

8-13-2020

## Assessment Model of Conflict Probability at Airport Surface Intersection

Weijun Pan

1. *Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;;*

Xiaolin Luo

2. *Northwest Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Xi'an 710082, China;;*

Kang Rui

1. *Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;;*

Chenyu Huang

1. *Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Assessment Model of Conflict Probability at Airport Surface Intersection

### Abstract

**Abstract:** Based on aircraft characteristics, the assessment model of conflict probability at airport surface intersection was studied to ensure the safety of airport ground safety. *The engine jet effect distance was introduced to expand the scope of intersection conflict, describing the process of aircraft conflict. The model with the actual operation data was verified, and the speed interval's impact on the model was analyzed and discussed. In the view of three motion states of aircraft, this model analyzed the variations in conflict probability. When speed variation range is 0.5m/s, probability analysis of the conflict is more ideal, and can improve the accuracy of calculating the probability of conflict under the premise of objective reality.* The results show that: decelerating and holding avoidance measures can reduce the aircraft conflict probability effectively, thus defending the occurrence of accidents. This method can accurately calculate the conflict probability of aircraft, suitable for aircraft ground conflict alert.

### Keywords

air traffic management, airport surface intersection, speed range, conflict probability

### Authors

Weijun Pan, Xiaolin Luo, Kang Rui, Chenyu Huang, Zhenghong Xia, and Wenbin Qiu

### Recommended Citation

Pan Weijun, Luo Xiaolin, Kang Rui, Huang Chenyu, Xia Zhenghong, Qiu Wenbin. Assessment Model of Conflict Probability at Airport Surface Intersection[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(12): 2918-2924.

## 机场地面交叉口冲突概率估计模型

潘卫军<sup>1</sup>, 罗小林<sup>2</sup>, 康瑞<sup>1</sup>, 黄宸宇<sup>1</sup>, 夏正洪<sup>1</sup>, 邱文彬<sup>3</sup>

(1.中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307; 2.中国民用航空西北地区空中交通管理局, 陕西 西安 710082;  
3.中国民用航空西南地区空中交通管理局, 四川 成都 610202)

**摘要:** 为提高机场地面运行安全, 预防航空器产生滑行冲突, 研究了基于航空器特性的机场地面交叉口冲突概率并建立了相应的估计模型。该模型将发动机喷流影响有效距离因素引入到交叉口冲突范围中, 描述了航空器滑行冲突的过程。结合实际运行数据对模型进行了验证和数据分析, 探讨了速度区间对模型的影响。模型针对三种运动状态航空器滑行冲突概率的变化进行分析, 当速度变化区间为 0.5 m/s 时, 冲突概率分析较为理想, 能在贴近客观实际的前提下较好地提高冲突概率计算的准确性。仿真结果表明: 减速等待避让策略能够有效减小航空器冲突概率, 预防事故的发生; 该模型能实时计算航空器的冲突概率, 可用于航空器地面冲突预警。

**关键词:** 空中交通管理; 机场地面交叉口; 速度区间; 冲突概率

中图分类号: V355 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 12-2918-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201612006

### Assessment Model of Conflict Probability at Airport Surface Intersection

Pan Weijun<sup>1</sup>, Luo Xiaolin<sup>2</sup>, Kang Rui<sup>1</sup>, Huang Chenyu<sup>1</sup>, Xia Zhenghong<sup>1</sup>, Qiu Wenbin<sup>3</sup>

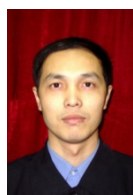
(1. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;  
2. Northwest Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Xi'an 710082, China;  
3. Southwest Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Chengdu 610202, China)

**Abstract:** Based on aircraft characteristics, the assessment model of conflict probability at airport surface intersection was studied to ensure the safety of airport ground safety. *The engine jet effect distance was introduced to expand the scope of intersection conflict, describing the process of aircraft conflict. The model with the actual operation data was verified, and the speed interval's impact on the model was analyzed and discussed. In the view of three motion states of aircraft, this model analyzed the variations in conflict probability. When speed variation range is 0.5m/s, probability analysis of the conflict is more ideal, and can improve the accuracy of calculating the probability of conflict under the premise of objective reality.* The results show that: decelerating and holding avoidance measures can reduce the aircraft conflict probability effectively, thus defending the occurrence of accidents. This method can accurately calculate the conflict probability of aircraft, suitable for aircraft ground conflict alert.

