

# 机载防撞系统水平防撞模型的建模与仿真

彭良福<sup>1</sup>, 林云松<sup>2</sup>

(1. 西南民族大学 电气信息工程学院, 四川 成都 610041; 2. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

**摘 要:**针对下一代机载防撞系统水平防撞的功能要求,采用相对距离水平投影的方法,根据空间碰撞威胁度和时间碰撞威胁度的理论依据,建立了水平方向的冲突探测和防撞模型,并利用伽利略相对性原理导出了本机与入侵飞机之间的投影水平相遇距离和到最近点的预留时间的计算公式。阐明了水平防撞模型的建模方法,制定出机载防撞系统水平防撞功能的仿真测试方案,并进行了基于时间流的计算机仿真和测试。仿真结果表明:该模型不仅能够预测出飞机在各个时间的相对方位、相对距离和相对高度,而且可以给出合理的水平机动措施,为飞行员提供左转或右转的角度指示以避免空中相撞。

**关键词:**机载防撞系统(TCAS);广播式自动相关监视(ADS-B);水平防撞;建模仿真

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2010.04.004

**中图分类号:**V243;V249 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2010)04-0016-05

近年来国内外多次试验表明,广播式自动相关监视(ADS-B)技术是下一代空管监视技术的发展方向<sup>[1-2]</sup>。它不仅应用于空中交通状况的显示,也可以应用于机场场面监视<sup>[3]</sup>。由于目前民航飞机上使用的机载防撞系统(TCAS II)采用二次监视雷达(SSR)来获得飞机之间的相对位置信息<sup>[4]</sup>,无法精确,因此只能提供垂直方向避免碰撞的决策咨询(VRA),不能兼顾水平方向(HRA)<sup>[5-6]</sup>。ADS-B和惯性导航系统(INS)的结合,可以改变现有有机载防撞系统的局限性,它所提供的飞机位置的精度完全能够满足水平方向防撞的要求。ADS-B技术同时可应用于无人机的防撞<sup>[7]</sup>。

## 1 机载防撞系统的模型化方法

机载防撞系统是一种在功能上独立于陆基空中交通管制系统(ATC),并为各种飞机提供防撞保护的机载设备。作为一种自动控制系统,它能够预测本机是否可能与入侵飞机相撞,评估本机采取机动飞行措施后的防撞效果,在爬升/下降和左转/右转等机动飞行防撞措施中进行合理的选择,并且将选择的决策咨询以声音和视觉的方式提示飞行员,帮助飞行员减少飞机空中相撞的危险。

在建立水平防撞模型时,需要将入侵飞机与本机之间的相对距离投影到本机所在的水平平面内,然后预测本机与入侵飞机在最接近点的水平相遇距离。因此,水平相遇距离是指在本机所在的水平平面上相遇距离的投影值。首先将本机与入侵飞机的位置在水平面上进行投影(见图1)。本机与入侵飞机之间的相对方位角度 $\theta$ 是本机机头的正前方与入侵飞机之间的夹角。当入侵飞机位于本机机头的右方时, $\theta$ 取“+”,反之则取“-”。由图1可知,假设实际测量的本机与入侵飞机的方位角度为 $\theta$ ,相对距离为 $R$ ,垂直高度差为 $\Delta Z$ ,那么两机相对距离在本机飞行平面上的投影值为: $R = \sqrt{R_i^2 - \Delta Z^2}$ 。除特别说明外,下文中本机与入侵飞机之间的相对距离均是指水平投影相对距离。

\* 收稿日期:2009-09-02

基金项目:国家民委科研基金资助项目(08XN06)

作者简介:彭良福(1966-),男,四川成都人,高级工程师,博士,主要从事机载防撞系统、信号与信息处理研究。

E-mail: pengliangfu@126.com

为了避免与入侵飞机相撞,本机可以采取 2 类机动飞行避让措施(单独或组合):①升降(爬升/下降,垂直机动);②转向(左转/右转,水平机动)<sup>[8]</sup>。目前的机载防撞系统(TCAS II)是通过建立垂直防撞模型来评估和判断本机采取垂直方向的避让措施(爬升或下降)后,能否在两机相遇的最接近点产生安全的垂直间隔距离。下一代机载防撞系统(TCAS IV)需要建立水平防撞模型<sup>[9]</sup>,评估和判断水平方向的类似情况。

