

文章编号:1674-8190(2020)06-803-08

基于分时段与概率分布的滑行冲突预测研究

侯盼盼¹, 王梓旭^{2,3}

(1. 中国商飞上海飞机设计研究院 市场中心, 上海 201210)

(2. 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300)

(3. 北京大兴国际机场 运行管理部, 北京 102600)

摘要: 航空器在机场场面滑行时, 为避免航空器之间发生冲突, 需要在滑行前进行冲突预测。根据机场场面交通的实际情况, 在以航空器之间距离为冲突预测标准时, 提出分时段预测滑行冲突的计算方法; 以冲突概率为标准时, 假定航空器的实际位置服从二维正态分布, 计算任意时刻两航空器之前的冲突风险。结果表明: 分时段预测滑行冲突的计算方法能够解决航空器路由规划的优化性和实时性之间的矛盾。

关键词: 航空器滑行; 冲突预测; 分时段; 二维正态分布

中图分类号: V328.3; X949

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.06.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Taxi Conflict Prediction Algorithm Based on Time Bucket and Probability Distribution

HOU Panpan¹, WANG Zixu^{2,3}

(1. Marketing Center, COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

(2. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(3. Airport Operation Centre, Beijing Daxing International Airport, Beijing 102600, China)

Abstract: When the aircraft is taxiing in the taxiway, it is necessary to predict the conflict among aircraft to avoid the conflict. According to the practical condition of the airport taxiway traffic, a time bucket-based prediction calculation method is presented, taking the distance between aircraft as the conflict prediction standard. When the probability of conflict is taken as standard, it is assumed that the actual position of aircraft follows two-dimension normal distribution, the conflict probability between two aircraft at any given time is calculated. The results show that the time bucket-based prediction taxiing conflict calculation method can solve the contradiction between the optimization and real-time performance of aircraft route planning.

Key words: aircraft taxi; conflict prediction; time bucket-based; two-dimension normal distribution

收稿日期: 2019-12-23; 修回日期: 2020-03-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费(3122014D041, 3122014D042, 3122014C022)

通信作者: 侯盼盼, hpanpan1983@sina.com

引用格式: 侯盼盼, 王梓旭. 基于分时段与概率分布的滑行冲突预测研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(6): 803-810.

HOU Panpan, WANG Zixu. Taxi conflict prediction algorithm based on time bucket and probability distribution[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(6): 803-810. (in Chinese)

0 引言

随着我国经济的快速发展,民航的客运量和货运量都出现大幅的提高,机场变得越来越繁忙,因此对航空运行管理提出了更高的要求。目前航空运行管理面对诸多的压力,并且空中交通管理的瓶颈开始转移到机场方面。2009年召开的全国民航空管会议提出,民航空管系统要通过提高指挥能力,努力使每架航班空中飞行或地面滑行时间节约 3 min。提高滑行效率必须以保证滑行航空器的滑行安全为前提,因此建立完整高效的滑行冲突预测体系显得尤为重要。

国外对于机场的滑行冲突已经做了较为深入的研究,J. Krozel 等^[1]初步探讨了机场场面冲突预测与解脱的方法;J. K. Kuchar 等^[2]提出了场面冲突检测审查和对场面冲突进行分类建模的方法;YANG L C 等^[3]提出了一种新的复杂报警事件设计思路与方法,使系统能够在线交替监测,并根据计算的物理测量报警值进行决策;D. Anuja^[4]提出了一种模型,该模型基于神经网络进行航空器位置预测,从而减少运行冲突。

国内,Yu C^[5]对关键区域滑行冲突进行了分析,建立了基于网络的仿真模型,并依据仿真结果提出了解决航空器推出冲突和减少航班延误的方法;徐肖豪等^[6]引入了约束函数的概念,用以处理滑行道头对头冲突问题,对进一步的滑行研究具有重要的启发意义;尹嘉男等^[7]在解决登机门分配问

题时,把减少滑行冲突率作为一个目标来考虑;陈世林等^[8]在解决滑行费用问题上以避免滑行冲突作为条件;王艳军等^[9]在时间依赖最短路径算法的基础上,提出了一种回避冲突的动态滑行路径分配算法,用以解决机场场面航空器滑行路径分配问题;刘长有等^[10]在研究航空器机场地面滑行时刻优化时把所有航空器的滑行速度均相同作为假设条件,忽略了不同航空器之间的速度差别;牟德一等^[11]将滑行路径简化为图,在冲突预测时以两架航空器之间的时间间隔为冲突预测标准;丁建立等^[12]基于飞机滑行时的冲突约束和跑道资源的动态分配,采用改进蚁群协同算法与滑动窗口控制相结合的方法,对滑行道进行优化调度。