**Keywords:** air traffic management; airport surface intersection; speed range; conflict probability

## 引言

随着国民经济的快速增长, 航空运输企业规模



收稿日期: 2015-03-24 修回日期: 2015-09-02;  
基金项目: 国家自然科学基金(U1433126);  
作者简介: 潘卫军(1968-), 男, 湖北黄冈, 博士, 教授, 研究方向为空管仿真以及航路流量和安全管理;  
罗小林(1987-), 男, 四川广元, 硕士, 研究方向为空中交通管理。

不断扩大, 投入使用的航空器类型复杂、数量也不断增多, 由于跑道等机场地面基础设施不完善, 难以满足航空运输增长的需求。同时, 大中型机场机动区域越来越大, 滑行道和跑道越来越复杂, 交叉口越来越多, 飞机在场面危险区域活动时发生不安全事件屡见不鲜。在机场地面滑行道与滑行道的交叉口、跑道与联络道的交叉口, 这些区域由于航空

<http://www.china-simulation.com>

• 2918 •

器与车辆活动频繁, 发生冲突的可能性也相比其他区域要大得多。因此对机场地面交叉口进行冲突概率的研究, 从而控制不安全事件的发生, 将有效提高航空器地面运行的安全性。目前一些学者针对航空器的冲突探测与解脱的研究取得了丰硕的成果, 然而他们的研究主要集中于避免航空器空中接近<sup>[1-6]</sup>和机场地面滑行路径规划<sup>[7-8]</sup>方面; 另一些学者针对公路交通中车辆碰撞风险进行评估, 并设计了一些用以防止汽车碰撞的系统<sup>[9-12]</sup>, 具有很强的现实意义, 然而航空器在地面滑行与车辆运动存在着很大的差异性, 很难直接用于机场运行实际。鉴于此, 本文以碰撞风险评估为基础, 结合航空器在地面滑行的特性, 从机场机动区安全和航空器滑行冲突风险的概念出发, 考虑机场跑道滑行道、跑道系统的布局, 构建机场地面交叉口冲突概率估计模型, 然后以此模型对繁忙机场机动区范围内航空器滑行冲突概率进行估计, 并对仿真结果分析讨论。

## 1 航空器交叉口冲突过程分析

航空器在机场地面的运行冲突, 是指在机场地面运行过程中, 两架及其以上航空器, 同时经过一个滑行路段、交叉口或进入某一区域, 由此引起各架航空器无法有序、安全滑行的情形。而交叉口作为多个滑行单元的汇聚区域, 交通流量大, 航空器驾驶员和管制人员需要特别注意以避免发生交叉冲突。

按照航空器在地面的滑行方向, 可以将发生在四路十字形交叉口的航空器冲突归纳为 6 类, 它们是: (1) 两直行航空器冲突; (2) 直行航空器与左侧左转航空器冲突; (3) 直行航空器与右侧右转航空器冲突; (4) 左转航空器与右侧左转航空器冲突; (5) 直行航空器与对向右转航空器冲突; (6) 直行航空器与对向左转航空器冲突。这些冲突常常发生在高峰繁忙时段, 也可能是因为低能见度等恶劣天气而造成的, 涉及的航空器可能是由于航空飞行员错误操作或者是管制员指挥失误而引起的。

## 2 机场地面交叉口冲突概率模型建立

### 2.1 航空器冲突过程抽象描述

图 1 给出滑行道交叉口中最复杂的四路冲突情况, 航空器  $P_i$  与航空器  $P_j$  在此交叉口滑行的冲突区域主要有两部分组成, 即直接冲突区域和航空器发动机喷流影响有效区域。直接冲突区域, 如图 1 中灰色区域所示, 是指在通过交叉口过程中, 两架航空器空间位置的重叠区域, 设它的长为  $L$ , 宽为  $W$ , 则有  $L$  等于航空器  $P_i$  的翼展长度  $W_i$ ,  $W$  等于航空器  $P_j$  的翼展长度  $W_j$ 。航空器发动机喷流影响有效区域, 如图 1 中深灰色区域所示, 是指航空器处于该区域时, 其发动机喷流会影响在直接冲突区域内运行的航空器。它的影响距离主要由发动机类型和某一运行状态下发动机油门档位决定, 这里用  $D_{Blast}^i$ 、 $D_{Blast}^j$  表示航空器  $P_i$ 、 $P_j$  发动机喷流的影响距离。