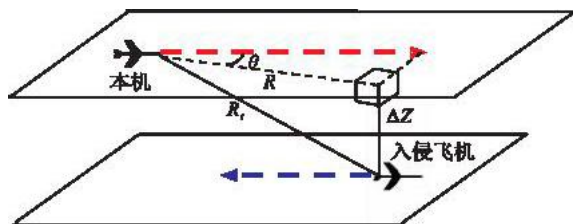


图 1 投影水平相对距离示意图

Fig. 1 Sketch map of projected horizontal miss distance

## 2 水平方向冲突探测和防撞模型的建立

为了给飞行员提供避免碰撞的决策咨询,机载防撞系统必须在本机与入侵飞机到达最接近点之前,根据两机在空中的相对几何位置,预测出两机在当前时刻以及今后各个时刻的飞行轨迹,然后根据预测的飞行轨迹来判断是否会发生飞行冲突,从而确定本机应该采取何种避让措施。

图 2 为本机与入侵飞机之间在水平方向的冲突探测模型。根据该模型,可以得到两机到达最接近点的预留时间  $T_{\text{su}}$  以及在最接近点的水平相遇距离。假设本机和入侵飞机的绝对速度分别为  $V_o$  和  $V_i$ ,两机之间的相对速度为  $V_r$ 。连续 2 次的观测时刻分别为  $t_1$  和  $t_2$ 。在  $t_1$  时刻两机的气压高度分别为  $Z_1, H_1$ , 相对距离和方位角分别为  $R_1, \theta_1$ ; 在  $t_2$  时刻两机的气压高度分别为  $Z_2, H_2$ , 相对距离和方位角分别为  $R_2, \theta_2$ 。

采用与 RTCA/DO-185A 标准中相同的假设,即在连续 2 次观测时间间隔  $\Delta t$  ( $\Delta t = t_1 - t_2 = 1 \text{ s}$ ) 期间,入侵飞机的飞行方向和飞行速度均未发生变化<sup>[5]</sup>。在以本机为坐标原点的运动坐标系中,入侵飞机以相对速度  $V_r$  飞行。由速度矢量三角形可知,本机和入侵飞机在最接近点(CPA)的投影水平相遇距离为:

$$D_{\text{HMP}} = \frac{R_1 R_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}} \quad (1)$$

两机到 CPA 的时间(即预留时间  $T_{\text{su}}$ )为:

$$T_{\text{su}} = \frac{R_2 (R_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) - R_2)}{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2)$$

如果预测的两机在最接近点的垂直相遇距离小于 RTCA/DO-185A 标准中规定的飞机垂直安全间隔距离门限值  $D_{\text{VM}_{\text{min}}}$ , 并且水平相遇距离也小于规定的飞机侧向安全间隔距离门限值  $D_{\text{HM}_{\text{min}}}$ , 那么两机可能会发生碰撞,本机必须采取机动飞行措施来避免碰撞<sup>[5]</sup>。

建立以转向(左转/右转)水平方向机动飞行措施作为的防撞模型,见图 3。图中  $\psi_o$  和  $\psi_o'$  分别为本机的初始和转向后的飞行方向,  $\Delta\phi$  为本机的转向角度,  $\psi_i$  为入侵飞机的飞行方向。假定本机的水平机动飞行措施是保速变向。

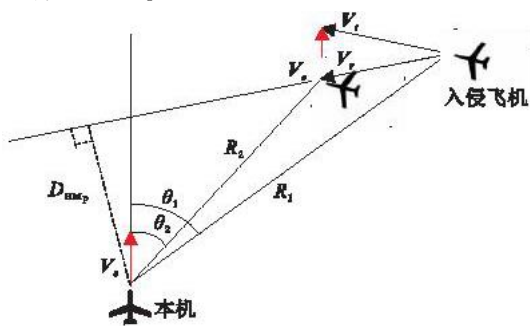


图 2 水平方向飞行冲突探测模型(运动坐标系)

