conference, 2012: 5642-5648.
- [17] GUERREIRO N M, NEITZKE K W, JOHNSON S C, et al. Characterizing A Wake-Free Safe Zone for the Simplified Aircraft-Based Paired Approach Concept [R]. Fort Worth, Texas; American Institute of Aeronautics and Astronautics Proceedings, 2010.
- [18] HOSKING J R M, WALLIS J R. Parameter and Quantile Estimation for the Generalized Pareto Distribution [J]. Technometrics, 1987, 29(3): 339-349.

(编辑:姚树峰)