

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2020.04.021

民用飞机机载跑道入侵预警系统仿真验证

廖 凯*

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘 要: 民用飞机在低能见度的机场跑道滑行时, 存在发生跑道入侵的风险。国内外民航史记载了数次因跑道入侵事件导致的飞机在机场地面相撞而机毁人亡的严重事故。近年来, 越来越多的人选择飞机作为长途出行的交通工具, 使得全球大型国际机场的年吞吐量剧增, 导致跑道入侵事件时有发生。各国民用航空管理组织对跑道入侵事件的关注度持续上升, 航空公司需要在机上安装一套地面防撞系统, 来避免跑道入侵事件的发生。本验证项目基于某大型机场的动态地图建立了一个机载跑道入侵预警系统原型, 建立了飞机在机场滑行的平面四向运动模型, 设定了不同安全等级的跑道入侵预警算法, 定义了多种飞机跑道入侵场景, 最终在 MATLAB/Simulink 和 FlightGear 中进行二维平面仿真和三维立体仿真, 验证了系统解决方案的有效性和算法的正确性。

关键词: 低能见度; 跑道入侵; 预警; 动态地图; 仿真; 验证

中图分类号: V355

文献标识码: A



OSID:

0 引言

近十年间, 随着中长途出行的旅客数量剧增, 世界各地大型机场的飞机架次吞吐量急剧上升, 不少机场已趋近设计时的最大量。长时间的满负荷运营使得机场控制塔台工作人员不堪重负, 很容易出现人为指派错误。尤其在大雾、大雪等低能见度的天气情况下, 发生机场跑道入侵事故的概率大增, 发生跑道入侵和飞机碰撞事故的风险剧增。美国安全交通委员会将跑道安全提升工作列为最需要进行的工作之一。中国民用航空管理局也大大提升了对机场跑道安全的关注度。为避免跑道事故, 各大航空公司需要在机上安装一套预警系统, 以期在发生跑道入侵或碰撞前, 为机组提供足够裕度的预警提示, 为机组及时地做出反应争取时间。为满足这一需求, 航空业内一些公司开始研发机上跑道入侵预警系统, 用于支持航空公司在任何低能见度条件下安全地起降和停泊飞机^[1]。

本文的主要内容是基于 MATLAB/Simulink 内

建模型设计一个机载滑跑防撞系统原型, 并通过 2D 和 3D 仿真来验证算法的有效性。首先基于某机场地图源数据生成一个可被 MATLAB 识别的地图文件, 并在 MATLAB 中对该地图数据进行二次开发, 编写一个机场地图生成器。在地图中加入跑道、滑道和停机坪的相对坐标数据等生成机载滑行防撞系统中的动态机场地图。接着在机场动态地图中的相对坐标系中绘制主飞机和跑道入侵飞机的图标, 用于实现飞机和入侵机在机场地图上的运动。该系统设定了多种综合的跑道/滑道入侵场景和告警逻辑, 最终通过二维和三维的仿真和飞行员反馈, 验证了算法逻辑的有效性。

1 背景概述

20 世纪 70 年代, 欧洲航空史上曾发生过一起因跑道入侵而导致两架客机在机场跑道相撞, 造成机上 583 人遇难的事故, 该事故被列为世界航空史上最严重的事故之一。机场跑道入侵事故可导致两个显著问题, 一是航班延误, 导致航空公司利润受

* 通信作者。E-mail: liaokai@comac.cc

引用格式: 廖凯. 民用飞机机载跑道入侵预警系统仿真验证[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(4):112-116. LIAO K. Simulation and verification of civil aircraft airborne runway incursion alerting system[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(4):112-116(in Chinese).

损;二是地面撞机事故,造成机毁人亡的巨大经济和声誉损失。以下从国内外近 10 年间的跑道事故案例中选取 2 个加以举例。

2011 年在美国约翰肯尼迪国际机场,一架法国航空的 A380 客机在滑行过程中,撞击了一架 CRJ-700 飞机的左侧水平安定面,导致 CRJ-700 飞机的垂尾、方向舵和平尾损毁。2016 年在上海虹桥国际机场,东方航空的一架 A320 客机在起飞前的滑跑阶段,遭遇另一架东航 A330 客机横穿其起飞跑道,两机最接近时垂直距离 19 m,翼尖距离 13 m,险些酿成机毁人亡的撞机事故。

为减少跑道入侵事故的发生,机载设备供应商开发了各式各样的机载系统^[2],提供不同算法的告警和避撞逻辑。本文将制定一种基于距离和时间的跑道入侵预警逻辑,并建立一个显示动态地图的驾驶舱人机界面,仿真多种入侵场景,来验证预警算法的有效性^[3]。