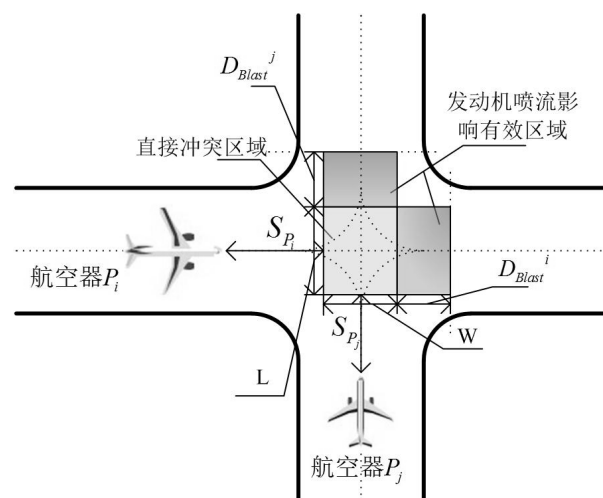


图 1 航空器冲突区域定义及过程抽象

### 2.2 航空器冲突概率计算模型构造

航空器  $P_i$  与  $P_j$  不发生冲突的条件为  $P_i$  到达冲突区域时  $P_j$  已经通过, 或者  $P_i$  离开冲突区域时  $P_j$  还未到达, 数学描述为:

$$\frac{S_{P_j} + L_j + W_i + D_{Blast}^j}{v_j} < \frac{S_{P_i}}{v_i} \quad (1)$$

$$\frac{S_{P_j}}{v_j} > \frac{S_{P_i} + L_i + W_j + D_{Blast}^i}{v_i} \quad (2)$$

公式(1)、(2)中  $S_{P_i}$ ,  $S_{P_j}$  表示航空器  $P_i$ ,  $P_j$  到冲突边缘的距离。只要满足上述关系之一, 则通过该区域的航空器就不会产生冲突; 如果都不满足, 则将产生冲突。则航空器冲突概率  $P(C)$  可以表示为:

$$P(C) = 1 - P \left[ \left( \frac{S_{P_j} + L_j + W_i + D_{\text{Blast}}^j}{v_j} < \frac{S_{P_i}}{v_i} \right) \cup \left( \frac{S_{P_i}}{v_i} > \frac{S_{P_j} + L_i + W_j + D_{\text{Blast}}^i}{v_j} \right) \right] \quad (3)$$

设  $\frac{S_{P_j} + L_j + W_i + D_{\text{Blast}}^j}{v_j} < \frac{S_{P_i}}{v_i}$  为事件 A,

$\frac{S_{P_i}}{v_i} > \frac{S_{P_j} + L_i + W_j + D_{\text{Blast}}^i}{v_j}$  为事件 B, 那么公式(3)可化为

$$P(C) = 1 - P(A \cup B) \quad (4)$$

从航空器不发生冲突条件的定义可知事件 A、B 不可能同时发生, 即它们互为互斥事件, 则公式(4)可表达为:

$$P(C) = 1 - P(A) - P(B) \quad (5)$$

公式(5)中:

$$P(A) = P \left( \frac{S_{P_j} + L_j + W_i + D_{\text{Blast}}^j}{v_j} < \frac{S_{P_i}}{v_i} \right) = P(v_i < k_1 v_j), \quad k_1 = \frac{S_{P_i}}{S_{P_j} + L_j + W_i + D_{\text{Blast}}^j} \quad (6)$$

$$P(B) = P \left( \frac{S_{P_i}}{v_i} > \frac{S_{P_j} + L_i + W_j + D_{\text{Blast}}^i}{v_j} \right) = P(v_i > k_2 v_j), \quad k_2 = \frac{S_{P_i} + L_i + W_j + D_{\text{Blast}}^i}{S_{P_j}} \quad (7)$$

则

$$P(v_i < k_1 v_j) = P \{ (v_i, v_j) \in G \} = \iint_G f(v_i, v_j) dx dy \quad (8)$$

假设  $v_i, v_j$  满足均匀分布, 则它们的密度函数为:

$$f(v_i) = \begin{cases} 1 / (v_{i\max} - v_{i\min}) & v_{i\min} \leq v_i \leq v_{i\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$g(v_j) = \begin{cases} 1 / (v_{j\max} - v_{j\min}) & v_{j\min} \leq v_j \leq v_{j\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

公式(8)可表达为:

$$P(v_i < k_1 v_j) = S_G \cdot f(v_i) \cdot \frac{1}{k_1} g(v_j) \quad (11)$$

利用上述求解过程可分别计算得到  $P(A)$ 、 $P(B)$  的值, 进而得到该状态下航空器冲突概率  $P(C)$  的值。

### 3 模型验证与数据分析

设下一时刻速度变化区间为  $v_{\text{span}}$ , 当前速度为  $v_{\text{now}}$ , 本文采用在  $[v_{\text{now}} - v_{\text{span}}, v_{\text{now}} + v_{\text{span}}]$  上的均匀分布对下一时刻机场地面航空器速度进行描述, 当  $v_{\text{now}} - v_{\text{span}} < 0$  时, 均匀分布的下限取值为 0。

