

文章编号: 1001 - 893X(2010)08 - 0007 - 05

## 机载防撞系统垂直防撞的物理模型\*

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, 成都 610041; 2. 电子科技大学 自动化工程学院, 成都 610054)

**摘要:**如何准确预测和估算本机与入侵飞机相遇时在最接近点的垂直间隔距离, 是机载防撞系统(TCAS)在垂直方向上选择防撞措施的关键问题。采用空间相遇几何学的方法, 建立了本机与入侵飞机相遇时垂直防撞的两种物理模型, 基于该模型推导出了预测两机之间垂直间隔距离的计算公式, 并且进行了计算机仿真。仿真结果表明, 该模型能够准确预测本机与入侵飞机相遇时在最接近点的垂直间隔距离。最后, 给出了本机在垂直方向上选择防撞措施的决策咨询条件和逻辑处理流程。

**关键词:**机载防撞系统(TCAS); 垂直决策咨询; 防撞模型

**中图分类号:** V241; V328   **文献标识码:** A   **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2010.08.002

## Physical Model for Vertical Collision Avoidance in Traffic Alert and Collision Avoidance System(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:** The vertical separation at the closest point of approach predicted between a host aircraft and an intruder aircraft is a key issue to warrant resolution advisory in a traffic alert and collision avoidance system (TCAS). Two physical models based on encounter geometry are established for vertical collision avoidance between the host and the intruder. The expressions of vertical separation predicted for collision avoidance are derived by these models, and the computer simulation is performed for evaluating the validity of these models. The simulation result shows that these models can predict the vertical separation at the closest point of approach in the case of two aircrafts encounter. Finally, the selection conditions of resolution advisory and the logic processing processes for a vertical maneuver are given.

**Key words:** traffic alert and collision avoidance system(TCAS); vertical resolution advisory(VRA); model for collision avoidance

自从 1981 年美国联邦航空局(FAA)提出并着手研制机载防撞系统(Traffic alert Collision Avoidance System, TCAS)以来, 经过二十多年的发展, 从只能提供交通咨询(TA)的第一代机载防撞系统 TCAS I, 到既能提供交通咨询又能提供垂直方向决策咨询(VRA)的第二代机载防撞系统 TCAS II, 机载防撞系

统逐步在美国、欧洲和中国得到了广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。迄今为止, 只有少数几家公司能够制造机载防撞系统。因此, 建立和分析机载防撞系统的物理模型, 对于研究和了解机载防撞系统的防撞机制, 具有重要的理论意义和工程参考价值。

\* 收稿日期: 2010 - 04 - 19; 修回日期: 2010 - 06 - 10

基金项目: 西南民族大学自然科学研究项目(10NZD002)

Foundation Item: The Natural Science Research Project of Southwest University for Nationalities(No. 10NZD002)

## 1 防撞措施

用于避免飞机在空中相撞的机动措施有转向(水平机动)、变速(水平机动)和升降(垂直机动)3种,这3种机动措施可以单独或者组合使用。受飞机飞行性能的限制,客机和运输机一般采用垂直机动来避免碰撞,战斗机采用垂直机动和水平机动的组合来避免碰撞。限于篇幅,本文只针对飞机垂直机动的防撞模型予以讨论。

为了满足工程应用中的实时性要求,节省机载计算机的运算时间,美国航空无线电技术委员会(RTCA)在DO-185A标准中规定了飞机避免碰撞的垂直机动及垂直方向上的目的速度分别为<sup>[6]</sup>:

(1) 标称爬升,目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL} = +7.6 \text{ m/s}$ ;

(2) 标称下降,目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL} = -7.6 \text{ m/s}$ ;

(3) 增大爬升,目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL} = +12.7 \text{ m/s}$ ;

(4) 增大下降,目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL} = -12.7 \text{ m/s}$ 。

