航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Dec. 25 2019 Vol. 30 No.12 59-65

面向协同飞行的航空电子系统安全性分析技术研究

谷青范*，邓平煜，董海勇，荣灏
中国航空无线电电子研究所， 上海 200241

摘 要：跑道入侵等事故征候大多是因为飞机与机场塔台控制之间没有协同好，少数是由于飞机本身系统设备故障导致的，飞机的飞行过程是一个复杂的“人-机-环”系统，而人和环境因素对大多数事故起主要责任。研究航空电子系统安全性分析技术，不仅需要研究飞机本身，还需要研究飞机之间协同等交通运营管理。本文分析面向协同飞行的飞行安全监视机制，并通过高度层更改程序进行分析，说明协同飞行情况下空中交通冲突探测及规避的有效性。

关键词：航空电子系统；安全性分析；协同飞行；监视

中图分类号：V243.1 **文献标识码**：A DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.12.009

2016年10月11日，在上海虹桥机场36L跑道上，塔台管制员遗忘飞机动态，违反工作标准而造成人为原因严重事故征候，两架飞机本身均无问题，但由于没有协同好，险些出现撞机事件。飞机作为体系运营空中交通运输管理的一个节点，实际上是一个基于任务组织、空域管理和飞行过程一体化的感知、协同、控制过程。而每一架飞机飞行的组织、管理与控制是通过航空电子系统来完成。尤其是随着新一代航行体系（NextGen/SESAR）的运营，要求实现“门到门”的运行，将现有的“先到先服务”的航路点飞行改为“按时服务”的航迹飞行，从而降低地面、空中的等待时间，节约飞机燃油，实现绿色航空[1]。为了实现基于航迹的运行，首先需要导航系统能够精确定位，其次需要通信系统提供交通控制的数据链路，最后在飞行管理系统的支持下实现航迹协同和动态航迹规划，需要航空电子系统支持综合飞行计划、增强场面运行、场面交通管理、综合离场管理、基于航迹飞行、综合到达管理和增强的场面交通管理等服务[2]。

这些服务进一步对航空电子系统提出了更高的功能和交互要求，具体来说，包括四维航迹飞行管理、动态飞行计划、协同决策、授权间隔管理、基于性能的导航运行、交通监视、数据链管理等，进一步地，这些功能被综合到综合模块化航空电子（Integrated Modular Avionics，IMA）系统。航空电子系统的发展需要计算/网络资源的高度共享，而计算机技术的飞速发展也提供了满足发展需求的可能性。但是，两者的结合出现了新的安全性问题：航空电子系统中的任务按其重要性分为安全关键、生存关键和任务关键三种类型，它们之间不能互相产生有害的影响，尤其是重要性级别低的任务不能影响重要性级别高的任务[3]。在未来的第四代“综合化”航空电子系统中，由于计算/网络资源的高度共享，引发的问题是如何消除共享计算/网络资源的各任务相互之间的不利影响。具体说来，就是一个任务的错误不能够影响到其他正常任务的运行。

然而，飞机的飞行过程是一个涉及到“人-机-环”综合系统的复杂过程，三个因素之间具有很强的耦合关系，航空电子系统是飞机飞过过程的组织与管理的系统，需要基于飞机平台，根据飞行规划，针对空域管理，依据气象条件，面向基础设施能力，支持空地协同，提供飞行航路导引、交通态势感知、飞行任务识别、飞行组织决策、飞行安全监控等能力，实现安全、有效、高效的飞行过程[4]。因此，研究飞机飞行的安全性，不仅需要研究飞机系统设备本身的安全性，还需要研究飞行过程中的交通管理等运营行为。

收稿日期：2019-10-10；退修日期：2019-10-15；录用日期：2019-11-05
*通信作者. Tel.：18916837615 E-mail：gu_qingfan@careri.com
引用格式：Gu Qingfan, Deng Pingyu, Dong Haiyong, et al. Research on safety analysis technology of avionics system oriented for collaborative flight[J].Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(12):59-65. 谷青范，邓平煜，董海勇，等. 面向协同飞行的航空电子系统安全性分析技术研究[J]. 航空科学技术，2019，30(12)：59-65.