Fig. 2 The model of conflict detection in the horizontal plane (moving reference frame)

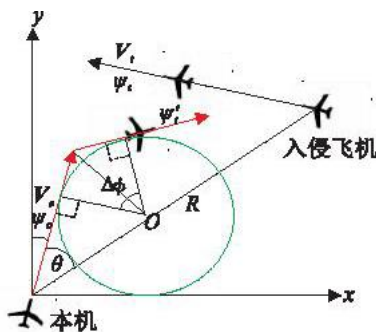


图 3 水平转向防撞模型(惯性坐标系)

Fig. 3 The model of horizontal turn for collision avoidance(inertial reference frame)

限于篇幅,只给出  $D_{HM_p}$  和  $T_{au}$  推导的结果:

$$D_{HM_p} = \pm (A_1 + A_2 \pm A_3) / V'_r \quad (3)$$

式中:  $V'_r = \sqrt{V_o^2 + V_t^2 - 2V_o V_t \cos(\psi_t - \Delta\phi)}$ ;  $A_1 = R_2 [V_t \sin(\psi_t - \theta_2) + V_o \sin(\theta_2 - \Delta\phi)]$ ;

$$A_2 = V_o V_t T_s [\sin(\psi_t - \Delta\phi) - \sin\psi_{ot}] + V_o^2 T_s \sin\Delta\phi + V_t V_o \sin(\psi_t - \Delta\phi) T_t;$$

$$A_3 = [V_t \cos\psi_t - V_t \cos(\psi_t - \Delta\phi) - V_o \cos\Delta\phi + V_o] V_o / \omega_o.$$

$$T_{au} = (B_1 + B_2 \pm B_3) / V'_r{}^2 \quad (4)$$

式中:  $B_1 = R_2 [V_o \cos(\theta_2 - \Delta\phi) - V_t \cos(\psi_t - \theta_2)]$ ;

$$B_2 = V_o V_t T_s [\cos(\psi_t - \Delta\phi) + \cos\psi_t] - V_t^2 T_s - V_o^2 T_s \cos\Delta\phi + [V_o \cos(\psi_t - \Delta\phi) - V_t] V_t T_t;$$

$B_3 = [V_t \sin\psi_t - V_t \sin(\psi_t - \Delta\phi) - V_o \sin\Delta\phi] V_o / \omega$ ;  $\omega$  为飞机转向的角速度;  $T_t$  为本机转向所用的时间;  $T_s$  为在转向之前飞行员响应的延迟时间。

RTCA/DO-185A 标准中的垂直防撞模型假定在 TCAS 的每个处理周期内(正常的处理周期为 1 s),入侵飞机的飞行方向和速度保持不变<sup>[5]</sup>,因此在水平防撞模型中,也可以认为满足:①本机保持飞行速度不变,以匀角速度改变飞行方向;②本机在保速变向的过程中,入侵飞机作保向保速运动。

基于水平防撞模型,机载防撞系统每一秒都要根据两机的位置变化信息重新预测和计算  $D_{VM}$  和  $D_{HM}$ 。如果两值同时小于安全门限值,那么将入侵飞机定义为威胁飞机并对其编号,否则定义为临近飞机。碰撞威胁探测算法通过每秒重新计算来判断临近飞机是否是威胁飞机,从而保证了临近飞机状态实时更新。其预测和计算的避免碰撞的决策咨询结果(VRA 和 HRA)会自动与本机和入侵飞机的机动状态相适应。