飞机通过加速爬升或者加速下降的方式达到垂直方向上的目的速度,将导致在垂直方向上产生足够大的间隔距离,从而避免与入侵飞机相撞。

## 2 垂直防撞的物理模型

当两架飞机相遇时,机载防撞系统采用两架飞机到达最接近点(Closest Point of Approach, CPA)的时间  $\tau$  来为飞行员提供足够的预留时间以防止飞机相撞。在该预留时间内飞行员按照机载防撞系统提示的垂直机动的防撞措施飞行,就可以在两架飞机的最接近点处产生足够大的垂直间隔距离,从而避免碰撞。 $\tau$  的取值与飞机的飞行高度有关,其范围为  $15 \sim 35 \text{ s}$ <sup>[6-7]</sup>。为了获得准确的预留时间  $\tau$ ,机载防撞系统利用二次监视雷达(SSR),向邻近空域中的飞机发出问询信号,邻近空域中的飞机接收并应答该问询信号。利用发出和接收问询信号之间的时间差就可以计算出两架飞机之间的相对距离  $R$ 。通过时间间隔为  $1 \text{ s}$  的连续两次问询,就可以得到两架飞机之间的相对距离的变化率  $\dot{R}$ 。再利用公式  $\tau = R/\dot{R}$  就可以得到两架飞机到达最接近点的预留时间  $\tau$ <sup>[5]</sup>。此外,在飞机的应答信息中,还包含了飞机的气压高度、无线电高度等信息。因此,通过时间间隔为  $1 \text{ s}$  的连续两次问询还可以得到邻近飞机的高度变化率(垂直速度  $\dot{Z}_{INT}$ )。

### 2.1 模型描述

基于两架飞机之间的相对距离、相对距离的变化率以及相对高度和相对高度的变化率,就可以根据飞机在空中的相对几何位置,预测和计算出两架飞机到达最接近点的垂直间隔距离(Vertical Miss Distance, VMD)和水平间隔距离(Horizontal Miss Distance, HMD)<sup>[6-7]</sup>。如果预测的在最接近点的垂直间隔距离小于 RTCA/DO-185A 标准规定的飞机垂直安全间隔距离门限值  $VMD_{min}$ ,并且水平间隔距离也小于规定的飞机侧向安全间隔距离门限值  $HMD_{min}$ ,那么飞机就可能会发生碰撞。在飞机可能相撞的情况下,如何在上述4种垂直机动中选择合理的防撞措施,是机载防撞系统需要解决的关键问题。为了解决该问题,我们给出了机载防撞系统的两种垂直防撞的物理模型。

第一种垂直防撞的物理模型如图1所示。在该模型中,我们假定本机以当前的垂直速度为初始速度,目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL}$  为终止速度,在垂直方向上以加速度  $Accel$  匀加速飞行。入侵飞机以当前的垂直速度在垂直方向上匀速飞行。由于机载防撞系统的数据处理周期为  $1 \text{ s}$ ,即每隔  $1 \text{ s}$  就要自动地对本机与入侵飞机之间的垂直间隔距离重新预测和计算一次,并且更新垂直决策咨询(VRA)信息。因此,上述假设条件很容易得到满足。只要入侵飞机满足在  $1 \text{ s}$  内保持匀速飞行的条件,本文所描述的防撞模型的预测结果就是准确的。

根据图1所示的物理模型,我们可以预测和计算出本机和入侵飞机在最接近点的垂直间隔距离值,该值也是经过  $\tau$  时间后两架飞机在垂直方向上的投影高度之差。

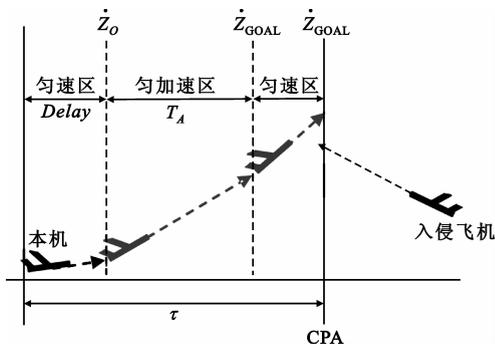


图1 垂直防撞物理模型之一

Fig.1 The first model of the vertical collision avoidance

由图1可知,预测和计算本机和入侵飞机在垂

直方向上的投影高度分为3个区域:

(1)延迟区:本机在垂直方向上以当前的垂直速度匀速飞行。飞行员从接收到垂直决策咨询信息到执行垂直机动的防撞措施之间存在一定的延迟,称为响应时间  $Delay$ 。对于标称升降,  $Delay = 2.5\text{ s}$ ;对于增大升降,  $Delay = 5\text{ s}$ ;

(2)匀加速区:本机在垂直方向上以当前的垂直速度为初始速度,以  $Accel$  为加速度匀加速飞行,直到达到目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL}$  为止;

(3)匀速区:本机在垂直方向上以目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL}$  匀速飞行,直到到达最接近点(CPA)为止。

经过  $\tau$  时间后,本机达到的垂直高度为

$$Z_{OWN} = Z_0 + \dot{Z}_0 \times Delay + (\dot{Z}_0 \times T_A + \frac{1}{2} \times Accel \times T_A^2) + \dot{Z}_{GOAL} \times (\tau - Delay - T_A) \quad (1)$$

式中,  $Z_0$  为本机的初始高度;  $\dot{Z}_0$  为本机的垂直速度;  $T_A$  为本机加速飞行花费的时间,并且有  $T_A = |\dot{Z}_{GOAL} - \dot{Z}_0| / Accel$ ;  $\tau$  为两架飞机到达最接近点的预留时间。

