

近距平行跑道立体起降安全碰撞风险模型研究

杨昌其, 蔡子牛, 冯筱晴, 林 灵

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要:针对进场复飞航空器与离场航空器之间的碰撞风险问题,通过分析由位置误差概率所产生的两机之间的真实距离和测量距离,评价两机之间的碰撞风险程度,从 3 个维度分析一起一降模式时的两机碰撞风险。结合复飞场景的不利环境因素,建立关于位置误差的三维碰撞风险模型。以此探讨近距平行跑道对起飞离场和进近降落航空器之间的安全间隔值的影响,具有重要的实际意义和理论意义。

关键词:位置误差概率;一起一降模式;三维碰撞风险模型;安全间隔值

中图分类号:V355 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)06-0203-05

根据“十四五”民用航空机场的扩建与新建计划,需要制订既可以节约土地资源,又可以达到自身需求的机场设计方案。而对于机场运行而言,当务之急是提高机场容量,保证机场的吞吐量需求。近距平行跑道(CSPR)机场容量大,且用地面积小,是“十四五”民航机场研究的重点领域。国内外大多数大型机场已经开始运行近距平行跑道,显而易见,未来中国其他民航机场也将规划或建设近距平行跑道。对于近距平行跑道也诞生出多种运行方式,如连续离场、配对进近及一起一降等,在中国近距平行跑道主要采取一起一降运行模式。近距平行跑道运行中,航空器与航空器之间起飞与降落的间隔应当符合最低安全目标水平要求的间隔标准,因此建立跑道间隔安全评估模型具有重要的安全应用价值。

目前,欧美民航学者在运行模式方面已经进行了一系列研究。Rossow 等^[1]为了研究配对进近危险区,对大气湍流和风引发的尾流横向运动进行研究。Lunsford 等^[2]对配对离场的可行性进行了分析,证明了程序的可实施性。而在国内虽起步较晚但也有着丰富研究成果。朱代武等^[3]引入 Reich 碰撞模型,将目视误差、导航误差作为影响因素,从 3 个维度来分析平行进近时的两机碰撞风险,建立三维碰撞模型。康南等^[4]设计了尾流遭遇安全性评估流程,并对某机场现行运行模式下的尾流遭遇安全性进行了计算和

评估。谢春生等^[5]研究了飞机进近纵向定位误差的统计分布,通过分析广播式自动相关监视数据得到拟合效果最佳的无界约翰逊分布,综合考虑影响后建立配对进近纵向碰撞风险评估模型。王维等^[6]研究了相关平行进近运行模式下的跑道容量,发现在安全运行条件下,增大下滑角能有效提升到达容量。然而增大下滑角将导致垂直方向最小安全间隔风险增大。故本文基于文献^[7]一起一降风险评估模型,结合垂直平面安全间隔、起降梯度等指标,构建立体近距平行跑道风险评估模型。

1 近距平行跑道定义和一起一降运行模式

国际上普遍认可的近距平行跑道(closely spaced parallel runways, CSPR)定义是:两条跑道中心线间距为 213~762 m 的跑道系统。由于中国民航业的高速发展,有关 CSPR 的运行模式也越来越多元化了,其中一起一降的模式是对位于近距平行跑道两机之间的干扰相对较小的方式,即一条跑道只用于起飞,另一条跑道只用于降落,如图 1 所示,是现阶段国内近距平行跑道主要运用的模式。

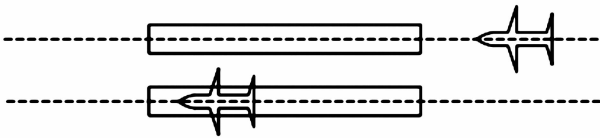


图 1 一起一降运行模式示意图

收稿日期:2022-11-06

作者简介:杨昌其(1974—),男,贵州思南人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,空管安全研究所所长,教授,交通运输工程硕士,研究方向为安全管理体系;蔡子牛(1997—),男,重庆人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,硕士研究生,研究方向为空中交通管理安全;冯筱晴(1998—),女,辽宁鞍山人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,硕士研究生,研究方向为空中交通管理安全;林灵(1997—),女,四川德阳人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,硕士研究生,研究方向为空中交通管理安全。