#### 3.1 $v_{\text{span}}$ 对模型的影响

通过航空器在地面以匀速、匀加速和匀减速三种理想情况下的速度、位置变化仿真数据探讨  $v_{\text{span}}$  取值对航空器冲突概率计算模型的影响。

不同  $v_{\text{span}}$  值时, 向同一四路十字形交叉口匀速滑行的两架航空器其冲突概率变化如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 当  $v_{\text{span}}=0.5$  时, 匀速运动的航空器冲突概率随滑行时间不断增大, 最后增大到 1; 而图 2(b)~(d)中虽然  $v_{\text{span}}$  值各不相同, 但航空器冲突概率变化规律基本一致: 先逐渐增大, 中间突然变小, 随后继续增大到 1。这表明航空器在匀速运动状态下, 其冲突概率同描述下一时刻速度均匀分布的数学特征密切相关。

如图 2(e)所示为相同  $v_{\text{span}}$  下匀速运动航空器冲突概率(每秒)差绝对值的变化规律。当  $v_{\text{span}}=0.5$  时, 航空器冲突概率(每秒)差绝对值先大致保持不变, 随后逐渐减小, 最后减小至 0。而其他  $v_{\text{span}}$  值下, 航空器冲突概率(每秒)差绝对值变化规律基本一致: 先大致保持不变, 中间存在着剧烈的变化, 最后减小至 0;  $v_{\text{span}}$  值越大, 航空器冲突概率剧烈变化出现的时间越晚, 与该交叉口的距离也越短。这表明  $v_{\text{span}}=0.5$  的均匀分布对匀速运动航空器下一时刻速度的描述较为客观, 准确性较好。

不同  $v_{\text{span}}$  值时, 向同一四路十字形交叉口滑行

的两架航空器(一架航空器保持匀速滑行, 另一架航空器匀加速滑行), 它们的冲突概率变化见图 3。

从图 3 可以看出, 当  $v_{span}=0.5$  时, 匀加速运动航空器的冲突概率随滑行时间先增大, 后减小至 0; 而图 3(b)~(d)中虽然  $v_{span}$  值不同, 航空器冲突概率变化规律却基本一致: 先增大, 中间突然变小, 随后继续增大, 最后减小至 0。相同  $v_{span}$  下航空器冲突概率(每秒)差绝对值均存在着较大变化如图 3(f)所示, 当  $v_{span}=0.5$  时, 其变化较为平滑, 符合实际, 表明  $v_{span}=0.5$  的均匀分布对匀加速运动航空器下一时刻速度的描述较为客观、准确。

不同  $v_{span}$  值时, 向同一四路十字形交叉口滑行的两架航空器(一架航空器匀速滑行, 另一架航空器匀减速滑行), 它们的冲突概率变化如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 在不同  $v_{span}$  值下, 匀减速状

态航空器的冲突概率随时间先增大, 后减小至 0。其原因是随着速度的减小, 航空器到达冲突区域的时间差先增大后减小, 因此冲突概率也表现为先增大后减小; 当速度减小到 0, 航空器在滑行道上等待, 另一架航空器可以 0 冲突概率通过冲突区域。从图 4(f)中可以看出, 不同  $v_{span}$  值下, 航空器冲突概率(每秒)差绝对值均存在着较大变化。然而当  $v_{span}=0.5$  时, 其值最早变为 0, 说明对冲突概率计算的准确性最好。因此采用  $v_{span}=0.5$  的均匀分布对匀减速运动航空器下一时刻速度的描述优于其他  $v_{span}$  值。

综合以上三种运动状态航空器滑行冲突概率的变化分析, 得到结论: 当设置  $v_{span}=0.5$  时, 冲突概率分析较为理想, 能在贴近客观实际的前提下较好地提高冲突概率计算的准确性。