1 全过程飞行安全监视机制

从保障飞行安全角度，确保飞行安全的方法可以分为三种情况：一是提升飞机自身能力（如提升导航精度和风切变探测准确度）；二是人为因素，将人为因素转化为设计或运行规则；三是检测规避，利用全过程监视能力，实现危险规避。下面重点描述检测规避机制，即基于航迹运行的安全监视。

1.1 基于航迹运行的安全监视

基于航迹的管理是NextGen和SESAR计划中提升和实现运行能力和效率目标的核心能力，是通过对飞机所有运行阶段协同决策的管理，实现地面管理系统、空中飞机系统、飞行计划、飞行调度、飞行数据交换和飞行活动等的综合决策。通过实现飞行航路和飞机过程的管理，缩减飞机的间隔，提升空域的使用效率；通过建立支持高精度基于性能的导航（Performance Based Navigation，PBN）导航能力，改进飞行性能，提升所有飞行阶段飞行效率；通过使用包括气象信息在内的所有信息，支持飞行员与ATC协同，建立先进飞机管理，增强全天候飞行能力。因此，通过先进的飞机系统实现精确的时间和空间的四维飞行航迹管理，是新一代大型飞机必须具备的能力。

1.2 新航行体系的安全监视需求

新一代空中交通体系要求新一代飞机须提升飞行精度，增强飞行可预测性，建立飞行安全支持能力；提升环境监视功能，增强飞行危害感知，建立飞机安全控制能力；提升航迹管理，增强飞行间隔监测，建立飞行安全维持能力；增强全航路的气象感知，支持动态航路规划，提升恶劣气象条件飞行能力，提高飞行派遣率。

飞机基于四维航迹运行的所有飞行阶段是基于一个精确时间和空间的四维飞行过程，并在飞机与四维航迹的偏离超过警戒阈值时发出一致性告警。飞机运行时的所有飞行数据和空中交通信息必须保证实时刷新并保持一致，且支持用户管理和服务运行。飞机在运行过程中，利用机载自动监视系统通过广播式自动相关监视（Automatic Dependent Surveillance–Broadcast，ADS–B）、合同式自动相关监视（Automatic Dependent Surveillance-Contract，ADS–C）等自动相关监视技术向地面监视系统和空域内的其他飞机传输飞机的四维航迹和当前位置等信息，便于相关单元获取高密度空域的实时空中交通态势和飞机飞行状态。利用空地通信链路和地地通信网络实现四维航迹信息的全方位共享，进而实现空地同步的航迹监控、航迹协商、航迹修改和航迹许可，为飞机和地面的各利益相关方之间进行协同决策提供了有利保障。通过PBN精密导航能力实现航迹管理的精度、导航的完整性、导航的连续性。因此，基于航迹运行的过程，是飞机先进的监视系统、通信系统、导航系统（包括飞行管理系统）综合应用的过程。

新一代空中交通体系的监视系统涉及航空公司、飞机/机组、空管中心三方，并通过空地数据链实现协同。新一代空中交通体系的监视系统是针对三方各自的能力、视角和监视、预测手段，通过三方协同，构建系统统一监视能力。通过建立空中交通服务平台，提供交通管制服务、飞行信息服务和交通通告服务。监视功能通过空中交通服务功能、通信、监视和导航协同实现。其中空中交通管制服务建立的监视功能，包括飞行路径一致性检查，隔离确认、路径在规划和气象监视等，并通过相关数据链实现空中交通服务。

飞机的机载监视系统是新一代空中交通体系中监视系统的重要组成部分。建立支持基于航迹运行的机载系统监视能力，不仅提供了飞机所有飞行阶段和整个飞行航路的安全监视，而且提升了飞行过程有效性和飞行效率。

