

文章编号: 1674-8190(2022)01-129-06

# 基于改进Event模型的航路飞行过程垂直碰撞风险研究

岳睿媛<sup>1</sup>, 苏彬<sup>2</sup>, 朱新平<sup>3</sup>, 曹哲<sup>1</sup>

(1. 中国民用航空飞行学院 计算机学院, 广汉 618307)

(2. 中国民用航空飞行学院 科研处, 广汉 618307)

(3. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 广汉 618307)

**摘要:** 随着民航空域运行的日益繁忙, 如何从量化分析的角度构建有效合理的数学模型对航路飞行碰撞风险进行量化评估, 提高航路规划与管理的科学性是业界面临的重要问题。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, 用符合航空器在空间上速度矢量分布的几何体即两个拼接的椭圆锥体碰撞盒代替原Event模型中的长方体碰撞盒计算航空器穿越相邻高度层的概率; 并利用改进前后碰撞盒的面积大小比值推导改进后航路中航空器的垂直碰撞风险公式, 将碰撞风险参数带入改进后的碰撞风险公式进行计算验证。结果表明: 改进方法计算的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, 是原椭球体Event模型碰撞风险模型的67%左右, 使用该方法进行量化评估是可行的。

**关键词:** 改进Event模型; 平行航路; 碰撞风险; 拼接椭圆锥体; 高度层

中图分类号: V355.1; V328

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.01.15

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Vertical Collision Risk of Air Route Flight Based on Improved Event Model

YUE Ruiyuan<sup>1</sup>, SU Bin<sup>2</sup>, ZHU Xinping<sup>3</sup>, CAO Zhe<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

(2. Scientific Bureau, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

(3. School of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** With the increasingly busy operation of civil aviation airspace, how to build an effective and reasonable mathematical model from the perspective of quantitative analysis to quantify the risk of route flight collision and improve the scientific nature of route planning and management is a problem faced by the industry. A risk assessment method of vertical collision during route flight based on improved Event model is proposed. In this method, the cuboid collision box in the original event model is replaced by two spliced elliptic cone collision boxes which conform to the velocity vector distribution of the aircraft in space to calculate the probability of the aircraft passing through the adjacent altitude layers. The vertical collision risk formula of the aircraft in the improved route is derived by using the area size ratio of the improved front and rear collision boxes. The collision risk parameters obtained by formula are verified. The results show that the vertical collision risk calculated by the improved method is about 13% of the original cuboid event model and 67% of the original ellipsoid event model. It is feasible to use this method for quantitative evaluation.

**Key words:** improved Event model; parallel route; collision risk; stitched elliptical cone; altitude layer

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-05-20

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金项目(U1733105); 四川省中央引导地方科技发展专项项目(2020ZYD094); 四川省科技计划项目(2020YFS0541); 四川省大学生创新创业训练项目(S202110624104)

通信作者: 岳睿媛, 1205187839@qq.com

引用格式: 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)