上述文献中的滑行冲突预测鲜有对滑行过程的考虑,而滑行是航空器的一个运动过程。航空器在机场场面运行所经历的空间环节包括跑道系统、滑行道系统、停机位系统和廊桥系统等。为了更全面描述过程中的冲突预测,本文利用概率论基本原理,考虑航空器滑行过程,以航空器间距离与冲突概率双重标准分时段对滑行冲突进行预测。本文介绍的场面滑行冲突不考虑车辆等其他物体,只考虑作为运动实体的航空器在场面的运行冲突。

1 相关符号说明

本文使用的相关符号说明如表 1 所示,由于模型参数较多,表中列出主要参数,模型中零星出现的参数在后面单独说明。

表 1 符号说明

Table 1 Symbol description

符 号	含 义	符 号	含 义
(x'_b, y'_b)	以航空器 A 为参照物,航空器 B 的位置	(v'_{xb}, v'_{yb})	以航空器 A 为参照物,航空器 B 的速度
d_{\min}	某滑行时间段内,两航空器之间的最小距离	d_{start}	某滑行时间段初始时刻,两航空器之间的距离
d_{end}	某滑行时间段结束时刻,两航空器之间的距离	$d_{\text{line_min}}$	航空器 A 到 B 运行轨迹及其延长线上的最小距离
D_{\min}	滑行过程中航空器距离的最小安全距离	R	航空器的外接圆半径
t_{\min}	某滑行时间段内,最小距离发生的时间点	$t_{\text{conf_start}}$	冲突开始时间
t_{i_start}	时间段 i 的起始时刻	t_{start}	某滑行时段的初始时刻
t_{end}	某滑行时段的结束时刻	$t_{\text{line_min}}$	$d_{\text{line_min}}$ 出现时对应的时刻
t_{\min}	d_{\min} 出现时对应的时刻	v'_{k_xb}	在时间段 k 起始时刻航空器 x 方向上的速度
v'_{k_yb}	在时间段 k 起始时刻航空器 y 方向上的速度	(x_{\min}, y_{\min})	最小距离点 B 的相对坐标
$(x_{\text{line_min}}, y_{\text{line_min}})$	d_{\min} 出现时 B 对应的位置	$(x_{\text{conf_start}}, y_{\text{conf_start}})$	冲突开始时 B 的相对坐标
$(\bar{x}_A, \bar{y}_A), (\bar{x}_B, \bar{y}_B)$	任意时刻两航空器的位置	$\theta(t)$	任意时刻两航空器航向夹角
$\sigma_{K_a}^0(t)$	沿航空器 K(K 为 A, B) 滑行方向的纵向方差	$\sigma_{K_c}^0(t)$	航空器 K(K 为 A, B) 滑行方向的侧向方差
P_{\max}	某一滑行时段的最大碰撞风险概率	P_{std}	滑行过程中航空器距离的最大冲突风险概率
$P_K(x, y, t)$	航空器 K(K 为 A, B) 在 t 时刻位于 (x, y) 的概率		

2 理想状态下的分时段冲突预测

在理想状态下,不考虑不确定运行误差以及突发情况,本文采用分段函数来描述航空器滑行时间与位置。

根据两航空器所经过的滑行路径交叉点情况,按照航空器到达交叉点时间的先后对两航空器的滑行路径重新划分为数目相同的多个滑行时间段,使得在每一个滑行时间段内航空器都保持方向和速度不变。两架航空器的滑行路径分别为 T_1, T_3, T_4, T_5 和 T_2, T_4, T_5 , 如图 1 所示。假设航空器 A 到达各点的时间为 $t_{a1}, t_{a2}, t_{a3}, t_{a4}$, 航空器 B 到达各点的时间为 t_{b1}, t_{b2}, t_{b3} , 划分滑行时间段后,整体时间段则被分成六段,由 $t_{a1}, t_{a2}, t_{a3}, t_{a4}$ 和 t_{b1}, t_{b2}, t_{b3} 7 个时刻按照大小排序分割形成。

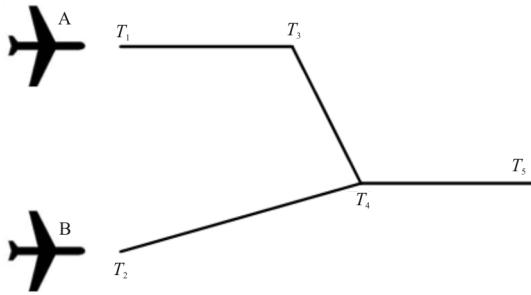


图 1 航空器滑行路径

Fig. 1 Taxi routes of aircrafts

$$d_{\min} = \begin{cases} d_{\text{line_min}} & (t_{\text{line_min}} \in [t_{\text{start}}, t_{\text{end}}]) \\ \min(\sqrt{x_b'^2 + y_b'^2}, \sqrt{(x_b' + v_{xb}'t)^2 + (y_b' + v_{yb}'t)^2}) & (t_{\text{line_min}} \notin [t_{\text{start}}, t_{\text{end}}]) \end{cases} \quad (6)$$