1.3 全过程飞行安全监视架构

传统飞机的监视系统是以现有基于飞行计划建立的空域体系所发展的监视系统，具备危害天气探测、空中交通态势感知、不安全地形探测等以近距安全应急为目的的监视功能。传统飞机的监视系统是以实现某项特定功能为导向开展设备的研制，导致功能与功能之间、功能与飞机运行任务之间没有很强的耦合关系，存在系统复杂、告警信息分散、告警信息不完善、告警技术水平低下等缺点，难以适应基于航迹运行的环境需求。

国外已经开展了机载间隔保障系统（Airborne Separation Assurance System，ASAS）的研究工作。该系统在飞机进入限制空域、气象危险区、地形/障碍限制区或是其他飞机受保护空域时，对运行时的短期、中期和长期的气象冲突、地形冲突、交通的冲突等进行探测、预测并提供解决建议。其系统构架如图1所示。

根据ARINC 768[5]，综合化技术是机载监视功能的发展方向[5]。一方面向设备功能的深度综合化方向发展，另一方面向机载功能的广度综合化方向发展。其中，面向设备功能的深度综合化方向发展，主要以高度综合化的IMA结构和其他系统共享软硬件资源综合的方向发展。面向机载功能的广度综合化方向发展，则是逐渐将ASAS、ADS–B、空中交通信息服务广播（Traffic Information Service-Broadcast，TIS–B）、净空湍流探测等新功能的监视系统与传统监视系统综合化的方向发展。除了资源层级的综合，综合化的监视系统将

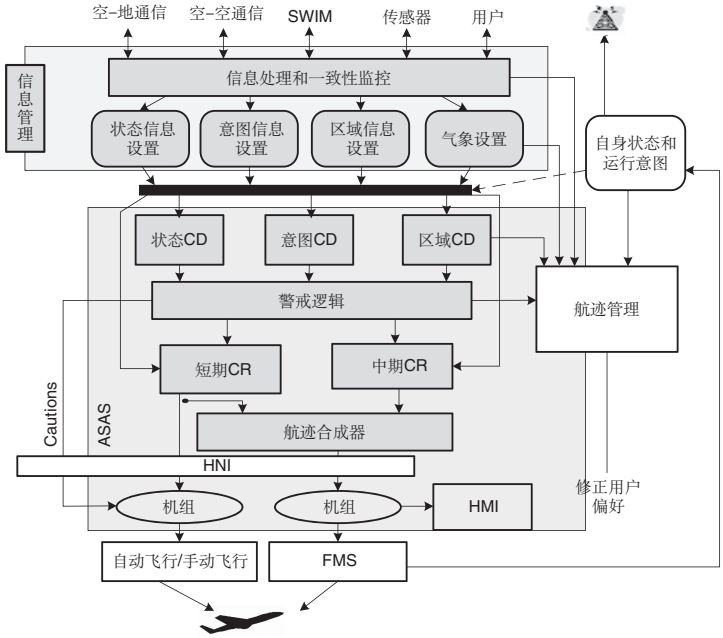

图1 机载间隔保障系统的系统构架

Fig.1 System architecture of airborne separation assurance system

通过驾驶舱显示系统向机组提供融合后的监视信息，最大限度地减小飞行员的负担，提高机组的情景意识，保障飞行安全。针对飞机每个飞行阶段的具体改进任务，本文提出了相应的飞行安全监视架构，其关系图如图2所示。

从图2中可以看出，机载系统根据飞机每个飞行阶段的具体改进任务，构建机载系统的任务能力，对基于航迹运行的功能进行组织，指挥飞机按照既定的任务目标运行。基于航迹运行的机载系统监视能力是飞机进行四维航迹运行的核心能力之一。

1.4 基于航迹运行的飞行冲突管理

基于航迹运行的飞行冲突管理主要包括冲突检测、冲突解脱和冲突预测三个方面。如图3所示，计算与目标飞机之间的冲突临近点，判断航空器间是否会发生飞行冲突，即航空器间隔是否小于间隔标准，如果有冲突则给出冲突告警和解决办法。主要技术难点包括航迹探测、冲突解脱和冲突预测方法，以及仿真验证方法和冲突管理逻辑。