## 0 引言

关于航路碰撞风险模型的研究,国外研究者提出了经典的 Reich 模型针对平行航路的侧向、纵向和垂直方向的碰撞风险评估<sup>[1]</sup>。2003年,英国 Grandfield 大学的 P. Brooker<sup>[2]</sup>提出了建立在事件基础上的“Post-Reich”模型即 Event 模型,用此模型评估了 Event 侧向碰撞风险模型;2006年,P. Brooker<sup>[3]</sup>对纵向的碰撞风险进行了研究;2016年,T. Brewer-Dougherty 等<sup>[4]</sup>在 Reich 模型的基础上建立了一种基于导航性能提高的航路碰撞风险模型;2018年,K. Kim 等<sup>[5]</sup>对 Event 模型进行分析,发现相比于 Reich 模型,在实际应用方面,Event 模型的包容性相对更强,在叠加复杂影响因素的航路中应用优势也较为显著,而且数据具有较强的客观性。在国内的研究中,2008年,徐肖豪等<sup>[6]</sup>提出了利用圆柱体碰撞模板代替传统的长方体碰撞模板对航路的侧向碰撞风险概率进行评估与计算;2010年,俞文军等<sup>[7]</sup>利用球形碰撞模板代替了长方体碰撞模板在交叉航路飞行间隔安全中进行了评估与研究;2012年,曲玉玲<sup>[8]</sup>借助于概率论理论,建立了基于给定到达时间间隔的同航路同高度同向飞行的碰撞风险模型;2013年,吕宗平等<sup>[9]</sup>基于事故树分析的方法对配对航空器的进近风险进行了分析,并通过 Matlab 软件对模型进行计算,得到了航空器的纵向碰撞风险随相关参数的变化曲线;2015年,曹兴武等<sup>[10]</sup>利用椭球体碰撞盒对交叉航路的碰撞风险进行了评估;2017年,王健等<sup>[11]</sup>综合考虑两架航空器在配对过程中的时间与导航误差等因素,建立了两架航空器的纵向碰撞风险评估模型与运动方程,并利用 Matlab 计算模型得到了随相关参数变化的纵向碰撞风险变化曲线;2019年,杨硕<sup>[12]</sup>利用圆柱体与长方体的组合碰撞模板对大型无人机碰撞模型建模方法进行了研究;2021年,谢春生等<sup>[13]</sup>综合考虑了航空器偏航与尾流的影响,对各阶段航空器的纵向间隔进行计算,建立了配对进近纵向的碰撞风险评估模型。但原 Event 模型所利用的碰撞盒都不能形象地体现航空器在空间分布上的速度矢量变化,当相邻高度层上的 2 架航空器有接近的趋势时,考虑到航空器在高度层上飞行时,速度矢量变化在空间分布上主要体现在纵向,在垂直方向上的变化较小。

为了模拟航空器在空间分布上的速度矢量变

化,从而计算航空器的碰撞风险,本文提出改进 Event 模型的航路飞行过程垂直碰撞风险评估方法。用两个拼接的椭圆锥体碰撞盒代替原 Event 模型中的长方体碰撞盒,并计算改进前后碰撞盒的面积大小比例,从而推导出改进后的模型的碰撞风险;将相邻高度层的客机 A220 与客机 A310 作为算例,利用设计的软件对两架航空器在垂直方向的碰撞风险进行计算,验证使用两个拼接的椭圆锥体碰撞盒代替原 Event 模型中的碰撞盒的方法的可行性。

## 1 改进的 Event 模型碰撞风险评估方法

针对相邻的两个航路点之间航段飞行过程,研究航段上相邻的两个高度层上的航空器垂直碰撞风险。具体场景如图 1 所示,重点考虑航段 12、航段 23、航段 13 上相邻高度层的两架航空器。例如航段 12 上的航空器 A 与航空器 B。

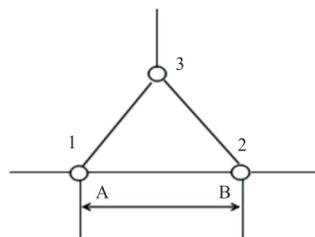


图 1 交错的航路

Fig. 1 Staggered airways

考虑到航空器在高度层上飞行时,速度矢量变化在空间分布上主要体现在纵向,在垂直方向上的变化较小。因此,建立以航空器 A 为中心的两个拼接的椭圆锥体碰撞盒,如图 2 所示,其中  $a$  为单个椭圆锥体的高(即航空器的机身长), $b$ 为单个椭圆锥体的长半径(即航空器的翼展长), $h$ 为椭圆锥体的短半径(即大于航空器机身中心到垂尾顶部的高度,且在垂尾处  $h$  取值为航空器机身中心到垂尾顶部距离)。

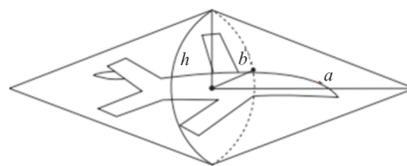


图 2 椭圆锥体碰撞模板

Fig. 2 Elliptical cone collision template

改进模型假设:

(1) 假设只研究交错航路中的 12 航段中的两架航空器 A 与航空器 B;

(2) 在航段 12 中各个方向上两架航空器的误差是相互独立的;