目前,中国规定近距平行跑道正确运行实施的法规文件只有《平行跑道同时仪表运行管理规定》^[8](123 号令)和《民用航空空中交通管理规则》^[9](CCAR-93TM-R5)。在跑道与中心线间距低于 760 m 的平行跑道工作时,航空器最低尾流间隔执行单跑道的最低尾流间隔标准。由于民航现有法规并没有对该运行模式有具体的间隔规定,而是采用单跑道的最低尾流间隔标准,这将会造成一定的交通容量的浪费。若各个管制单位按照自身经验进行管制工作,必然存在安全隐患。

2 立体起降安全碰撞风险模型

航空器之间空中不安全间隔风险主要是由于航空器之间的真实位置反应不精确,管制员未能有效及时调整航空器安全间隔导致的。在一起一降模式下的碰撞风险评估中,由于航空器侧向、纵向和垂直 3 个方向的误差彼此独立,故本文将从两机的立体角度评估安全间隔。本文基于传统的一起一降风险评估模型,增加垂直碰撞风险模型,构建出改进的立体起降安全碰撞模型。根据国际飞行程序设计准则,立体安全碰撞风险模型坐标如图 2 所示。建立立体碰撞模型的流程如图 3 所示。

针对立体起降安全碰撞风险,结合实际运行数据模拟仿真了立体起降安全碰撞风险下,离场航空器与进近复飞航空器(偏置角为 30°)的过程,假定航空器 j 进入起飞爬升阶段时,航空器 i 仍在减速下降阶段,之后航空器 i 经由匀速下降阶段至复飞点 MAPT,加速平飞阶段至起始爬升点 SOC,最后进

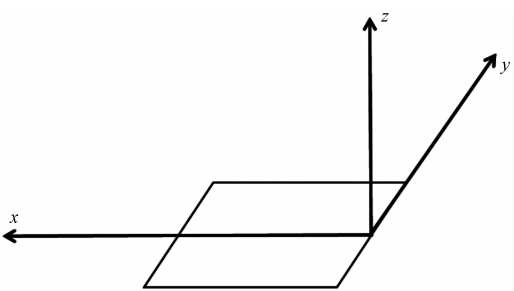


图 2 立体安全碰撞风险模型坐标

入复飞爬升阶段,如图 4 和图 5 所示。

图 4、图 5 中, H 为航空器 i 在安全间隔最低位置时的最大高度; α 为航空器 i 的下降梯度; β 为航空器 j 上升梯度; H_{MAPT} 为航空器 i 在复飞点最高高度; R 为航空器复飞半径; M 为进近过程中匀速下降段的长度; D 为两条跑道间距; a_{j1} 为航空器 j 处于起飞滑跑阶段加速度; a_{j2} 为航空器 j 处于起飞爬升阶段加速度; a_{i1} 为航空器 i 处于减速下降阶段加速度; a_{i2} 为航空器 i 处加速平飞和复飞爬升阶段加速度; v_{j1} 为航空器 j 处于起飞离地速度; v_{j2} 为航空器 j 处于安全起飞速度; v_{ij} 为航空器 i 进入减速下降阶段起始速度; v_{iy} 为航空器 i 进入匀速下降阶段起始速度; v_{i1} 为航空器 i 进入复飞转弯时的速度; v_{i2} 为航空器 i 复飞离场时的速度。

在一起一降模式中,制约跑道容量的主要因素是航空器之间的纵向间隔值。纵向间隔值由航空器的速度、机型大小、飞行员操作熟练程度、管制员指挥技巧、导航设备、航空器复飞的位置、跑道构型