航空器 A、B 间距离最小的时刻 t_{\min} 为

$$t_{\min} = \begin{cases} t_{\text{line_min}} & (t_{\text{line_min}} \in [t_{\text{start}}, t_{\text{end}}]) \\ t_{\text{start}} & (t_{\text{line_min}} < t_{\text{start}}) \\ t_{\text{end}} & (t_{\text{line_min}} > t_{\text{end}}) \end{cases} \quad (7)$$

如果 $d_{\min} > D_{\min}$ 能够满足空间间隔标准,继续下一滑行时间段冲突预测;否则计算出最小距离发生的时间点 t_{\min} , 冲突开始时间 $t_{\text{conf_start}}$, 以及两航空器出现最小距离时,航空器 B 相对航空器 A 的坐标 (x_{\min}, y_{\min}) 。

在航空器 B 距离 A 的最近点 $(x_{\text{line_min}}, y_{\text{line_min}})$, B 的运动方向与 B 相对 A 位置向量垂直, 如图 2 所示。

滑行冲突通常分为三种情况,对头冲突、交叉冲突、同向冲突^[13]。这三种冲突都是指航空器之间的距离达到了某一标准,本文通过计算航空器之间的距离来确定航空器之间是否存在冲突。假设在某一滑行时间段内,两架航空器 A、B 的位置分别为 $(x_a, y_a), (x_b, y_b)$, 速度分别为 $(v_{xa}, v_{ya}), (v_{xb}, v_{yb})$, 滑行时段时长为 t , 起始时间 t_{start} , 结束时间 t_{end} 。以航空器 A 为参照物,则航空器 B 的相对位置 (x'_b, y'_b) 和相对速度 (v'_{xb}, v'_{yb}) 可表示为

$$(x'_b, y'_b) = -(x_a, y_a) + (x_b, y_b) \quad (1)$$

$$(v'_{xb}, v'_{yb}) = -(v_{xa}, v_{ya}) + (v_{xb}, v_{yb}) \quad (2)$$

那么,对于任意时刻 t , 航空器 B 与 A 之间的相对位置可表示为

$$(x'_b, y'_b) = \sum_{k=1}^{i-1} (v'_{k_xb}, v'_{k_yb})t_k + (v'_{i_xb}, v'_{i_yb})(t - t_{i_start}) \quad (3)$$

式中: t_k 为第 k 时段。

则,航空器 A 与航空器 B 所滑行路径的最小距离 $d_{\text{line_min}}$, 对应时刻 $t_{\text{line_min}}$ 可表示为

$$d_{\text{line_min}} = \frac{|v'_{xb}y'_b - v'_{yb}x'_b|}{\sqrt{v'^2_{xb} + v'^2_{yb}}} \quad (4)$$

$$t_{\text{line_min}} = \frac{v'_{yb}(v'_{yb}x'_b - v'_{xb}y'_b) - x'_b}{v'_{xb}} \quad (5)$$

航空器 A 与 B 最小距离 d_{\min} 可以表示为

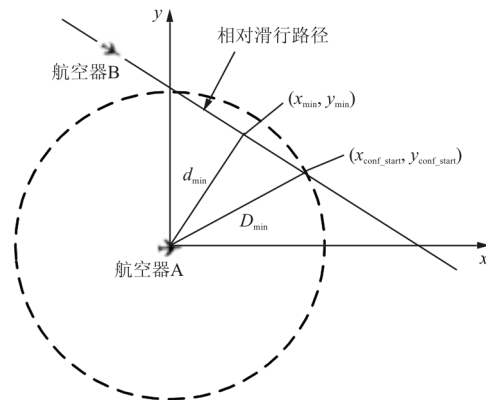


图 2 某滑行时段 A、B 航空器位置示意图

Fig. 2 Position of A and B aircrafts at a certain time

因此有下述关系式成立:

$$\begin{cases} y_{\text{line_min}} - y'_b = \frac{v'_{yb}}{v'_{xb}}(x_{\text{line_min}} - x'_b) \\ v'_{xb}x_{\text{line_min}} + v'_{yb}x_{\text{line_min}} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