(3) 两架航空器是以反向的同标称速度飞行的;

(4) 两架航空器的飞行航迹是直线。

为了能够将航空器在任意时刻的距离表示出来,并且更加直观地呈现出推导过程,本文建立直角坐标系。在同航路的相邻高度层上有航空器 A 与航空器 B,以航空器 B 作为原点建立直角坐标系,  $x$  轴为纵向,侧向为  $y$  轴,  $z$  轴是垂直于  $xy$  平面建立的坐标轴,将  $x$  轴和  $y$  轴确定的平面确定为高度层。当存在误差因素导致航空器 A 穿越航空器 B 的高度层时,碰撞盒 A 就有可能脱离自身高度层而到航空器 B 所在的高度层,从而发生垂直和侧向的位置偏移。同时如果航空器 B 正好在碰撞盒 A 穿越要经过的位置,两航空器即发生碰撞。改进的 Event 模型如图 3 所示。

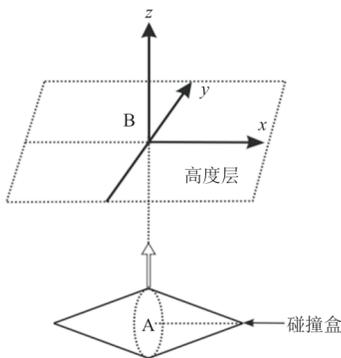


图 3 碰撞盒穿越高度层  
Fig. 3 Crash box traversal level

## 2 碰撞风险计算

由于碰撞盒的尺寸和大小与航空器 B 位于碰撞盒内的概率必然存在着直接的联系,且此概率与两个拼接的圆锥体碰撞盒的面积呈正比关系。因此在计算改进后两个拼接的圆锥体 Event 模型的碰撞概率时只需将改进前后的碰撞盒投影在高度层上的面积大小比例关系与原长方体 Event 模型的碰撞风险值相乘即可。

建立两个拼接圆锥体的扩展碰撞盒如下图 4 所示,其中  $NM$  为距离线段  $GP$  最近但不相交线

段,  $LR$  同样为距离线段  $DS$  最近但不相交的线段。则两个拼接圆锥体碰撞盒的穿越面积为图 4 中  $GMNSRL$  的面积,而原长方体模型的碰撞盒则为图 4 中  $EGIK$  的面积。

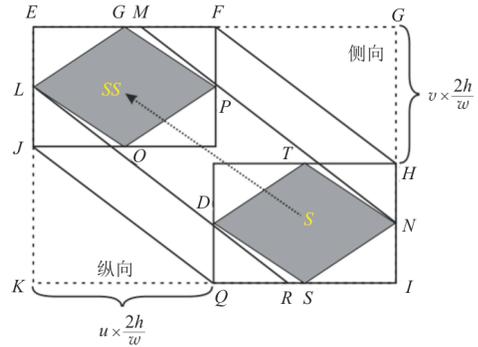


图 4 航路的扩展碰撞盒  
Fig. 4 Extended collision box

假定碰撞盒 A 在穿越高度层时在图 4 中的 S 点,穿出高度层则在图 4 中的 SS 点。根据文献 [2],若碰撞盒垂直穿越航空器 B 的高度层的时候,航空器 B 恰好位于所在的碰撞风险区中,则证明两航空器发生了碰撞。需要将改进后碰撞盒在高度层上的投影面积大小  $GMNSRL$  占整个长方体碰撞盒的比例通过图形进行推导。碰撞盒在改进前面积大小的比例记为  $R(0)$ ,对  $R(0)$  进行推导与计算。

在图 4 中,记两个拼接的圆锥体碰撞盒 A 穿越高度层的时间为  $t$ ,则  $t = \frac{2h}{w}$ ;  $GH$  线段是碰撞盒侧向移动的距离,则有  $GH = \frac{v \times 2h}{w}$ ;  $KQ$  线段是碰撞盒纵向移动的距离,则有  $KQ = \frac{u \times 2h}{w}$ ;  $QI$  和  $IH$  分别为碰撞盒的高和椭球面的长半径,  $QI = 2a, IH = 2b$ 。