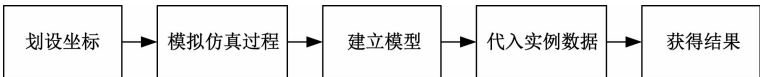


图 3 立体碰撞模型流程

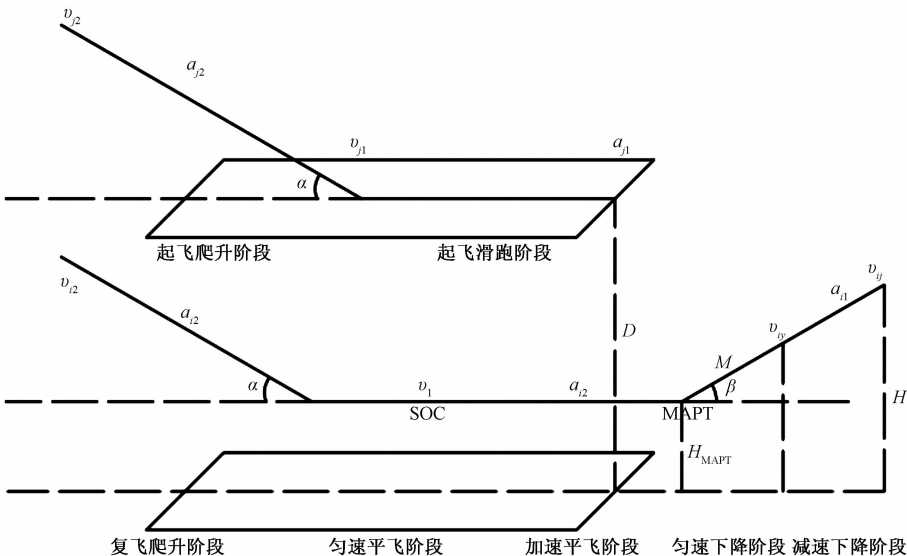


图 4 立体起降安全碰撞风险模型 1

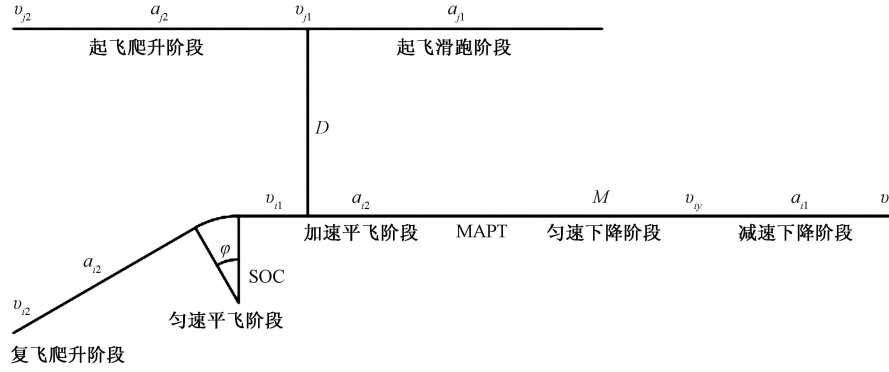


图 5 立体起降安全碰撞风险模型 2

等因素影响,可以用时间或距离表示。本文主要研究导航设备误差影响下的纵向间隔误差,设航空器 i 在 t 时刻的纵向位置误差为

$$D_i(t) \sim N(\mu_{iy}, \delta_{iy}^2) \quad (1)$$

式中: μ_{iy} 为航空器 i 偏离标称位置的平均长度; δ_{iy}^2 为航空器 i 偏离标称位置的方差。

航空器 i 在 t 时刻的实际位置为

$$L_{iy}(t) = d_{iy}(t) + D_i(t) \quad (2)$$

式中: $d_{iy}(t)$ 为航空器 i 在 t 时刻距离某参考点的纵向距离; $D_i(t)$ 为导航误差。

两架航空器在 t 时刻的真实纵向距离为

$$L(t) = L_{iy}(t) - L_{jy}(t) \quad (3)$$

此时,航空器 i 与航空器 j 在 t 时刻的真实纵向距离服从

$$L(t) \sim N[L_y(t) + \mu_{iy} - \mu_{jy}, \delta_{iy}^2 + \delta_{jy}^2] \quad (4)$$