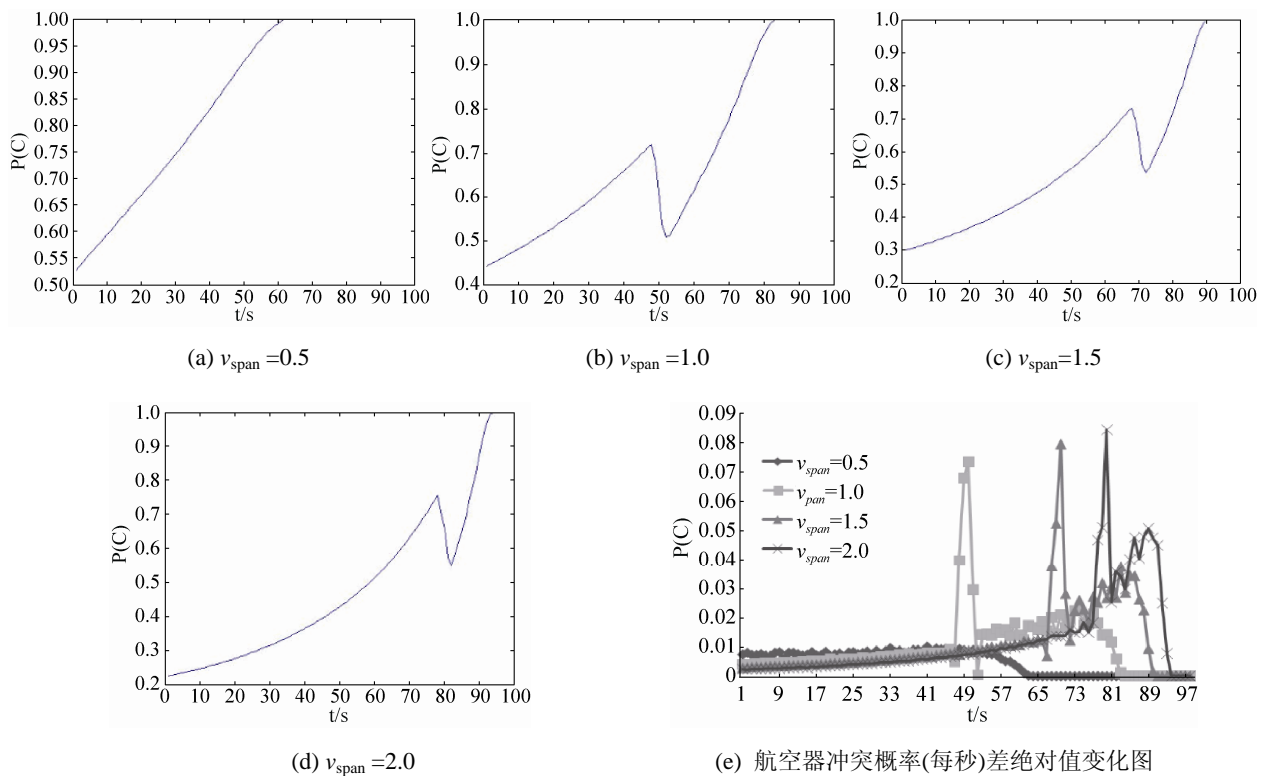


图 2 匀速运动航空器冲突概率变化图

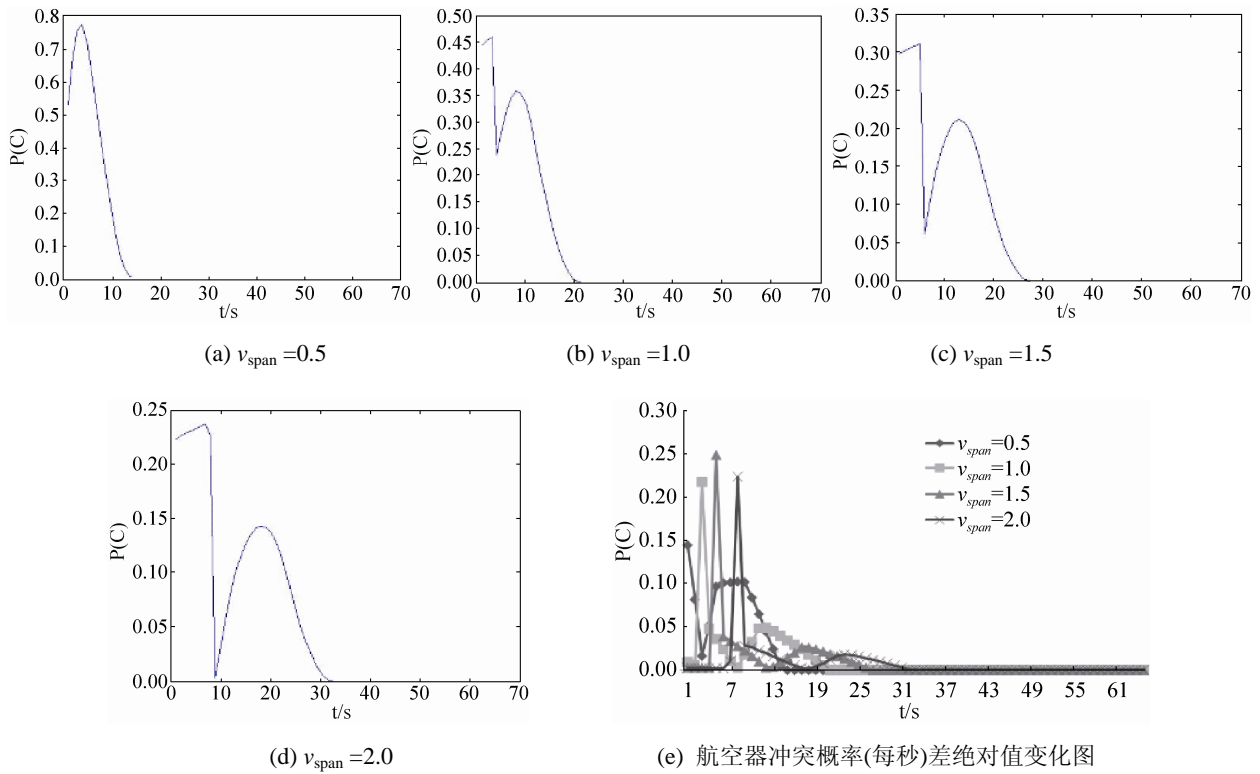