若模型使用长方体时碰撞盒的面积表示为  $S_{\text{长}}$ ,则:

$$S_{\text{长}} = S_{EGIK} = KI \times GI = \left( \frac{u \times 2h}{w} + 2a \right) \times \left( \frac{v \times 2h}{w} + 2b \right)$$

若模型使用两个拼接圆锥体时的碰撞盒面积表示为  $S_{\text{锥}}$ ,通过计算得到:

$$S_{\text{锥}} = S_{\text{长}} - S_{\triangle MGN} - S_{\triangle LRK} - S_{\triangle EGL} - S_{\triangle NSI}$$

在图 4 中,由于线段  $MF$  较难推出,在此借鉴

取近似值的方法<sup>[6]</sup>,若取: $MF = \frac{1}{4}EF = \frac{1}{2}a$ , 同样

$$HN = \frac{1}{4}HI = \frac{1}{2}b.$$

则有:

$$S_{\Delta MGN} = \frac{1}{2} \times MG \times GN = \frac{1}{2} \times (MF + FG) \times (GH + HN) = \frac{1}{2} \times \left( \frac{1}{2} \times a + \frac{u \times 2h}{w} \right) \times \left( b + \frac{v \times 2h}{w} \right)$$

同理可知:

$$S_{\Delta LRK} = \frac{1}{2} \times PK \times KQ = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \times a + \frac{u \times 2h}{w} \right) \times \left( b + \frac{v \times 2h}{w} \right)$$

同样可得:

$$S_{\Delta EGL} = S_{\Delta NSI} = \frac{1}{2} \times EG \times EL = \frac{1}{2} \times a \times b = \frac{1}{2}ab$$

则可推导出:

$$\begin{aligned} S_{\text{锥}} &= S_{\text{长}} - S_{\Delta MGN} - S_{\Delta LRK} - S_{\Delta EGL} - S_{\Delta NSI} = \\ & \left( \frac{u \times 2h}{w} + 2a \right) \times \left( \frac{v \times 2h}{w} + 2b \right) - \frac{1}{2} \times \\ & \left( \frac{1}{2} \times a + \frac{u \times 2h}{w} \right) \times \left( b + \frac{v \times 2h}{w} \right) - \frac{1}{2} \times \\ & \left( \frac{1}{2} \times a + \frac{u \times 2h}{w} \right) \times \left( b + \frac{v \times 2h}{w} \right) - 2 \times \\ & \frac{1}{2} \times a \times b = \left( \frac{u \times 2h}{w} + 2a \right) \times \left( \frac{v \times 2h}{w} + \right. \\ & \left. 2b \right) - \left( \frac{1}{2} \times a + \frac{u \times 2h}{w} \right) \times \left( b + \frac{v \times 2h}{w} \right) - \\ & ab = \frac{2hub}{w} + \frac{3hav}{w} + \frac{5}{2}ab \end{aligned}$$

碰撞风险就是碰撞盒 A 穿越高度层的频率与航空器 B 位于扩展碰撞盒 LGMNSR 内的概率的乘积。即:碰撞风险=碰撞盒 A 垂直穿越高度层的频率×航空器 B 位于扩展碰撞盒内的概率。

根据上文假定的  $R(0)$  为改进前后碰撞盒面积大小的比值,则根据文献[14]中的计算方法可得:

$$R(0) = \frac{\frac{2hub}{w} + \frac{3hav}{w} + \frac{5}{2}ab}{4 \left( \frac{uvh^2}{w^2} + \frac{ahv + buh}{w} + ab \right)} \quad (1)$$

根据文献[15]可得,在航路最初基于长方体的碰撞盒的 Event 模型的碰撞风险为

$$N_c = 2 \times P_z(S_z) \times E(0) \times P_y(0) \times \frac{\lambda_x}{S_x} \times \frac{w}{2\lambda_z} \times \left( 1 + \frac{2u\lambda_z}{2w\lambda_x} \right) \times \left( 1 + \frac{2v\lambda_z}{2w\lambda_y} \right) \quad (2)$$