平行跑道运行时刻 T 为

$$L_{\text{longitudinal}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} a_{j1} t^2 + M + \left(\frac{v_{iy}^2 - v_{jy}^2}{2a_{i1}} - v_{jy} t - \frac{1}{2} a_{i1} t^2 \right), & 0 \leq t \leq t_6 \\ \frac{v_{j1}^2}{2a_{j1}} + v_{j1}(t - t_6) + \frac{1}{2} a_{j2}(t - t_6)^2 + M + \left(\frac{v_{iy}^2 - v_{jy}^2}{2a_{i1}} - v_{jy} t - \frac{1}{2} a_{i1} t^2 \right), & t_6 \leq x \leq t_1 \\ \frac{v_{j1}^2}{2a_{j1}} + v_{j1}(t - t_6) + \frac{1}{2} a_{j2}(t - t_6)^2 + M - v_{iy}(t - t_1), & t_1 \leq x \leq t_1 + t_2 \\ \frac{v_{j1}^2}{2a_{j1}} + v_{j1}(t - t_6) + \frac{1}{2} a_{j2}(t - t_6)^2 - v_{iy}(t - t_1 - t_2) - \frac{1}{2} a_{i2}(t - t_1 - t_2)^2, & t_1 + t_2 \leq x \leq \sum_{i=1}^3 t_i \\ \frac{v_{j1}^2}{2a_{j1}} + v_{j1}(t - t_6) + \frac{1}{2} a_{j2}(t - t_6)^2 - X_{\text{soc}} - R \sin \frac{v_{i1}(t - t_1 - t_2 - t_3)}{R}, & \sum_{i=1}^3 t_i \leq x \leq \sum_{i=1}^4 t_i \\ \left| \frac{v_{j1}^2}{2a_{j1}} + v_{j1}(t - t_6) + \frac{1}{2} a_{j2}(t - t_6)^2 - X_{\text{soc}} - \frac{R}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \left[v_{i1} \left(t - \sum_{i=1}^4 t_i \right) - \frac{1}{2} a_{i2} \left(t - \sum_{i=1}^4 t_i \right)^2 \right] \right|, & \sum_{i=1}^4 t_i \leq x \leq \min \left(\sum_{i=1}^5 t_i, t_6 + t_7 \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $t_1 = \frac{v_{ij} - v_{iy}}{a_{i1}}$; $t_2 = \frac{M}{v_{iy}}$; $t_3 = \frac{v_{i1} - v_{iy}}{a_{i2}}$; $t_4 = \frac{\pi R}{6v_{i1}}$; $t_5 = \frac{v_{i2} - v_{i1}}{a_{i2}}$; $t_6 = \frac{v_{j1}}{a_{j1}}$; $t_7 = \frac{v_{j2} - v_{j1}}{a_{j2}}$ 。

$$T = \{T_m\} \quad (5)$$

式中: $m = \{0, 1, 2, \dots, 6\}$ 为飞行阶段的时刻, $m = 1$ 为航空器 i 处于减速下降阶段, $m = 2$ 为航空器 i 处于匀速下降阶段, $m = 3$ 为航空器 i 处于加速平飞阶段, $m = 4$ 为航空器 i 处于匀速平飞阶段, $m = 5$ 为航空器 i 处于复飞爬升阶段, $m = 6$ 为航空器 j 处于起飞滑跑阶段, $m = 7$ 为航空器 j 处于起飞爬升阶段。

则两机在 t 时刻的纵向安全碰撞风险 $P_{\text{longitudinal}}(t)$ 为

$$P_{\text{longitudinal}}(t) = \frac{\int_{-\lambda_y}^{\lambda_y} \exp \left[-\frac{y - L_{\text{longitudinal}}(t) + \mu_{iy} - \mu_{jy}}{2(\delta_{iy}^2 + \delta_{jy}^2)} \right] dy}{\sqrt{2\pi(\delta_{iy}^2 + \delta_{jy}^2)}}, \quad T_m < t_i < T_{m+1} \quad (6)$$

式中: $L_{\text{longitudinal}}(t)$ 为 t 时刻的纵向距离,公式为

两机在 t 时刻的侧向安全碰撞风险 $P_{\text{lateral}}(t)$ 为

$$P_{\text{lateral}}(t) = \frac{\int_{-\lambda_x}^{\lambda_x} \exp \left[-\frac{x - L_{\text{lateral}}(t) + \mu_{ix} - \mu_{jx}}{2(\delta_{ix}^2 + \delta_{jx}^2)} \right] dx}{\sqrt{2\pi(\delta_{ix}^2 + \delta_{jx}^2)}},$$

$$T_m < t_i < T_{m+1} \tag{8}$$

式中： $L_{\text{lateral}}(t)$ 为 t 时刻的侧向距离，公式为

$$L_{\text{lateral}}(t) = \begin{cases} D, 0 \leq t \leq \sum_{i=1}^3 t_i \\ D + R - R \cos \frac{v_{i1}(t - t_1 - t_2 - t_3)}{R}, \\ \sum_{i=1}^3 t_i \leq x \leq \sum_{i=1}^4 t_i \\ D + R - \frac{\sqrt{3}}{2}R + \frac{1}{2}\left[v_{i1}\left(t - \sum_{i=1}^4 t_i\right) + \frac{1}{2}a_{i2}\left(t - \sum_{i=1}^4 t_i\right)^2\right], \\ \sum_{i=1}^4 t_i \leq x \leq \min\left(\sum_{i=1}^5 t_i, t_6 + t_7\right) \end{cases} \tag{9}$$