2 MATLAB/Simulink 建模

2.1 机场地图建模

经过对多个大型机场体量和运营数据的评估,本系统选用了某大型国际机场的地图作为验证素材。该机场拥有 3 条可起降大型客机的跑道、34 条滑行道和 15 个停机坪。首先将机场的二维图数据转换为 MATLAB 可识别的格式导入其中,接着按机场元素建立一套数据表,再按该数据表在 MATLAB 中进行编码,使用内建函数进行地图绘制。

2.2 人机界面设计

在 MATLAB 中建立机场跑道模型后,建立人机界面的框架,该界面以主飞机为中心,圆形罗盘环绕,可显示主飞机在机场内的实时位置、行进角度、地面滑行速度等信息^[4]。

1) 主飞机和入侵飞机建模

根据仿真验证方案的设计,主飞机和入侵飞机的模型基于飞机滑跑的加速度特性建立。主飞机在机场地面的滑行路径被预先设定,同时也接受外部输入(键盘或手柄)控制。

2) 界面设计

本仿真验证系统的主体是一个假定安装在驾驶舱仪表台位置的飞行员人机界面,用于显示主飞机在机场表面的相对运动。该界面以主飞机的图标为中心,环绕一个用于表示实时行进角度的圆形罗盘,

最外部是一个带距离比例尺刻度的方框。方框顶部的数值表示实时行进角的读数,方框底部包含了地面滑行速度和当前位置信息,以及一个用于调节显示比例的控制条,如图 1 所示。

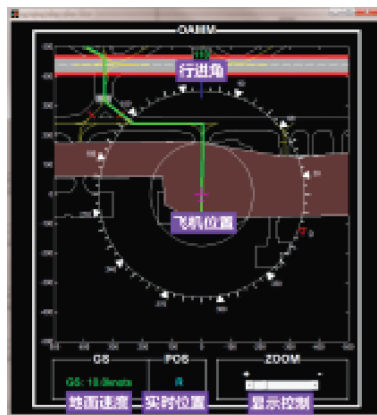


图 1 飞行员人机界面

3) 跑道入侵情景建模

为验证预警算法,本方案设计了单机入侵和多机入侵的情景。单机入侵即在主飞机滑行/起飞过程中,有一架滑行飞机将在未来的某个时间点通过主飞机的行进路线。多机入侵,即在主飞机滑行/起飞过程中,将有 2 架以上的其它滑行飞机同时或先后出现在主飞机的行进线路上。

2.3 预警算法

本系统预测跑道入侵并及时向飞行员发出预警的机制通过引入“基于飞机位置的告警区域”来实现。告警区域按照从高到低的优先级依次被分为三个级别,包括“危险区”、“谨慎区”和“提示区”^[5]。每个区域通过飞机将在预定义的距离范围来区分。最接近飞机的 50 m 半径区域被定义为“危险区”。“谨慎区”的距离范围为 50 m ~ 100 m,而“提示区”的半径为 100 m ~ 200 m^[6]。基于上述的告警逻辑,例如,系统预测到警报区将发生跑道入侵,则会最多提前 15 s 向飞行员发出告警信息。另外,若系统探测到两架同时在地面滑行的飞机将在大于 60 s 的时间后到达同一位置,为避免过早的提示信息对飞行员带来干扰,系统将不产生提示,但飞行员仍可通过驾驶舱显示系统的画面信息获知周边的交通状况^[7]。

3 仿真验证过程

3.1 二维仿真

二维仿真是基于动态机场地图进行的,具体过

程如下:

1) 通过机场规模、吞吐量、跑道和滑行道数量、复杂度等参数进行综合评估,选定一个机场地图作为本系统仿真验证的标的,将地图数据转换格式并导入 MATLAB;

2) 在 MATLAB 中定义一种数据结构,对机场设施(跑道、滑行道、等候点、汇合点、路径、停机坪、塔台等元素)进行识别,并在机场动态地图上予以显示^[8];

3) 基于机场地图建立机载滑跑避撞系统动态地图的人机界面;

4) 在动态地图界面中创建主飞机和入侵飞机的图形;

5) 为主飞机和入侵飞机指派起飞/滑行路径,以制造跑道入侵场景;

6) 基于内置的飞机滑行参数建立滑行仿真模型,使人机界面中的飞行运动特性更加接近真实情况;