用式(2)乘以  $R(0)$  即可得到经过改进的基于两个拼接圆锥体时 Event 模型所得的碰撞风险概率。由此可得,航路的碰撞风险计算在基于两个拼接的圆锥体建立的模型时,碰撞风险为

$$\begin{aligned} N_c'' &= 2 \times P_z(S_z) \times R(0) \times E(0) \times P_y(0) \times \frac{a}{S_x} \times \\ & \frac{w}{2h} \times \left( 1 + \frac{2uh}{2wa} \right) \times \left( 1 + \frac{2vh}{2wb} \right) = 2 \times \\ & P_z(S_z) \times E(0) \times P_y(0) \times \frac{a}{S_x} \times \frac{w}{2h} \times \\ & \left( 1 + \frac{2uh}{2wa} \right) \times \left( 1 + \frac{2vh}{2wb} \right) \times \\ & \frac{\frac{2hub}{w} + \frac{3hav}{w} + \frac{5}{2}ab}{4 \left( \frac{uvh^2}{w^2} + \frac{ahv + buh}{w} + ab \right)} \quad (3) \end{aligned}$$

根据文献[14],基于碰撞椭球体时 Event 模型所得的碰撞盒面积大小的比值为

$$R(0)' = \frac{\frac{3(avh + buh)}{w} + \left( \frac{1}{2}\pi + \frac{7}{4}ab \right)}{4 \left( \frac{uvh^2}{w^2} + \frac{ahv + buh}{w} + ab \right)} \quad (4)$$

用式(4)乘以  $N_c$  即可得到经过改进的基于碰撞椭球体时 Event 模型所得的碰撞风险概率为

$$\begin{aligned} N_c''' &= 2 \times P_z(S_z) \times R'(0) \times E(0) \times P_y(0) \times \frac{a}{S_x} \times \\ & \frac{w}{2h} \times \left( 1 + \frac{2uh}{2wa} \right) \times \left( 1 + \frac{2vh}{2wb} \right) = 2 \times \\ & P_z(S_z) \times E(0) \times P_y(0) \times \frac{a}{S_x} \times \frac{w}{2h} \times \\ & \left( 1 + \frac{2uh}{2wa} \right) \times \left( 1 + \frac{2vh}{2wb} \right) \times \\ & \frac{\frac{3(avh + buh)}{w} + \left( \frac{1}{2}\pi + \frac{7}{4}ab \right)}{4 \left( \frac{uvh^2}{w^2} + \frac{ahv + buh}{w} + ab \right)} \quad (5) \end{aligned}$$

式中: $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  分别为原长方体 Event 模型中航空器的机身长,翼展长和高度; $P_z(S_z)$  为两架航空器

垂直重叠的概率; $E(0)$ 为两架航空器的纵向临近率,即相邻的飞行高度层上,航空器的纵向间隔小于纵向间隔标准值的航空器数量与航路上航空器总数量的比例; $P_y(0)$ 为位于同一航迹相邻的高度层上两架航空器侧向重叠的概率; $a, b, h$ 分别为改进的两个拼接的圆锥体 Event 模型中的航空器的机身长,翼展长与大于航空器机身中心到垂尾顶部的高度; $u, v, w$ 分别为 A, B 两个航空器分别在纵向,侧向及垂直方向的相对速度; $N_c$ 为原长方体碰撞盒的 Event 模型在航路的碰撞风险值; $N_c''$ 为经过改进后利用两个拼接的圆锥体碰撞盒的 Event 模型在航路的碰撞风险值; $N_c'''$ 为原椭球体碰撞盒的 Event 模型在航路的碰撞风险值; $S_x$ 为航空器的纵向间隔标准值。

### 3 算例

#### 3.1 基本参数

在计算碰撞风险时使用客机 A220 与 A310 作为算例,两种不同的客机组合分为以下两种情况。

(1) 客机一(A220 客机):机身长  $a_1$  为 35.00 m,翼展长度  $b_1$  为 35.10 m,高度  $h_1$  为 11.50 m;

(2) 客机二(A310 客机):机身长  $a_2$  为 46.66 m,翼展长度  $b_2$  为 43.90 m,高度  $h_2$  为 15.80 m。