（1）飞行交通环境态势跟踪及预测

飞机通过ADS-B、空中交通告警与防撞系统（Traffic Alert And Collision Avoidance System，TCAS）、地形提示和警告系统（Terrain Awareness And Warning System，TAWS）以及气象雷达（Weather Radar，WXR）对目标空域内飞机和环境进行监视，形成当前空域环境态势。通过空域环境态势评估得到空域态势值，从而确定其态势等级，针对不同态势等级实施有效的探测、跟踪及预测。

（2）飞行冲突检测及预测

飞行管理系统对交通状态进行管理，依据不同飞行状态下的航空器运动学方程对空域态势进行位置计算和航迹预测，结合安全标准确定禁止空中交通系统轨迹穿越的冲突超曲面，基于航迹计算两飞机冲突临近点，探测潜在空中冲突，识别、隔离、监视违规事件，依据冲突级别选择处理策略，并将相关报告及告警信息发送至航空电子显示系统、地面及其他相关协调单位。

基于航迹的飞行冲突检测及预测方法关键在航迹预测和管理，然后基于模型计算本机与入侵机之间未来临近点，参照最小安全距离标准评估是否存在飞行冲突。利用几何的确定型方法和概率型Paielli算法对基于航迹的冲突检测方法进行修正。基于复杂多变的飞行交通环境态势信息建立全飞行过程中典型场景的飞行冲突模型。

（3）冲突解脱

首先，进行机载监视系统信息能力分析，可建立基于信息质量、信息内容和信息时效性建立信息能力评价体系模型，如图4所示。

信息质量是指信息机载监视系统所感知信息的质量，根据系统的任务要求，各种机载监视设备将感知的信息经过机载总线进行共享、综合和利用。信息内容是指系统根据监视任务需求所应包含的信息内容，信息内容的子指标

包括完备性、关联性和一致性。信息时效性指收集信息的时效性，包含态势感知实时性、综合处理实时性和链路通信实时性，实时性越强，获取信息的能力也就越强。

然后，基于系统的综合信息能力，综合应用机载飞行管理系统和监视系统的信息，建立飞机的非线性动力学模型，建立空域交通、地形以及气象威胁避撞约束条件，以极小化燃油消耗或延迟时间等指标为优化目标函数，建立冲突解脱最优控制问题，以非线性整数规划等数值优化算法，或遗