图 3 匀加速运动航空器冲突概率变化图

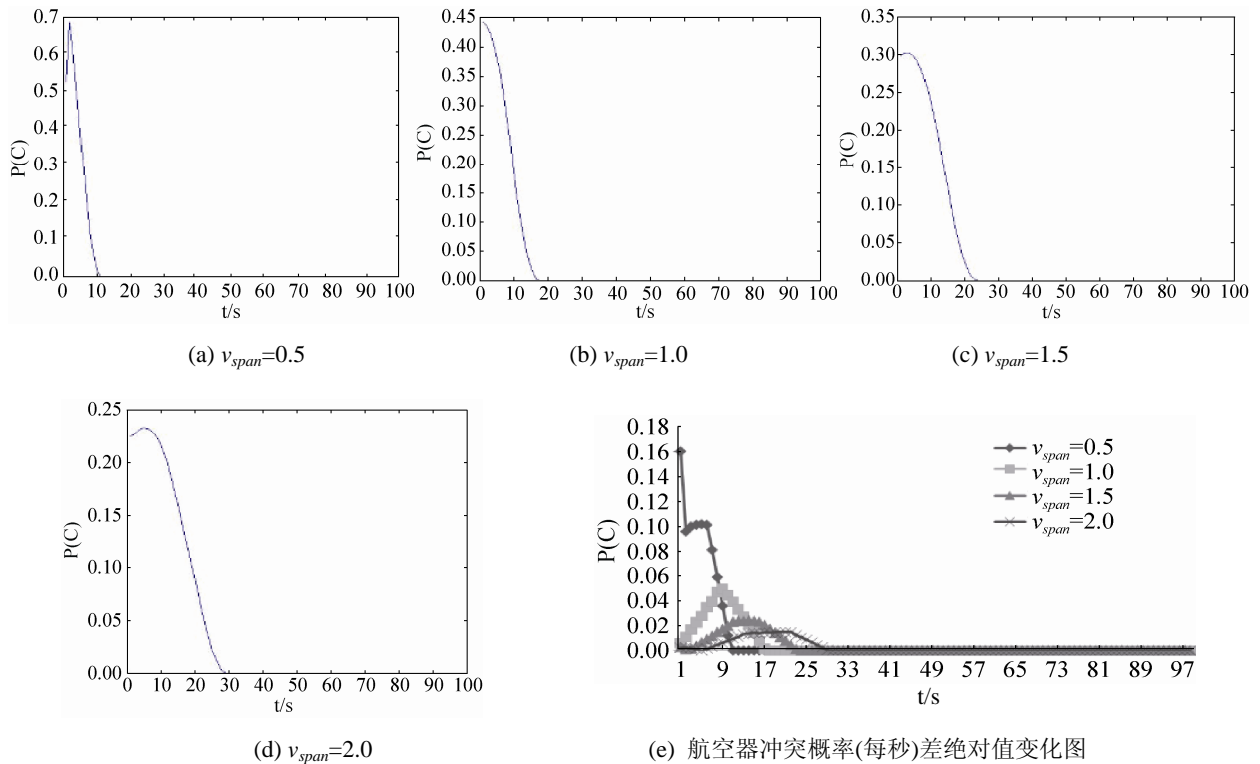
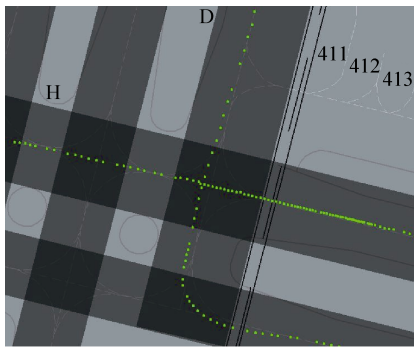