7) 基于预设的加速度曲线对入侵飞机的滑行运动进行虚拟仿真;

8) 制造跑道入侵场景,包括单机入侵和多机入侵;

9) 实时监测机场跑道的可用状态,并在动态地图中予以显示;

10) 根据预定义的告警算法逻辑计算主飞机和入侵飞机的实时位置、相对距离和未来距离,根据计算结果在动态地图上显示不同的告警信息。

对于主飞机在机场跑道滑行模型,其输入是飞机滑行速度偏离率和行进角偏离率,输出数据为主飞机的实时的滑行速度 V 、行进角 ψ 和位置坐标 (X, Y) ^[9],这些参数的初始值在建模时已输入预设值,模块的处理逻辑在 MATLAB 中实现,如图 3 所示。滑行仿真器基于如下等式建立,各变量含义见表 1。

表 1 地面滑行飞机模型参数的含义

序号	变量名	变量含义
1	V_d	主飞机滑速偏离率
2	Ψ_d	主飞机行进角偏离率
3	V	主飞机实时滑速
4	Ψ	主飞机实时行进角
5	X, Y	主飞机实时位置坐标值
6	τ_v	速度持续时间常量
7	τ_d	行进角持续时间常量

$$\dot{V} = (V - V_d) / T_v \quad (1)$$

$$\dot{\psi} = (\psi - \psi_d) / T_\psi \quad (2)$$

$$X = V * \cos\psi \quad (3)$$

$$Y = V * \sin\psi \quad (4)$$

在 Simulink 中建立的模块如图 2 所示。

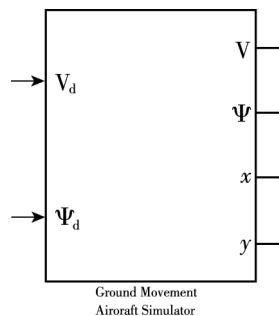


图 2 地面滑行飞机模型

对于单机跑道入侵的场景,当在主飞机滑跑路径上出现其他飞机并逐渐接近时,当两机距离进入 100 m ~ 200 m 区间,系统将显示黄色告警信息,当距离值进入 50 m ~ 100 m 区间时,系统将显示提示信息提示飞行员有其它飞机进入了主飞机的“谨慎区域”,当距离值降至 50 m 以下时,系统将触发最高级别的告警信息,仿真结果如图 3 所示。



图 3 单机跑道入侵预警仿真

对于多机跑道入侵,告警仿真结果如图 4 所示。



图 4 多机跑道入侵预警仿真

3.2 三维仿真

本项目使用 FlightGear 作为三维虚拟仿真工具,目的是使飞行员获得更加真实和直观的操作体验。实时的仿真数据通过 MATLAB/Simulink 中的处理模块转换为 FlightGear 可识别的数据格式,并通过一个标准的网络协议接口导入到 FlightGear 中。基于上述的数据转换和接口导入操作,FlightGear 将主飞机和入侵飞机的动态入侵场景显示在屏幕上。

需要输入的飞机地面滑行参数包括方向角和实时位置坐标值^[10]。本系统通过调用 Simulink 的 Flat Earth to LLA 模块,将扁平地球坐标系数据转换为地理经纬度和海拔高度,在通过 FlightGear 的 6DoF Animation 模块对输入数据进行打包并向指定 IP 地址和端口传输。坐标转换数据流按照图 5 进行。

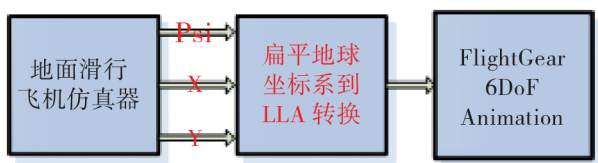


图 5 飞机运动模型数据转换

FlightGear 的输出图像如图 6 所示,基于对预警系统的三维仿真,可使参与测试的飞行员获取更加接近实景的跑道入侵体验,并给出更加真实准确的反馈。



图 6 FlightGear 虚拟仿真

3.3 仿真验证结果

通过对跑道入侵预警系统的二维和三维仿真,得到的验证结果如下:

1) 当入侵飞机进入主飞机 200 m 半径范围内时,系统触发提示逻辑,屏幕顶部显示绿色提示信息,提示飞行员有其它飞机从某个方向进入了主飞机的安全范围内;

2) 当入侵飞机进入主飞机 100 m 半径内时,系

统触发并显示黄色提示信息,告知飞行员有入侵机在进一步接近主飞机;