求解可得:

$$x_{\text{line_min}} = \frac{v'_{yb}(v'_{yb}x'_b - v'_{xb}y'_b)}{v'^2_{xb} + v'^2_{yb}} \quad (9)$$

$$y_{\text{line_min}} = \frac{-v'_{xb}(v'_{yb}x'_b - v'_{xb}y'_b)}{v'^2_{xb} + v'^2_{yb}} \quad (10)$$

那么,冲突开始时间 $t_{\text{line_begin}}$ 为

$$t_{\text{line_begin}} = t_{\text{line_min}} - \frac{\sqrt{x'^2_{\text{line_min}} + y'^2_{\text{line_min}} - D^2_{\text{min}}}}{v'^2_{xb} + v'^2_{yb}} \quad (11)$$

因此:

$$t_{\text{conf_start}} = \max(t_{\text{start}}, t_{\text{line_begin}}) \quad (12)$$

那么,两航空器出现最小距离时,航空器 B 相对航空器 A 的坐标 $(x_{\text{min}}, y_{\text{min}})$ 可以表示为

$$x_{\text{min}} = \begin{cases} x_b - x_a & (t_{\text{conf_start}} = t_{\text{start}}) \\ \frac{v'_{yb}(v'_{yb}x'_b - v'_{xb}y'_b)}{v'^2_{xb} + v'^2_{yb}} & (t_{\text{conf_start}} = t_{\text{line_begin}}) \end{cases} \quad (13)$$

$$y_{\text{min}} = \begin{cases} y_b - y_a & (t_{\text{conf_start}} = t_{\text{start}}) \\ \frac{-v'_{xb}(v'_{yb}x'_b - v'_{xb}y'_b)}{v'^2_{xb} + v'^2_{yb}} & (t_{\text{conf_start}} = t_{\text{line_begin}}) \end{cases} \quad (14)$$

求解完成后即可根据 $d_{\text{min}}, t_{\text{min}}, t_{\text{conf_start}}$ 和 $(x_{\text{min}}, y_{\text{min}})$ 进行冲突预测,结合预测结果辅助生成冲突报告。

3 考虑不确定因素下基于概率分布的冲突预测

第 2 节对理想状态下的航空器滑行冲突进行了预测,但是航空器在机场运行过程中很难按照理想状态运行。受航空器仪表指示误差、飞行员操作水平等各种不确定因素的影响,实际运行过程中航空器之间的冲突概率与理想状态下的预测结果存在一定的差异,为了更加贴近机场实际运行情况,在考虑随机误差的情况下,基于二维正态分布对滑行冲突进行预测。

通过理想状态下分时段冲突预测方法可以得

到任意时刻两航空器的位置 $(\bar{x}_A, \bar{y}_A), (\bar{x}_B, \bar{y}_B)$ 和任意时刻两航空器航向夹角 $\theta(t)$ 。

航空器滑行误差可以看作是由许多微小而独立的随机变量组成, R. Paielli 和 H. Erzberger 经过实际飞行数据研究得出,航空器在空中飞行时位置预测误差沿着航向、侧向和垂直方向是相互独立的^[14]。纵向方差与 t^2 成正比^[15],侧向方差随飞行时间的增大而趋于某一个饱和值。其整体误差满足均值为零的正态随机分布,因此在场面运行时,借鉴上述结论,可将航空器的位置分布分为两个正交的水平分量:

(1) 沿着航空器滑行的方向的纵向分量,其纵向方差 $\sigma_a^2(t)$ 随着滑行时间的增大而增大。

$$\sigma_a^2(t) = r_a^2 t^2 \quad (15)$$

式中: r_a 为纵向、侧向方差的增长率,与设备精度、飞行员操作水平等有关。

(2) 与航空器滑行方向垂直的侧向分量,其侧向方差 $\sigma_c^2(t)$ 随着滑行时间的增大而趋于某一个饱和值 $\bar{\sigma}_c^2$ 。

$$\sigma_c^2(t) = \min\{r_c^2 t^2, \bar{\sigma}_c^2\} \quad (16)$$

式中: r_c 为侧向方差的增长率,与设备精度、飞行员操作水平等有关。

对某一滑行时段进行研究,将该时段以一定步长逐点计算冲突概率,求出最大冲突概率 P_{max} 。当 $P_{\text{max}} < P_{\text{std}}$ 时,满足冲突风险标准要求;当 $P_{\text{max}} \geq P_{\text{std}}$ 时,采用二分法求出当碰撞风险等于 P_{std} 时,两航空器之间的距离及对应的时间。

设航空器 A 在 t 时刻位于 (x, y) 的概率为 $P_A(x, y, t)$, 航空器 B 在 t 时刻位于 (x, y) 的概率为 $P_B(x, y, t)$ 。