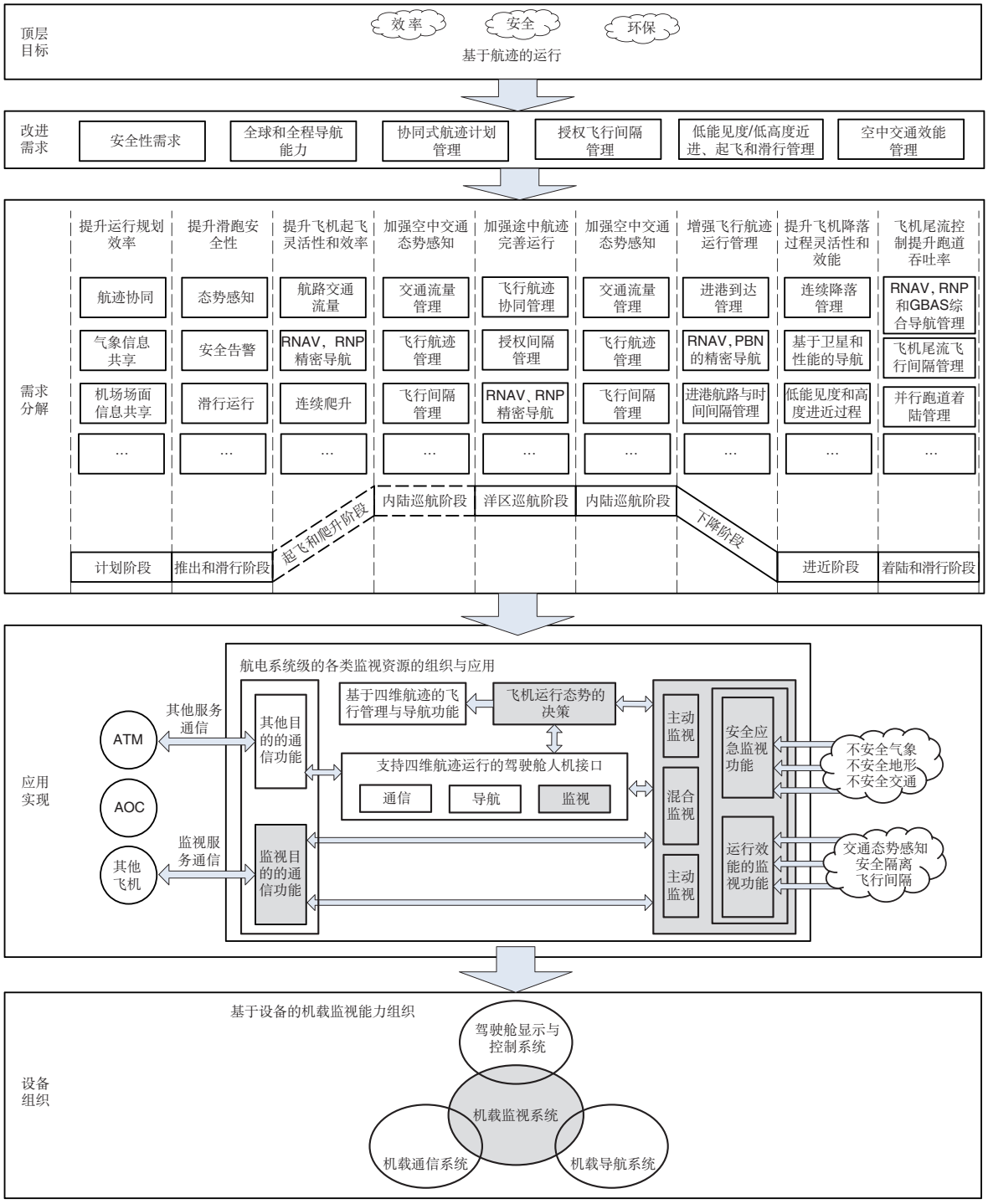

图2 飞机运行改进与机载系统监视应用的关系

Fig.2 Relationship between flight operation improvement and airborne surveillance application