取侧向相对速度  $v$  为 6.43 m/s,纵向相对速度  $u$  为 514 m/s,垂直相对速度  $w$  为 0.78 m/s<sup>[16]</sup>。取侧向的重叠概率  $P_y(0)$  为 0.043,垂直的重叠概率  $P_z(S_z)$  为  $6.6 \times 10^{-6}$ ,纵向临近率  $E(0)$  为 0.01,航空器的纵向间隔标准值  $S_x$  为 10 km<sup>[17-19]</sup>。碰撞风险参数如表 1 所示。

表 1 碰撞风险的参数  
Table 1 Parameters of collision risk

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$a_1/\text{m}$	35.00	$b_1/\text{m}$	35.10	$h_1/\text{m}$	11.50
$a_2/\text{m}$	46.66	$b_2/\text{m}$	43.90	$h_2/\text{m}$	15.80
$u/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	514	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	6.43	$w/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.78
$E(0)$	0.01	$P_y(0)$	0.043	$P_z(S_z)$	$6.6 \times 10^{-6}$

#### 3.2 算例分析

将表 1 中的全部数据带入公式(2)、公式(5)与公式(3),并通过编写的软件进行计算,分别得到原长方体 Event 模型,原椭球体 Event 模型与改进

的两个拼接圆锥体 Event 模型的碰撞风险值。得到计算结果(保留小数点后四位小数)如表 2 所示。

表 2 碰撞风险评估结果  
Table 2 Collision risk assessment results

碰撞风险值 组合类型	风险值			安全目标等级
	原长方体 Event 模型	原椭球 体模型	改进的拼接 圆锥体模型	
组合 1 (A220 客机)	$5.4235 \times 10^{-10}$	$1.1134 \times 10^{-10}$	$7.4736 \times 10^{-11}$	$5 \times 10^{-9}$
组合 2 (A310 客机)	$5.8126 \times 10^{-10}$	$1.1143 \times 10^{-10}$	$7.4285 \times 10^{-11}$	$5 \times 10^{-9}$

将两种客机的数据在三种不同类型的 Event 模型中进行计算与分析,用两个拼接的圆锥体碰撞模板代替原来的 Event 模型的碰撞模板后,碰撞风险是原长方体 Event 模型碰撞风险概率的 13% 左右,是原椭球体 Event 模型碰撞风险的 67% 左右,且都满足国际目标安全等级。

### 4 结 论

(1) 本文使用改进的更加符合航空器在空间上速度矢量分布的两个拼接圆锥体碰撞盒代替原有 Event 模型中的碰撞盒的方法后,相邻高度层的两种航空器的碰撞风险均是原长方体 Event 模型碰撞风险概率的 13% 左右,是原椭球体 Event 模型碰撞风险的 67% 左右。

(2) 使用改进的两个拼接圆锥体模型方法的碰撞风险值小于先前所有的碰撞模板所计算出的碰撞风险值,且在国际民航组织规定的安全目标风险值  $5 \times 10^{-9}$  范围以内,使得航路的碰撞风险计算更合理,克服了原 Event 模型的保守缺点,该方法对航路飞行碰撞风险量化评估是可行的。

#### 参 考 文 献

- [1] REICH P G. Analysis of long-range air traffic systems: separation standards-I [J]. Journal of Navigation, 1996, 19 (1): 88-98.
- [2] BROOKER P. Lateral collision risk in air traffic systems: a "Post-Reich" Event mode I [J]. Journal of Navigation, 2003, 56(3): 399-409.
- [3] BROOKER P. Longitudinal collision risk for ATC track systems: a hazardous Event model [J]. Journal of Navigation, 2006, 59(1): 55-70.