那么, $P_A(x, y, t)$ 为

$$P_A(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{[x_A - \bar{x}_A(t)]^2}{2\sigma_{A_x}^2(t)}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{[y_A - \bar{y}_A(t)]^2}{2\sigma_{A_y}^2(t)}} \quad (17)$$

在计算航空器 B 出现在 (x, y) 点的概率时,需要进行坐标系转换,转换后坐标原点为 B' , 在 t 时刻航空器 A 与 B 所在坐标系 x 轴的夹角为 $\theta(t)$, 由航空器之间最小距离计算的过程可以得出点 (x, y) 转换坐标系后的坐标 (x_B, y_B) 为

$$(x_B, y_B) = (x, y) \times \begin{bmatrix} \cos\theta(t), -\sin\theta(t) \\ \sin\theta(t), \cos\theta(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

此时, $P_B(x, y, t)$ 可以表示为

$$P_B(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{[x_B - \bar{x}_B(t)]^2}{2\sigma_{Bx}^2(t)}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{[y_B - \bar{y}_B(t)]^2}{2\sigma_{By}^2(t)}} \quad (19)$$

则两者的滑行冲突风险可表示为

$$P_{AB}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [P_B(x_B, y_B, t) \cdot \iint_S P_A(x_A, y_A, t) dS] dx_B dy_B \quad (20)$$

其中 S 需满足以下条件:

$$\sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} < 2R$$

航空器碰撞风险图如图 3 所示, A, B 为航空器的平均位置, A', B' 为航空器可能出现的实际网格位置。以航空器的几何中心为中心, 一定长度 R 作为航空器的外接半径, 绘制保护区, 如果两个保

护区有重叠部分, 则视为有碰撞冲突, 冲突概率为两航空器出现在各自网格位置概率的乘积。将所有两两网格的冲突概率叠加后, 即为两航空器的冲突概率。整体预测流程如图 4 所示。

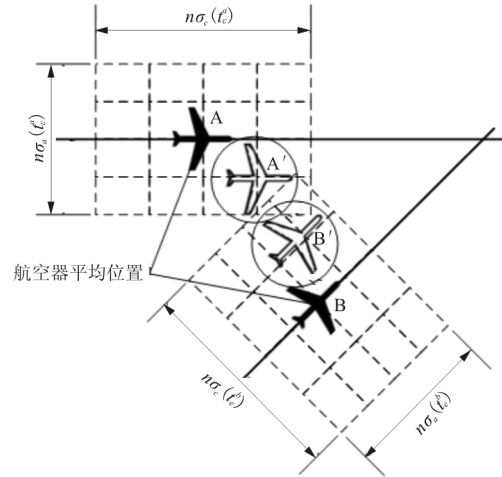


图 3 航空器碰撞风险图

Fig. 3 The conflict probability between two aircrafts

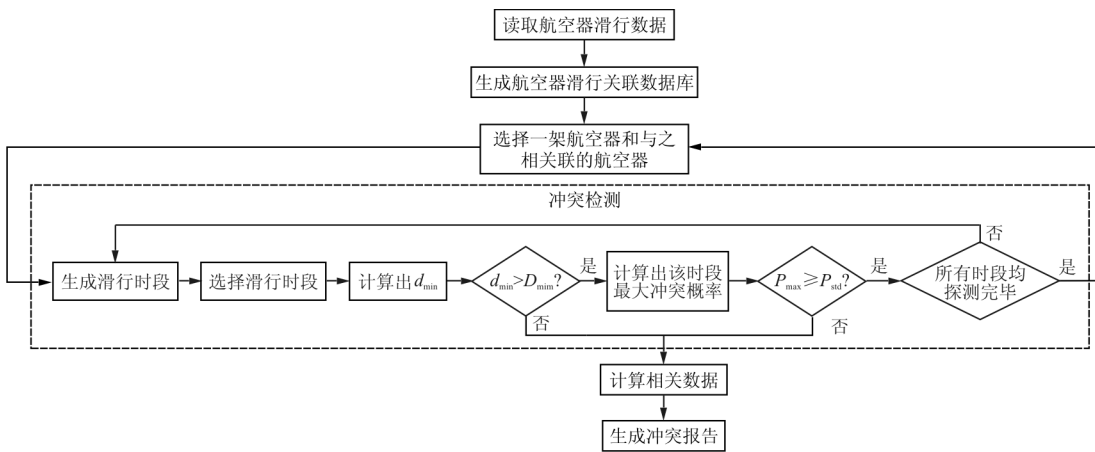


图 4 冲突预测流程示意图

Fig. 4 Procedure of conflict prediction

4 算例分析

航空器 A, B 分别沿着 $T_1, T_2, T_6, T_7, T_8, T_9$ 以及 T_3, T_4, T_5, T_8, T_9 路径滑行如图 5 所示。各段滑行路径长度已经标出。两航空器速度 $V_A = 8 \text{ m/s}, V_B = 7 \text{ m/s}$ 。 $t_{AT_1} = 0 \text{ s}$ 时刻 A 从 T_1 由静止出发, $t_{BT_2} = 45 \text{ s}$ 时刻 B 从 T_2 由静止出发。航空器 A, B 按照图 5 所示的情况运行, 根据本文所建立数学模型, 应用 Matlab 编程仿真计算, 得到航