### 3 机载防撞系统水平防撞模型仿真

#### 3.1 水平防撞仿真测试方案

在机载防撞系统中,通过总线把 S 模式应答机、高度计、离散数据输入、设备面板等外部设备与防撞处理单元联系起来,由总线中断处理程序实现对各输入数据的处理。通过监视程序操纵前端设备,收集入侵飞机的相对高度、相对距离、相对方位等信息,建立对入侵飞机的监视跟踪缓存,并将中断处理程序获取的本机数据以及决策咨询信息共同形成消息队列提交给防撞逻辑。防撞逻辑中的接收/发送程序处理消息队列,获取本机数据(包括周期数据、面板设置及离散数据)、入侵飞机的航迹跟踪监视数据、入侵飞机发来的决策咨询信息以及地面站发送的控制信息等,由防撞逻辑主程序完成两机跟踪,进行 HRA 并采用显示器输出结果。

在图 4 中,虚线以下部分由测试输入模块来模拟完成。在每次测试的开始,测试输入模块读取输入文件,根据系统提供的每个  $T$  时间的中断,将对应时刻的测试数据放到对应的输入变量中,通过消息队列的方式传送给防撞算法主流程。

#### 3.2 仿真测试软件平台

仿真测试软件主要由测试软件输入模块、水平防撞算法和防撞逻辑处理模块、测试软件输出模块组成。采用基于时间流的仿真方法,以时间间隔  $T$  作为控制仿真时间顺序的参数,实时观测仿真开始  $T$  s 时系统中各个状态变量。仿真测试要求读取输入文件,按照  $T$  间隔的顺序,根据系统提供的每个  $T$  间隔开始的中断,将对应  $T$  数据放到相应的输入变量中,传送给防撞算法主流程。每次防撞逻辑运行完成后,将实际运算结果输出至显示器和输出文件中,以此来判断防撞算法的正确性。

##### 3.2.1 测试软件输入模块

本模块主要完成对输入想定文件的读入、相关参数的归类以及防撞逻辑处理数据的载入。

##### 3.2.2 防撞算法和逻辑处理模块

本模块根据水平防撞模型设计了水平防撞算法,可以模拟本机采取水平防撞措施(左转/右转)后的  $D_{HM}$  和  $T_{au}$ 。逻辑处理模块完成左转和右转之间的选择和比较,给出合理的决策咨询信息。

##### 3.2.3 测试软件输出模块

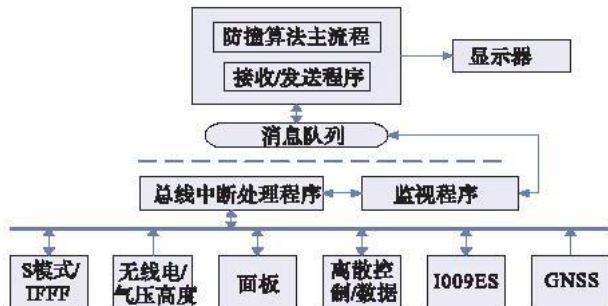


图 4 水平防撞系统仿真测试框图

Fig. 4 The architecture of test and simulation for horizontal collision avoidance system

本模块主要对想定输入文件经过防撞逻辑运算后的结果进行检验,判断防撞算法的正确性。按下述2种方法分别进行检验:

1)在防撞逻辑运算完成后调用,将防撞逻辑的运行结果自动保存为文件。同时还可以按时间顺序输出并打印到PC机的显示器上,以便进行判断和比较,验证防撞算法和决策逻辑的正确性。

2)通过串口接收显示信息,最终显示到计算机屏幕上,用于直观显示系统的功能并了解系统的运行状态。在每个 $T$ 时间的防撞算法和逻辑运算完成后调用,根据输出数据中的各项信息,将本机、入侵飞机以及控制信息以图形的方式在仿真仪表盘上直观地显示出来。

### 3.3 仿真测试硬件平台

由于国外航空电子系统的核心处理器倾向于采用商用货架产品(COTS)。因此,选择目前通用的高性能嵌入式处理器MPC8270。为了测试防撞算法的功能和技术指标,将支持水平方向防撞算法的软件安装在基于该处理器的专用仿真平台上,通过RS232串行接口与计算机相连接,建立一套软件仿真系统。