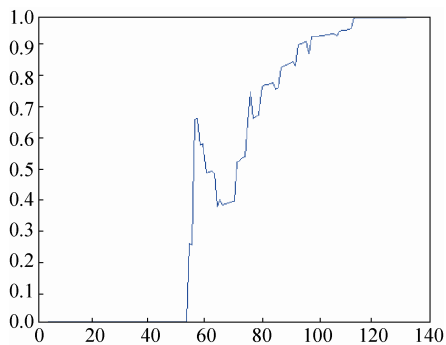
图 4 匀减速运动航空器冲突概率变化图

### 3.2 实际航空器运动状态的冲突概率分析

本文以中南某机场 2012-12-10 T 12:00-15:00 这 3 个小时的场面监视历史数据为对象,进行了实际航空器冲突概率的分析与验证,在滑行道 D 和 H 交叉口处两航空器(呼号为 CES2358 的航空器在滑行道 D 上由北向南滑行,呼号为 CSZ9649 的航空器在滑行道 H 上由西向东滑行)的冲突概率变化趋势如图 5、图 6 所示(为了消除变量随机性的影响,进行了多次冲突概率的计算,图 5、图 6 使用的是其平均值)。



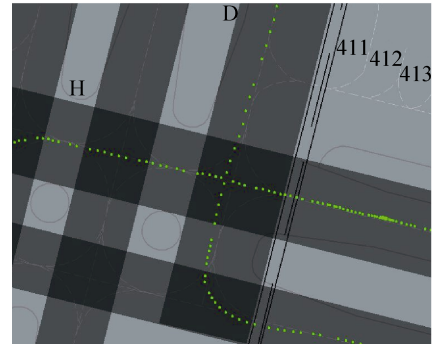
(a) 执行避让措施的航空器轨迹显示



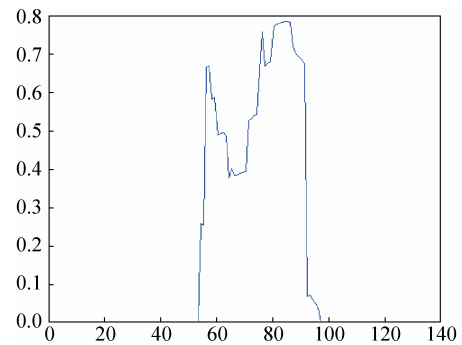
(b) 执行避让措施的航空器冲突概率变化图

图 5 未执行避让措施的航空器轨迹及冲突概率变化图

由图 5 可知,当航空器距离该区域较远时,它们产生冲突的概率为 0;随着距离的逐渐减小,冲突概率逐渐变大;最后两航空器按照正常滑行速度向该区域滑行时如图 5(a)所示,两航空器轨迹点较均匀分布在滑行道 D 和 H 上,冲突概率继续增大,最后增大至 1,它们通过该交叉口必然产生滑行冲突,威胁运行安全。



(a) 执行避让措施的航空器轨迹显示



(b) 执行避让措施的航空器冲突概率变化图

图 6 执行避让措施的航空器轨迹及冲突概率变化图

由图 6 可知,当航空器距离该区域较远时,其冲突概率为 0;随着时间的增加,距离较小时,冲突概率逐渐变大,并维持在一个较高的水平;当航空器 CSZ9649 减速原地等待后如图 6(a)所示,其大量轨迹点在距该区域 100 米滑行道 H 上叠加,说明在该位置航空器 CSZ9649 等待时间长,而航空器 CES2358 轨迹点在滑行道 D 上较少,说明 CES2358 滑行速度增大,以快速通过该交叉口。此时冲突概率急剧减小直至为 0,最后两航空器以 0 冲突概率安全通过该交叉口。