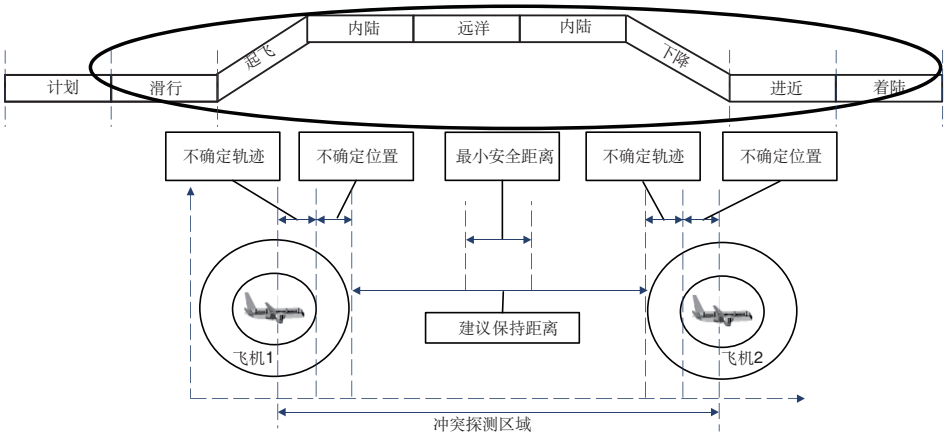

图3 冲突检测区

Fig.3 Collision detection zone

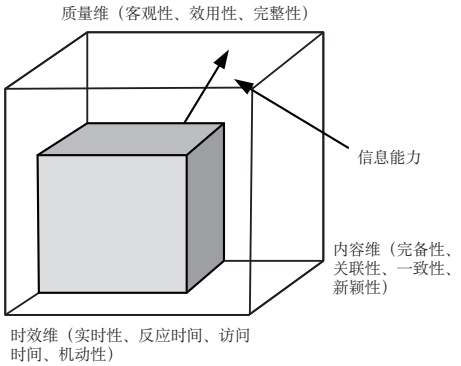

图4 信息能力三维模型

Fig.4 Three dimensional model of information ability

传算法等人工智能启发式算法进行求解，计算出复杂空域环境下的多飞行器的冲突解脱策略。

2 案例与仿真分析

2.1 高度层更改程序案例

使用高度层更改程序（In-Trail Procedure，ITP）可便于在航路上爬升或下降，从而能够在由于缺少空中交通管制监视和/或目前所采用的最低间隔标准较大而造成限制的环境中，从飞行效率或安全的角度讲，更好地使用最佳飞行高度层。ITP 旨在使航空器在程序性间隔要求不能满足时，能够在爬升或下降阶段穿越其他航空器。

空中交通态势感知–ITP 允许在保持安全的水平间隔下，实施爬升穿越或下降穿越。ITP 具有 6 种不同的穿越场景（包括跟随爬升、跟随下降、引导爬升、引导下降、引导–跟随爬升、引导–跟随下降），不失一般性，这里仅以跟随爬升的场景为例来说明（见图 5），执行 ITP 的飞机（高度层在 FL340）跟随参考飞机（高度层在 FL350）进行爬升穿越。

标准的 ITP 程序由管制员根据飞机间的安全间隔距离来决定是否允许穿越，ATSA–ITP 则利用当前的最低飞机安全间隔距离，由机载设备提供增强的交通情景意识，由飞行员决定是否符合高度层变更标准并发出变更请求，空中交通管制（Air Traffic Control，ATC）管制员主要确认 ITP 飞机和参考飞机在相同的航迹，并且两机最大的接近速度满足要求，即可发布高度层变更许可。

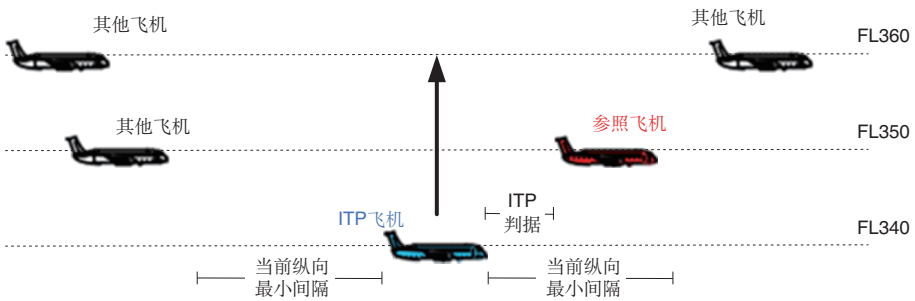

图5 ITP 爬升场景

Fig.5 The climb scenario of ITP

在执行ITP过程中，如果在相同的高度条件下，经度方向上两架飞机位置重叠的情况下，会发生空中相撞的冲突风险。影响冲突的要素主要有：位置误差、地速测量误差、飞行速度误差、高度误差、延迟误差、风速引起的误差，具体模型数据参考DO-312[6]。

进一步地，根据标准操作程序，ATSA-ITP运行应满足如下前提条件：最小间隔距离为10n mile（约18.52km）；ATSA-ITP能够实现的最小垂直间隔是1000ft（约305m）或2000ft（约610m）；ATSA-ITP不改变机载防撞系统告警程序；飞行机组和地面通信采用直接飞行员-管制员通信；平均ITP操作的飞行时间不超过6h。