- [4] BREWER-DOUGHERTY T, COLAMOSCA B, CHRISTINE G F, et al. Collision risk modeling in the northern pacific airspace under separation reduction and improvements in navigational performance[J]. Air Traffic Control Quarterly, 2016, 14(4): 257-279.
- [5] KIM K, HWANG I. Intent-based detection and characterization of aircraft maneuvers in en route airspace[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2018, 15(2): 72-90.
- [6] 徐肖豪, 王振宇, 赵鸿盛. 基于Event的侧向碰撞风险改进模型[J]. 中国民航大学学报, 2008(3): 1-4.  
XU Xiaohao, WANG Zhenyu, ZHAO Hongsheng. An Event-based lateral collision risk improvement model[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2008(3): 1-4. (in Chinese)
- [7] 俞文军, 卢婷婷, 刘计民. 交叉航路飞行间隔安全评估研究[J]. 航空计算技术, 2010, 40(1): 11-15.  
YU Wenjun, LU Tingting, LIU Jimin. Reserch on safety assessment of cross route flight interval[J]. Aeronautical Computing Technology, 2010, 40(1): 11-15. (in Chinese)
- [8] 曲玉玲. 空中交通碰撞风险建模研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
QU Yuling. Air traffic collision risk modeling research[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [9] 吕宗平, 李燕飞, 张兆宁. 基于事故树分析法的配对近纵碰撞风险研究[J]. 科技和产业, 2013, 13(4): 130-134.  
LYU 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)
- [10] 曹兴武, 张兆宁. 基于Event改进模型的交叉航路碰撞风险评估[J]. 中国民航大学学报, 2015, 33(3): 1-4.  
CAO Xingwu, ZHANG Zhaoning. Cross route collision risk assessment based on Event improved model [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2015, 33(3): 1-4. (in Chinese)
- [11] 王健, 张兆宁, 卢飞. 近距平行跑道配对近纵碰撞风险安全评估[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)
- [12] 杨硕. 大型无人机碰撞模型建模方法研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.  
YANG Shuo. Research on modeling method of large UAV collision model [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [13] 谢春生, 梁献匀, 卢飞. 基于统计分布的近距平行跑道配对近纵碰撞风险评估[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 4284-4288.  
XIE Chunsheng, LIANG Xianyun, LU Fei. Based on the statistical distribution, the risk assessment of paired approach longitudinal collisions in close parallel runways[J]. Science, Technology and Engineering, 2021, 21(10): 4284-4288. (in Chinese)
- [14] 戴福青, 周启. 基于Event的垂直碰撞风险改进模型研究[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(6): 4-7.  
DAI Fuqing, ZHOU Qi. Research on Event-based vertical collision risk improvement model[J]. Journal of China Civil Aviation University, 2011, 29(6): 4-7. (in Chinese)
- [15] 孟祥伟, 张平, 王瑛. 交叉航路航空器碰撞风险评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(9): 1021-1025.  
MENG Xiangwei, ZHANG Ping, WANG Ying. Crossroad aircraft collision risk assessment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(9): 1021-1025. (in Chinese)
- [16] 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): 5-37.  
ZHANG Zhaoning, LIU Jimin. Risk assessment of vertical spacer collision based on CNS performance[J]. Journal of China Civil Aviation University, 2010, 28(1): 5-37. (in Chinese)
- [17] 张晓燕, 潘卫军. RVSM空域内垂直间隔的安全评估[J]. 航空计算技术, 2009, 39(5): 5-8.  
ZHANG Xiaoyan, PAN Weijun. Safety assessment of verticaling in RVSM airspace[J]. Aeronautical Computing Technology, 2009, 39(5): 5-8. (in Chinese)
- [18] Anon. Application of Monte Carlo methods to estimation of collision risk associated with ATC separation standards: AD-773313[R]. US: AD, 1973.
- [19] MOEK G, LUTZ E, MOSBORG W. Risk assessment of RNP1 and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions: 20833[R]. Annapolis: ARINC, 2001.

#### 作者简介:

岳睿媛(1997—),女,硕士研究生。主要研究方向:交通运输工程以及航路航空器碰撞风险等。

苏彬(1968—),男,硕士,研究员。主要研究方向:交通运输工程以及飞行器设计与制造等。

朱新平(1983—),男,博士,教授。主要研究方向:交通运输工程以及空域安全规划与管理。

曹哲(1996—),男,硕士研究生。主要研究方向:交通运输工程以及航路的安全与规划。

(编辑:丛艳娟)