两机在 t 时刻的垂直安全碰撞风险 $P_{\text{vertical}}(t)$ 为

$$P_{\text{vertical}}(t) = \frac{\int_{-\lambda_z}^{\lambda_z} \exp\left[-\frac{y - L_{\text{vertical}}(t) + \mu_{iz} - \mu_{jz}}{2(\delta_{iz}^2 + \delta_{jz}^2)}\right] dz}{\sqrt{2\pi(\delta_{iz}^2 + \delta_{jz}^2)}},$$
$$T_m < t_i < T_{m+1} \tag{10}$$

式中： $L_{\text{vertical}}(t)$ 为 t 时刻的垂直距离，公式为

$$l_{\text{vertical}}(t) = \begin{cases} H - (v_{ij} - a_{i1}t) \propto t, & 0 \leq t \leq t_6 \\ H - (v_{ij} - a_{i1}t) \propto t - [v_{j1} + a_{j2}(t - t_6)]\beta(t - t_6), & t_6 \leq t \leq t_1 \\ H - \int_0^{t_1} (v_{ij} - a_{i1}t) dt \propto t_1 - v_{iy} \propto (t - t_1) - [v_{j1} + a_{j2}(t - t_6)]\beta(t - t_6), & t_1 \leq x \leq t_1 + t_2 \\ H_{\text{MAPT}} - [v_{j1} + a_{j2}(t - t_6)]\beta(t - t_6), & t_1 + t_2 \leq x \leq \sum_{i=1}^4 t_i \\ H_{\text{MAPT}} + \left[v_{i1} + a_{i2}\left(t - \sum_{i=1}^4 t_i\right)\right]\beta\left(t - \sum_{i=1}^4 t_i\right) - [v_{j1} + a_{j2}(t - t_6)]\beta(t - t_6), & \sum_{i=1}^4 t_i \leq x \leq \min\left(\sum_{i=1}^5 t_i, t_6 + t_7\right) \end{cases} \tag{11}$$

式中： $H = H_{\text{MAPT}} + \int_0^{t_1} (v_{ij} - a_{i1}t) dt \propto t_1 + v_{iy} \propto (t_2 - t_1)$ ； λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为航空器机身长度和翼展宽度以及航空器高度。

总安全碰撞风险概率 R_{total} 可表示为

$$R_{\text{total}} = 2NP_{\text{lateral}}(t)P_{\text{longitudinal}}(t)P_{\text{vertical}}(t) \tag{12}$$

式中： N 为每条跑道每小时的容量。

3 案例计算

本文设定贵阳龙洞堡机场跑道由 01L/19R 与 01R/19L 两条跑道构成。01L/19R 与 01R/19L 之间跑道中心线相距 365 m，其中 01L 跑道仅允许离场，01R 跑道仅允许进场。采用使用率较大的空客 A333 为航空器，具体参数见表 1。

基于仿真参数，进行 150 次迭代，安全碰撞概率如图 6 所示。

表 1 模型仿真计算参数

参数	取值	参数	取值	参数	取值
$v_{iy}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	73.14	$a_{j1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	1.54	X_{soc}/m	2 308
$v_{i1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	98.89	$a_{j2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.96	σ_{ix}^2	218 492
$v_{i2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	118.32	α	0.053	σ_{iy}^2	153 250
$v_{j1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	39.42	β	0.053	σ_{iz}^2	25 000
$v_{j2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	122.4	M/m	2 070	λ_x	63.6
$a_{i1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	-0.1	H_{MAPT}/m	300	λ_y	60.3
$a_{i2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.96	D/m	365	λ_z	16.85