2.2 空中交通冲突探测算法仿真结果及分析

（1）最小预测间隔变动下仿真与分析

仿真参数设置如下，两机飞行速度大小为250m/s，飞机A航向角与X轴夹角为0°，飞机B航向角与X轴夹角为90°，飞行飞行器安全间隔设置大小为5n mile，沿航向误差大小从0°开始，以速度为0.25n mile/min的大小线性增长，垂直航向误差大小固定为1n mile，通过设置两机距离最接近点的距离来控制预测时间，获得仿真结果如图6所示。

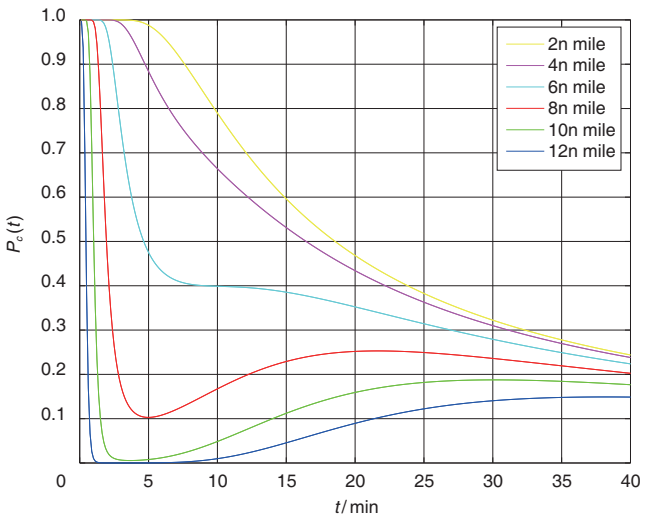

图6 最小预测间隔变动冲突概率图

Fig.6 The confliction probability of minimum predicted interval change

图6表示了在不同的最小预测间隔下，冲突概率随着预测时间的变化情况。仿真结果显示，同一预测时间时，最小预测间隔越小，冲突概率越高；同时，当预测时间较小时，冲突概率受最小预测间隔影响较大，预测时间较大时，最小预测间隔对冲突概率的影响不再是主导因素。因为预测时间较短时，沿航向累积误差较小，联合误差椭圆相对较小，与飞行器保护区的重叠部分受最小预测间隔影响较大，导致冲突概率受最小预测间隔主导；而预测时间较大时，沿航向累积误差增大，联合误差椭圆也相应增大，因此受最小预测间隔影响减小，且时间足够大时，联合误差椭圆内与保护区重叠部分占比越来越小，导致概率值不断向0收敛。