### 3.4 仿真示例

对文献[5]中提供的100多组描述本机与入侵飞机相遇的不同场景进行计算机仿真和测试,以下为其中的一个示例。

步骤1 输入想定文件描述:

起始时刻入侵飞机位于本机的右侧(Side - Range = +1.852 km)下方(Relative - Alt = +60.96 m),初始相对距离为6.482 km。本机的空速为182.88 m/s,高度为457.20 m;入侵飞机的空速为182.88 m/s,高度为396.24 m。

- 1)当 $T=1$  s时,入侵飞机以 $0^\circ$ 在本机右侧沿直线向本机飞来。
- 2)当 $T=4$  s时,入侵飞机以 $120^\circ$ 沿斜后方向朝本机的左前方飞行。
- 3)当 $T=14$  s时,入侵飞机突然发生机动,转向为 $0^\circ$ 沿本机的左侧方面向本机直线飞行。
- 4)当 $T=30$  s时,两机相遇结束。

仿真示例的仪表盘仿真显示输出结果见图5。图例说明如下<sup>[10]</sup>:仪表盘中心的十字代表本机。圆形代表可能发生飞行冲突的入侵飞机(TCAS发出交通咨询,提示飞行员注意);正方形代表将发生碰撞的入侵飞机(TCAS发出HRA,提示飞行员按照指示的机动措施避免碰撞)。仪表盘圆弧的刻度代表本机的转向角度,“+”表示右转,“-”表示左转。仪表盘上左侧阴影区表示本机禁止的转向角度,右侧阴影区表示本机允许的转向角度。相对高度均为60.96 m, $T$ 为仿真时间, $b_1$ 为相对角度, $r_1$ 为相对距离。

步骤2 显示输出结果:

由图5可知,当 $T=2$  s时,本机发出交通咨询。当 $T=16$  s时,由于入侵飞机在 $T=14$  s时突然机动飞行,转向为 $0^\circ$ 的角度正对本机飞行,此时入侵飞机位于本机的左侧,本机发出HRA,提示飞行员右转 $0^\circ-90^\circ$ 飞行以避免碰撞。当 $T=17$  s-21 s时,本机继续发出同样的HRA,此时入侵飞机位于本机的左侧。当 $T=24$  s时,水平决策咨询消失,转变为交通咨询。

仿真结果表明,根据水平防撞模型设计的机载防撞系统防撞算法和逻辑处理程序能够给出合理的决策咨询信息,为飞行员提供避免碰撞的HRA。

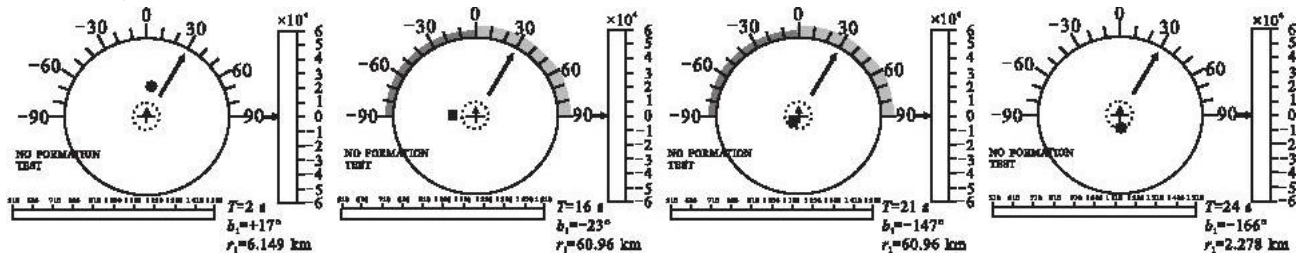


图5 计算机仿真显示输出

Fig. 5 The output display of computer simulation

## 4 结束语

本文在已经完成的机载防撞系统(TCAS II)防撞模型的研究工作基础上,对具有水平方向防撞功能的下一代机载防撞系统(TCAS IV)的防撞模型进行了较为深入的研究,建立了水平方向的飞行冲突探测和防