空器运行风险分析图, 如图 6 所示。

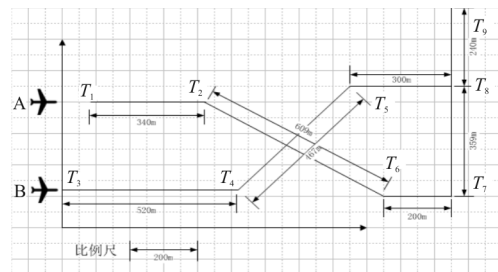
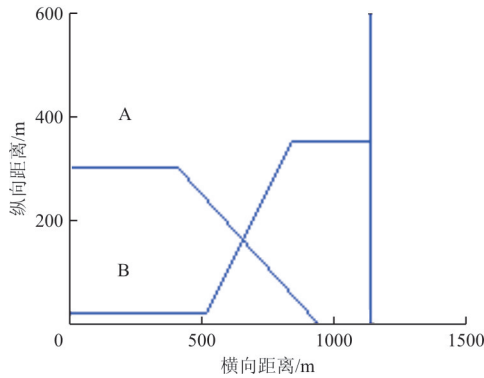
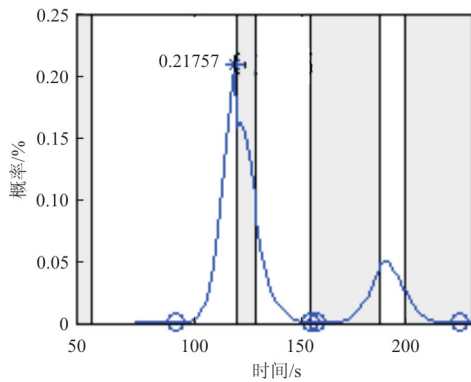


图 5 算例滑行路径示意图

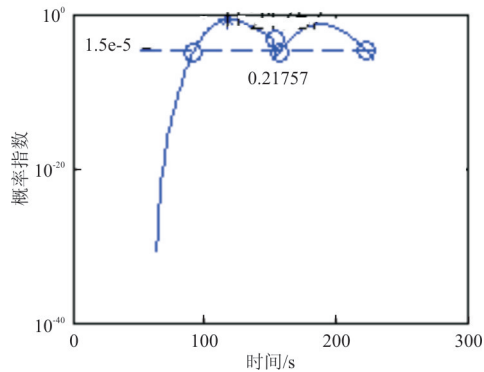
Fig. 5 The sketch map of taxi routes



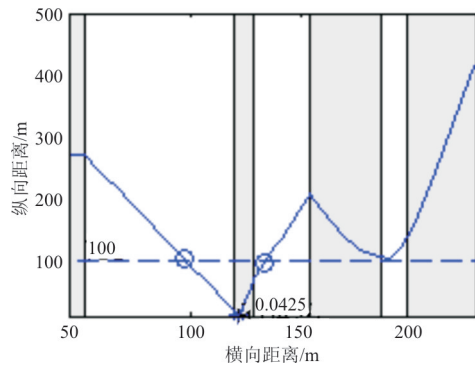
(a) 滑行路径



(b) 冲突概率随时间变化



(c) 冲突概率随时间变化(指数表示)



(d) 航空器之间的距离

从图 6 可以看出：

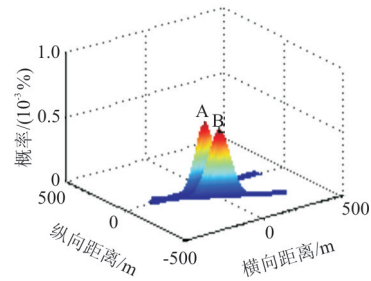
(1) 如果以 $D_{\min} = 100 \text{ m}$ 为冲突预测标准, 由 d_{\min} 可判断出, 两航空器在滑行时间段 2、3、4 存在距离小于 100 m 的时刻, 需要加以规避冲突, 在其他时间段则满足冲突预测标准。