（2）冲突遭遇角度变动下的仿真分析

仿真参数设置上，除两机遭遇角度外，其他同上，获得仿真结果如图7所示。

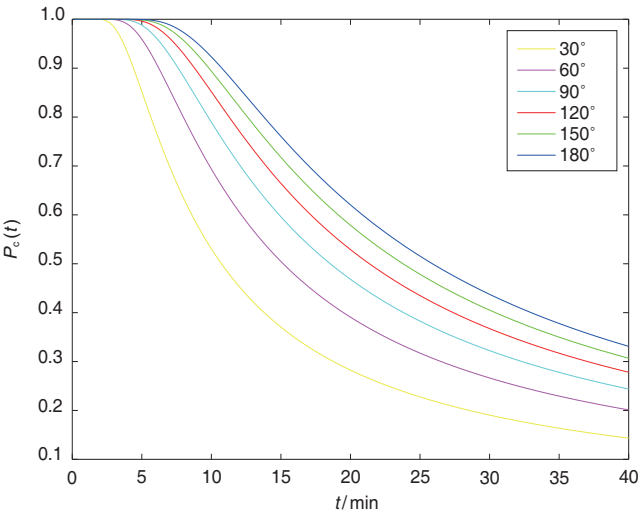

图7 冲突遭遇角度变动冲突概率图

Fig.7 The confliction probability of conflict encounter with angle change

图7表示了在不同的冲突遭遇角度下，冲突概率随预测时间的变化情况。仿真结果显示，随着预测时间的增加，冲突概率逐渐降低，且纵向结果对比表明，同一预测时间下，两机之间的角度越大，冲突概率相对较高。因为角度较小时，反映的飞行情况为两机接近同向行驶，联合误差椭圆较小，导致冲突概率相对较小，同理，两机之间角度较大时，接近相向而行，不论从联合误差椭圆分析，还是从真实情况假想，都是威胁等级较高，因此冲突概率较大。

3 结论

本文在研究航空电子系统安全性分析技术过程中，将飞机协同作为交通运营管理的一部分，分析了其中的安全性问题，并针对飞机飞行阶段的改进任务，提出了相应的飞行安全监视架构，并基于航迹运行的飞行冲突管理算法对高度层更改程序案例进行了分析和验证。未来，将继续研

究基于航空电子系统任务组织安全性理论和方法，支持飞机航空电子系统安全性能力需求工程实践，保障在新航行体系背景下的飞机飞行运行安全。

参考文献

[1] 伊群. 美国下一代航空运输系统执行计划简介[J]. 空中交通管理, 2008(11):51-55.
Yi Qun. Introduction to implementation plan of the U.S. next generation aviation transportation system [J]. Air Traffic Control, 2008(11):51-55. (in Chinese)

[2] 王超, 徐肖豪, 王飞. 基于航迹聚类的终端区进场程序管制适用性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(1):130-139.
Wang Chao, Xu Xiaohao, Wang Fei. ATC Serviceability analysis of terminal arrival procedures using trajectory clustering [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(1):130-139. (in Chinese)

[3] 王国庆, 谷青范, 王淼,等. 新一代综合化航空电子系统构架技术研究[J]. 航空学报, 2014, 35(6):1473-1486.
Wang Guoqing, Gu Qingfan, Wang Miao, et al. Research on the architecture technology for new generation integrated avionics [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6):1473-1486. (in Chinese)

[4] 王国庆. 航空电子系统综合化与综合技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018.
Wang Guoqing. Avionics system integration and integrated technology [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2018. (in Chinese)

[5] Specification of Aeronautical Radio Incorporated. ARINC 768-2-2011 Integrated Surveillance System (ISS) 2005：Includes Supplements 1-2[S].United State: Specification of Aeronautical Radio Incorporated, 2011.

[6] Radio Technical Commission for Aeronautics. RTCA DO 312 SUPP-2012: Safety, performance and interoperability requirements document for the in-trail procedure in oceanic airspace (ATSA-ITP) application[S]. United State: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2012.

（责任编辑 陈东晓）

作者简介

谷青范(1974－) 男，博士，研究员。主要研究方向：航电系统安全性。
Tel: 18916837615
E-mail: gu_qingfan@careri.com

Research on Safety Analysis Technology of Avionics System Oriented for Collaborative Flight

Gu Qingfan*, Deng Pingyu, Dong Haiyong, Rong Hao

China Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200241, China

Abstract: Most of the accidents such as runway incursions are due to the lack of coordination of the aircraft, and a few are caused by the failure of the aircraft's system equipment. Since the flight process of the aircraft is a complex "human-machine-environment" system, and human and environmental factors are responsible for the most accidents. Studying the safety analysis technology of avionics systems requires not only researching the aircraft itself, but also researching traffic management such as collaborative flight. This paper analyzes the flight safety surveillance mechanism for collaborative flight and analyzes it through the In-trail procedure to illustrate the effectiveness of air traffic collision detection and evasion in collaborative flight situations.

Key Words: avionics; safety analysis; collaborative flight; surveillance

Received: 2019-10-10； **Revised:** 2019-10-15； **Accepted:** 2019-11-05

***Corresponding author.Tel.：** 18916837615 **E-mail:** gu_qingfan@careri.com