撞模型,给出了本机与入侵飞机之间的投影水平相遇距离和到最接近点的预留时间的计算公式,并且使用嵌入式处理器实现了机载防撞系统水平方向冲突探测和防撞决策咨询的仿真测试系统。仿真示例表明,该仿真系统可以通过预测本机采取左转/右转等水平机动措施后在两机的最接近点产生的水平间隔距离,合理地选择水平防撞机动措施,给出左转/右转的角度指示。该仿真系统的实现,有助于分析机载防撞系统的水平防撞机制,为机载防撞系统的改进和完善提供参考。

### 参考文献:

- [ 1 ] Harrison M J. ADS - X: The Next Gen Approach for the Next Generation Air Transportation System[ C ]//Proceedings of 25th Digital Avionics Systems Conference. Portland: AIAA/IEEE Press, 2006: 1 - 8.
- [ 2 ] Rekkas C, Rees M. Towards ADS - B Implementation in Europe[ C ]//International Workshop on Digital Communications Proceedings of Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Capri: [ s. n. ], 2008: 1 - 4.
- [ 3 ] RTCA/DO - 242A, 2002. Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast [ S ].
- [ 4 ] 刘志刚, 彭良福, 林云松. 机载防撞设备 TCAS 空对空通信中干扰的抑制技术[ J ]. 中国民航飞行学院学报, 2009, 20(1): 28 - 31.  
LIU Zhigang, PENG Liangfu, LIN Yunsong. The Limiting Interference Technology for Air - to - air Communication in TCAS [ J ]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2009, 20(1): 28 - 31. ( in Chinese )
- [ 5 ] RTCA/DO - 185A, 1997. Minimum Operational Performance Standards for Traffic Alert and Collision Avoidance Systems II ( TCAS II ) Airborne Equipment[ S ].
- [ 6 ] 林云松, 彭良福, 童玲. 空中防撞系统避撞机制的数学模型[ J ]. 电子科技大学学报, 2008, 37(4): 552 - 555.  
LIN Yunsong, PENG Liangfu, TONG Ling. Mathematics Model for Collision Avoidance in Traffic Alert and Collision Avoidance System[ J ]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(4): 552 - 555. ( in Chinese )
- [ 7 ] Kim K Y, Park J W, Tahk M J. UAV Collision Avoidance Using Probabilistic Method in 3 - D[ C ]//International Conference on Control, Automation and System. Seoul: [ s. n. ], 2007: 826 - 829.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Haissig C M. Military Formation Flight as A Model for Increased Capacity in Civilian Airspace[ C ]//Proceedings of 23rd Digital Avionics Systems Conference. Saltlake City: AIAA/IEEE Press, 2004: 1 - 9.
- [ 10 ] AS 8034 - 1982. SAE Aerospace Standard, Minimum Performance Standard for Airborne Multipurpose Electronic Displays [ S ].

(编辑: 徐敏)

## Modeling and Simulation for the Model of Horizontal Collision Avoidance in TCAS

PENG Liang - fu<sup>1</sup>, LIN Yun - song<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Information Engineering, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China;  
2. College of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** In order to research on the function of horizontal collision avoidance of TCAS IV, which is the next generation of Traffic alert Collision Avoidance System, the models for horizontal conflict detection and collision avoidance are established by using the method of projected horizontal relative distance. The calculating formulae for the projected horizontal miss distance and reserved time to the closet point of approach are derived from the model according to the Galilean principle of relativity. The modeling approach and simulation system for the model are illuminated. The test scheme for the function of horizontal collision avoidance model is provided. The simulation result shows that the model can be used to select reasonable horizontal maneuver measures and indicate the degrees to turn right or left to avoid midair collision.

**Key Words:** Traffic alert Collision Avoidance System ( TCAS ); Automatic Dependent Surveillance - Broadcast ( ADS - B ); model for horizontal collision avoidance; modeling and simulation