两航空器在 121 s 的时候距离达到最小值 8.6 m, 即为图 6(d) 星号所标示位置。

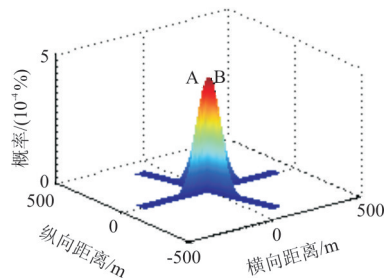
(2) 如果以 $P_{\text{std}} = 1.5 \times 10^{-5}$ 为标准, 如图 6(c) 所示, 在 92 s 之后, 航空器之间的风险冲突几乎一直大于 P_{std} 。因此在滑行时间段 2~7, 都需要加以规避冲突。

(3) 综合上述两项结论, 航空器在 92 s 之后一直存在风险冲突, 需要规避冲突。

出现上述两种不同结论原因在于: 若以 D_{\min} 为理想状态下的冲突预测标准, 不考虑运行过程中不确定因素导致的位置误差, 以 P_{std} 为标准, 由于航空器在运行过程中纵向方差与 t^2 成线性关系, 侧向方差也随着时间不断增大, 并逐渐趋近于饱和值 σ_c^2 。因此, 到后续的滑行时间段, 虽然两航空器的距离 $|(\bar{x}_A, \bar{y}_A) - (\bar{x}_B, \bar{y}_B)|$ 增大, 但由于各自纵向侧向方差的增大, 由 $\pm n\sigma_a(t)$ 和 $\pm n\sigma_c(t)$ 围成的矩形随着时间变化不断增大, 导致了冲突风险依然处于较高水平, 如图 7~图 8 所示。



(a) $t = 90 \text{ s}$



(b) $t = 120 \text{ s}$

图 6 航空器运行风险分析图

Fig. 6 Conflict analysis of aircraft taxiing

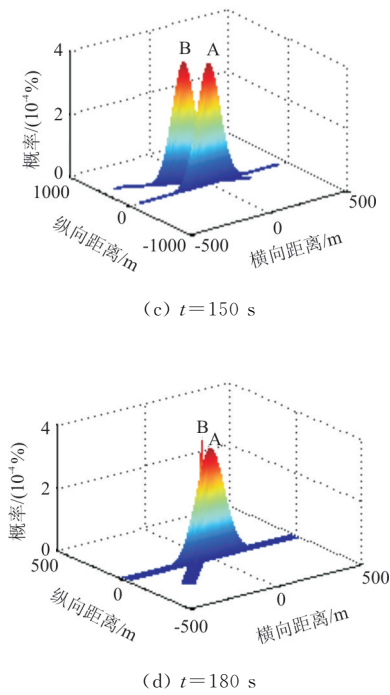


图 7 不同时刻航空器位置概率分布

Fig. 7 The probability of aircrafts' position at different times

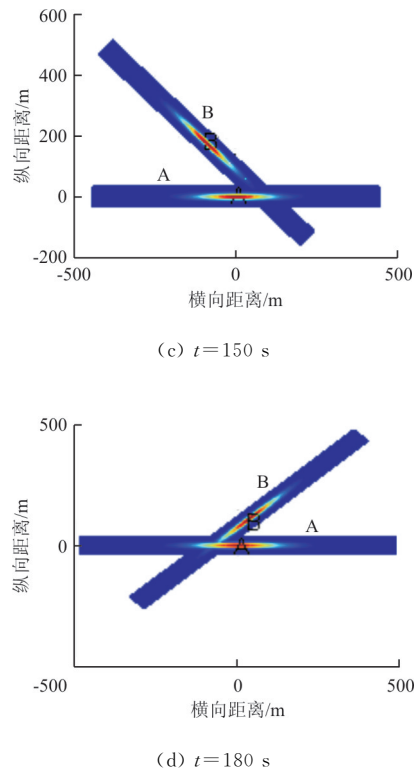
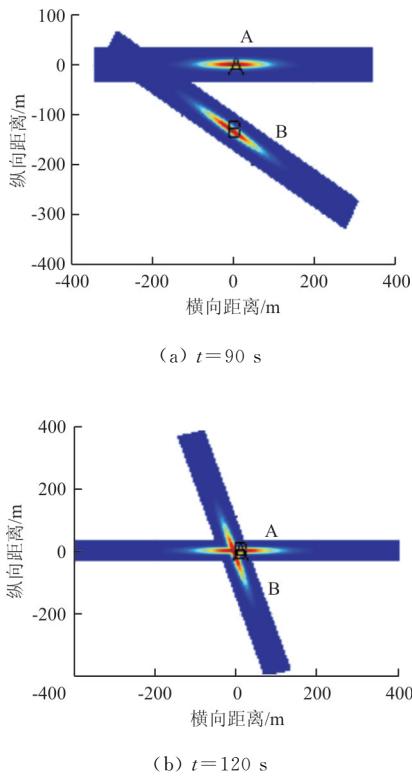