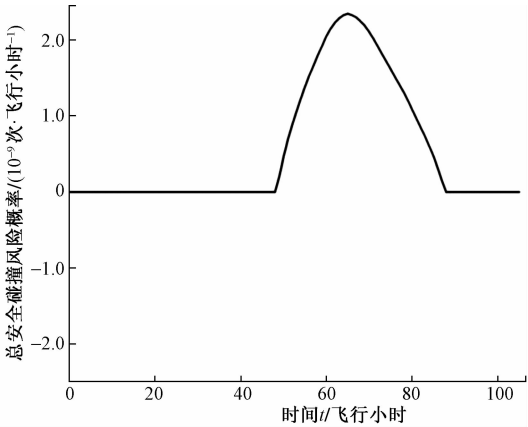


图 6 总安全碰撞风险概率仿真结果

由图 6 可知，飞机随着运动时间的增长以及飞行阶段的变化，安全碰撞风险随之变化。当航空器 i 减速下降阶段的初速度为 75.32 km/h 时，航空器 i 在加速平飞阶段时航空器 j 在起飞爬升阶段，此时的总安全碰撞风险概率最大，为 2.35×10^{-9} 次/飞行小时，满足 ICAO 发布的最低安全目标水平 5×10^{-9} 次/飞行小时。随后航空器 i 在匀速平飞阶段进行偏置 30° 时，碰撞风险概率开始逐渐减小。

4 结论

缩小近距平行跑道一起一降运行模式下两架航空器之间的安全间隔，是提升近距平行跑道运行效率和跑道容量的有效途径之一。本文基于传统的一起一降风险评估模型，增加垂直碰撞风险模

型,构建出改进的立体起降安全碰撞模型。相较于传统模型,降低了 37.5%安全碰撞风险概率,在实际运用中,管制员可以参考该模型做更加有意义的飞行前预案,这能有效降低安全碰撞风险。

该模型的安全间隔还应考虑其他安全影响因素,如人的因素、空域复杂度等。在以后的研究中应该全面考虑各个管制空域的复杂度和人的因素的关系等其他因素的影响。

参考文献

[1]

ROSSOW V, MEYN L. Guidelines for avoiding vortex wakes during use of closely-spaced parallel runways[C]// 26thAIAA Applied Aero dynamics Conference. Hawaii: AIAA,2012;6907.

[2]

LUNSFORD C R. Feasibility and availability of pairing departures from closely spaced parallel runways for wake

avoidance[C]//2009 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. Virginia: IEEE, 2009: 1-10.

[3]

朱代武,陈九昊,李晨鹿. 近距平行跑道目视进近条件下的碰撞风险分析[J]. 民航学报,2018,2(1):26-30.

[4]

康南,袁婕,胡杨,等. 近距平行跑道隔离运行的尾流安全性评估[J]. 安全与环境学报,2019,19(2):378-384.

[5]

谢春生,梁献匀,卢飞. 基于统计分布的近距平行跑道配对进近纵向碰撞风险评估[J]. 科学技术与工程,2021,21(10):4284-4288.

[6]

王维,赵芮. 相关运行模式下的近距平行跑道容量计算方法研究[J]. 科学技术与工程,2015,15(32):224-227.

[7]

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.

[8]

中国民用航空总局第 123 号令,平行跑道同时仪表运行管理规定[S]. 北京:中国民用航空总局,2004.

[9]

民用航空空中交通管理规则:CCAR-93TM-R5[S]. 北京:中国民用航空局,2017.

Research on Safety Collision Risk Model of Three-dimensional
Take-off and Landing of Short-distance Parallel Runway

YANG Changqi, CAI Ziniu, FENG Xiaoqing, LIN Ling

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

Abstract: Aiming at the problem of collision risk between approaching and departing aircraft, the real distance and measurement distance between the two aircraft generated by the probability of position error, is analyzed. The degree of collision risk between the two aircraft is evaluated, and the collision risk of the two aircraft in the one descent mode is analyzed from three dimensions. A three-dimensional collision risk model on position error is established in combination with the adverse environmental factors of the go-around scene. In this way, it is of great practical and theoretical significance to explore the influence of close parallel runways on the safety interval between take-off and departure and approach landing aircraft.

Keywords: positional error probability;one arrival and one departure mode;three-dimensional collision risk model;safety interval value