通过图 5 与图 6 对比可知,实施减速等待避让策略之前,冲突概率值逐渐变大,最后增大至 1;有效实施避让策略之后,冲突概率值急剧减小直至为 0。说明机场地面交叉口冲突概率能够客观地反应管制员采用的减速等待避让策略是否得到了有效地实施。航空器在地面滑行时,管制员基于冲突概率进行地面运行指挥,采用减速等待避让策略能够有效地降低机场地面交叉口冲突概率,保障航班正常运行。



## 4 结论

通过以上的分析可以得到以下结论:

1) 建立的机场地面交叉口冲突概率模型考虑了发动机喷流对航空器滑行的影响,能够用于计算航空器在机场地面交叉口区域产生的冲突概率。

2) 针对三种运动状态航空器滑行冲突概率的变化分析,当设置  $v_{span}=0.5$  时,冲突概率分析较为理想,能在贴近客观实际的前提下较好地提高冲突概率计算的准确性。

3) 机场地面交叉口冲突概率能够客观地反应管制员采用的减速等待避让策略是否得到了有效地实施。

4) 实际运行中对机场地面交叉口进行实时冲突概率计算,能够克服地面运行指挥个人主观性的不足,帮助管制员与航空器驾驶员预判地面冲突,采取避免措施,提高地面运行安全。

航空器在地面运行过程是一个涉及到人的因素、机场条件、气象条件以及航空器性能等因素的复杂过程,还有待进一步学习与研究。

## 参考文献:

- [1] James K Kuchar, Lee C Yang. A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods [J]. IEEE Transaction on Intelligent Transportation System, 2000, 1(4): 179-189.
- [2] B Carpenter, J Kuchar. Probability-Based Collision Alerting Logic For Closely-Spaced Parallel Approach [C]// Paper AIAA-97-0222, 35th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, USA, January 6-10, 1997. USA: AIAA, 1997.
- [3] M Prandini, J Lygeros, A Nilim, et al. A Probabilistic Framework for Aircraft Conflict Detection [C]// AIAA-99-4144, in Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. Portland, OR, USA, August 9-11, 1999. USA: AIAA, 1999: 1047-1057.
- [4] E Frazzoli, Z H Mao, J H Oh, et al. Resolution of conflicts involving many aircraft via semidefinite programming [J]. AIAA Journal of Guidance, Control,

- and Dynamics (S0731-5090), 2001, 24 (1): 79-86.
- [5] 王绍平, 崔德光. 空中交通控制的冲突探测算法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(10): 1368-1371.(Wang Shaoping, Cui Deguang. Conflict detection algorithm in air traffic control [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2004, 44(10): 1368-1371.)
- [6] 程先锋, 龚维强. ATC 系统中短期冲突探测方法的研究 [J]. 网络安全技术与应用, 2010, 12(9): 6-8.(Cheng Xianfeng, Gong Weiqiang. Research on short term conflict detection in ATC system [J]. Network Security Technology and Application, 2010, 12(9): 6-8.)
- [7] 朱新平, 汤新民, 韩松臣. A-SMGCS 滑行道冲突预测于避免控制 [J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(4): 504-510.(Zhu Xinping, Tang Xinmin, Han Songchen. Conflict Prediction and Avoidance Control for A-SMGCS Taxiway [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(4): 504-510.)
- [8] 汤新民, 安宏峰, 王翀. 面向冲突避免的航空器场面滑行引导方法 [J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(6): 1032-1039.(Tang Xinmin, An Hongfeng, Wang Chong. Conflict Avoidance Oriented Surface Aircraft Taxiing Guidance Method [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(6): 1032-1039.)
- [9] Kwon Oje, Lee Sang-Hyun, Kim Joon-Seok, et al. Collision prediction at intersection in sensor network environment [C]// ITSC 2006, Toronto, Canada. United States: IEEE Intelligent Transportation Systems Society, 2006: 982-987.
- [10] Jun-Seok Oh, Cheol Oh, Stephen G Ritchie, et al. Real-time estimation of accident likelihood for safety enhancement [J]. Journal of Transportation Engineering (S0733-947X), 2005, 131(5): 358-363.
- [11] 胡鸿豪, 李磊. 基于灰色模糊理论汽车防撞系统的仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2791-2799.(Hu Honghao, Li Lei. Simulation Study of Vehicle Collision Avoidance System Based on Grey and Fuzzy Theory [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(11): 2791-2799.)
- [12] 朱彤, 杨晓光, 白玉等. 道路交叉口车辆碰撞动态风险估计方法 [J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 96-101.(Zhu Tong, Yang Xiaoguang, Bai Yu, et al. Vehicle Collision Risk Assessment Method at Road Intersection [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(4): 96-101.)