图 8 不同时刻航空器位置概率分布俯视图

Fig. 8 The probability of aircrafts' position at different times from vertical view



5 结 论

(1) 相对于将连续时间离散化的方法,采用基于分段函数的计算方法能够有效降低计算量,较好地解决了航空器路由规划的优化性和实时性之间的矛盾。

(2) 在滑行中存在不确定因素的情况下,需要考虑航空器侧向和纵向方差对滑行冲突的影响以及航空器位置误差随时间的累积效应。

(3) 在滑行冲突预测过程中应同时以最小安全距离和最大冲突风险概率为标准,确保航空器的滑行安全。实际运行中可与机场监视数据结合使用,作为冲突探测的理论模型,或通过仿真软件等技术手段进行可视化监控。

参考文献

[1] KROZEL J, PETERS M, BILIMORIA K D, et al. System

- performance characteristics of centralized and decentralized air traffic separation strategies[C]// 4th USA/Europe Air Traffic R&D Seminar. [S.l.]: AIAA, 2001: 1-7.
- [2] KUCHAR J K, YANG L C. A review of conflict detection and resolution modeling methods[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2000, 1(4): 179-189.
- [3] YANG L C, KUCHAR J K. Performance metric alerting: a new design approach for complex alerting problems[J]. IEEE Transactions on Man and Cybernetics, 2002, 30(4): 123-134.
- [4] ANUJA D. Aircraft position prediction using neural networks[D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [5] YU C. Solving push-out conflicts in apron taxiways of airports by a network-based simulation[J]. Computers, 1998, 34(2): 351-369.
- [6] 徐肖豪, 藏志恒. 基于 MILP 的飞机滑行排序的优化[J]. 交通与计算机, 2007, 25(2): 142-145.
XU Xiaohao, ZANG Zhiheng. Optimization for aircraft taxi scheduling based on MILP[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2007, 25(2): 142-145. (in Chinese)
- [7] 尹嘉男, 胡明华, 赵征. 多跑道机场停机位分配仿真模型及算法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 71-76.
YIN Jianan, HU Minghua, ZHAO Zheng. Simulation model and algorithm of multi-runway airport gate assignment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 71-76. (in Chinese)
- [8] 陈世林, 胡明华, 张洪海. SMS 中基于冲突探测的滑行轨迹预测算法研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2008, 45(6): 1357-1361.
CHEN Shilin, HU Minghua, ZHANG Honghai. Research on taxi trajectory prediction based on conflict detection in surface management system[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2008, 45(6): 1357-1361. (in Chinese)
- [9] 王艳军, 胡明华, 苏炜. 基于冲突回避的动态滑行路径算法[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(6): 933-939.
WANG Yanjun, HU Minghua, SU Wei. Dynamic taxiway routing algorithm based on conflict avoidance[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(6): 933-939. (in Chinese)
- [10] 刘长有, 丛晓东. 基于遗传算法的飞机滑行路径优化[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(3): 6-8.
LIU Changyou, CONG Xiaodong. Taxing optimization for aircraft based on genetic algorithm[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2009, 27(3): 6-8. (in Chinese)
- [11] 牟德一, 刘金凤. 基于理想滑行路径的机场滑行调度策略模型[J]. 大连交通大学学报, 2011, 32(16): 41-45.
MU Deyi, LIU Jinfeng. A scheduling strategy model of airport taxiway based on ideal path[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2011, 32(16): 41-45. (in Chinese)
- [12] 丁建立, 李晓丽, 李全福. 基于改进蚁群协同算法的枢纽机场场面滑行优化调度模型[J]. 计算机应用, 2010, 30(4): 1000-1003.
DING Jianli, LI Xiaoli, LI Quanfu. Optimal scheduling model for hub airport taxi based on improved ant colony collaborative algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(4): 1000-1003. (in Chinese)
- [13] 李楠, 赵擎, 徐肖豪. 基于 A* 算法的机场滑行路径优化研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(7): 88-92.
LI Nan, ZHAO Qing, XU Xiaohao. Research on taxing optimization for aircraft based on improved A* algorithm[J]. Computer Simulation, 2012, 29(7): 88-92. (in Chinese)
- [14] PAIELLI R, ERZBERGER H. Conflict probability estimation for free flight[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1997, 20(3): 588-596.
- [15] PRANDINI M, HU J, LYGEROS J, et al. A probabilistic approach to aircraft conflict detection[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2000, 1(4): 199-220.

作者简介:

侯盼盼(1983—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空市场分析,飞机总体设计与飞机价值评估,运营经济性分析,民机运营优化研究,民机技术经济研究。

王梓旭(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空运输系统优化。

(编辑:丛艳娟)