3) 当入侵机进入主飞机 50 m 半径范围时,系统触发并显示红色告警,向飞行员提示危险,促使飞行员及时作出反应。

4) 三维仿真使飞行员获得了除平面动态地图之外的实景体验。

4 结论

本项目针对飞机在机场地面跑道滑行过程中可能发生的跑道入侵事件,设计了基于机场动态地图的跑道入侵预警系统原型,建立了主飞机和入侵飞机的平面四向运动模型,在单机入侵场景的基础上引入了多机入侵的场景,通过 Simulink 和 FlightGear 软件分别进行了二维和三维仿真,验证了预设的跑道入侵告警算法逻辑的有效性和合理性。具体结论如下:

1) 根据距离和时间定义的告警逻辑是有效的,在发生跑道入侵事件前,可让机组人员有足够时间做出恰当的处置。

2) 本验证引出了多机入侵场景仿真,可帮助提升跑道入侵预警系统的监控和控制能力。

3) 本项目对飞行员人机界面进行了优化,提升了跑道入侵预警系统的可读性和可操作性。

4) 项目中建立了机场控制塔台界面,从规避跑道入侵事件为出发点,为机场控制人员提供了全景状态感知能力。

5) 集成 FlightGear 的三维仿真,可使参试飞行员获得更加直观的体验,有助于获取更加真实的反馈数据。

6) 可依据本项目中定义的机场地图数据表格格式,增加其它机场地图,生成机场地图数据库,用于其它 MATLAB 仿真研究。

参考文献:

- [1] BIELLA M, JAKOBI J, ROEDER M. Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems [C]// Professional English Seminar 2012. DLR, 2012.
- [2] HERRERO J G, BESADA PORTAS J A, CASAR CORREDERA J R. 用地图信息跟踪机场场面目标[J]. 李金铭,杨本兴,叶健,译. 电子工程信息,2004, 28(3): 13-26.
- [3] REPENTIGNY L D, PEARSON G, WILKS B. Using

- Simulation as an Effective Runway Incursion Prevention Strategy[C]// Aiaa Modeling & Simulation Technologies Conference & Exhibit. [S.l. :s.n.],2003.
- [4] 董兵,戴维. 跑道状态灯在防止跑道入侵中的应用进展分析[J]. 交通技术,2019, 8(6): 352-357.
- [5] SCHOENEFELD J, MOELLER D. P. F. Runway incursion prevention systems: A review of runway incursion avoidance and alerting system approaches[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2012, 51(5): 31-49.
- [6] 潘卫军,许友水. 机场跑道入侵人为因素识别与预防研究[J]. 人类工效学,2014, 20(3): 75-79.
- [7] CLARK S, TRAMPUS G. Improving Runway Safety with Flight Deck Enhancements [J]. Boeing AERO Magazine, 2011, 58(1): 5-11.
- [8] BAKOWSKI D L, FOYLE D C, HOOEY B L, et al. DataComm in Flight Deck Surface Trajectory-Based DataComm in Flight Deck Surface Trajectory-Based Operations[J]. J Sci Commun, 2012, 163(1): 259-268.
- [9] KLEIN K, ROEDER M, MAYCROFT H. Current research projects on airport surface movement guidance and control systems[J]. Air & Space Europe, 2001, 3(3-4): 271-274.
- [10] 陈平. 基于传感器网络的跑道入侵防御系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.

作者简介

廖凯 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机机载系统软件符合性验证。E-mail: liaokai@comac.cc

Simulation and verification of civil aircraft airborne runway incursion alerting system

LIAO Kai *

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Runway incursion might occur while civil aircraft taxiing on airport surface with low visibility. The history of civil aviation at home and abroad has recorded several catastrophic accident which caused many deaths due to runway incursion when taxiing. In recent years, more and more people choose airplanes to make long-distance transportation. Therefore, the annual throughput of the huge airport hub has increased significantly, which leads to more occurrence of runway incursion. The civil aircraft authorities for each country pay increased attention on runway incursion events, while airliners request to install a set of airport surface collision avoidance system to avoid the occurrence of runway incursion. This program established a prototype of airborne runway incursion alerting system based on a large airport moving map, set up a four headings moving aircraft module. Hierarchical runway incursion alerting algorithm has been developed and multiple intruder scenario has been introduced in this system. Both 2D and 3D simulation have been conducted in MATLAB/Simulink and FlightGear. The effectiveness of the system solution and the correctness of the algorithm have been verified finally.

Keywords: low visibility; runway incursion; alerting; airport moving map; simulation; verification

* Corresponding author. E-mail: liaokai@comac.cc