经过  $\tau$  时间后,入侵飞机达到的垂直高度为

$$Z_{INT} = Z_I + \dot{Z}_I \times \tau \quad (2)$$

式中,  $Z_I$  为入侵飞机的初始高度,  $\dot{Z}_I$  为入侵飞机的垂直速度。在  $\tau$  时间后,本机与入侵飞机之间的垂直间隔距离为

$$\Delta Z = Z_{OWN} - Z_{INT} \quad (3)$$

在计算两机相遇时的最小垂直间隔距离时,必须考虑一种特殊情况,即本机与入侵飞机之间的最小垂直间隔距离是在本机的垂直速度还没有达到目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL}$  之前的某个时刻发生。利用函数极值存在的充要条件可以证明,在到达最接近点时,本机的垂直速度还没有达到目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL}$ ,而刚好与入侵飞机的垂直速度  $\dot{Z}_I$  相等时,两架飞机之间的垂直间隔距离最小。图2给出了这种情况下两机之间的最小垂直间隔距离的预测模型。此时预测和计算本机在垂直方向上的投影高度分为两个区域:

(1)延迟区:本机以当前的垂直速度匀速飞行,由于飞行员的响应会导致  $2.5 \sim 5\text{ s}$  的时间延迟;

(2)匀加速区:本机以当前的垂直速度为初始速度,以  $Accel$  为加速度匀加速飞行,直到达到与入侵飞机的垂直速度  $\dot{Z}_I$  相等为止。

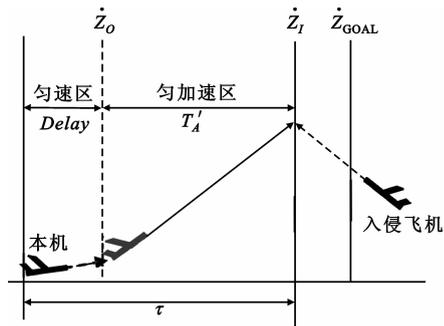


图2 垂直防撞物理模型之二

Fig.2 The second model of the vertical collision avoidance

由图2可知,经过  $\tau$  时间后,本机达到的垂直高度为

$$Z'_{OWN} = Z_0 + \dot{Z}_0 \times Delay + (\dot{Z}_0 \times T'_A + \frac{1}{2} \times Accel \times T'^2_A) \quad (4)$$

式中,  $Z_0$  为本机的初始高度值;  $\dot{Z}_0$  为本机的当前垂直速度;  $T'_A$  为本机加速花费的时间,并且有  $T'_A = |\dot{Z}_I - \dot{Z}_0| / Accel$ ;  $\dot{Z}_I$  为入侵飞机的垂直速度。

经过  $\tau$  时间后,入侵飞机达到的垂直高度仍然由公式(2)给出,此时  $\tau = Delay + T'_A$ 。

本机与入侵飞机在  $\tau$  时间后的高度差为

$$\Delta Z' = Z'_{OWN} - Z_{INT} \quad (5)$$

将以上两种物理模型计算出的本机与入侵飞机之间的垂直间隔距离值进行比较,取其中的最小值即为预测的两机之间的最小垂直间隔距离  $\Delta Z_{min}$ :

$$\Delta Z_{min} = \text{Minimum}(\Delta Z, \Delta Z') \quad (6)$$

## 2.2 仿真分析

根据本文给出的机载防撞系统垂直防撞的两种物理模型以及由该模型导出的计算公式,可以预测和计算采取垂直机动措施后本机与入侵飞机之间的垂直间隔距离值。根据本文给出的垂直防撞模型,我们设计了相应的计算机程序,对文献[6]中提供的本机与入侵飞机相遇的几十种情况进行了计算机模拟,模拟结果与 RTCA/DO185A 标准提供的输出文件一致。限于篇幅,本文中仅给出一个模拟示例,示例中两架飞机的相遇情形假定为:本机的初始高度为707 m,初始高度率为0 m/s;入侵飞机的初始高度为768 m,初始高度率为 +6.1 m/s;本机的标称加速度  $Accel = 2.4\text{ m/s}^2$ ,目的垂直速度为  $\pm 7.6\text{ m/s}$ ,响应时间  $Delay = 2.5\text{ s}$ ;本机的增大加速度  $Accel = 3.4\text{ m/s}^2$ ,目的垂直速度为  $\pm 12.7\text{ m/s}$ ,响应时间  $Delay = 5.0\text{ s}$ ;本机与入侵飞机到达最接近点的预留

时间  $\tau = 25$  s。图 3 给出了根据垂直防撞模型预测的本机在垂直方向采取机动飞行措施后,本机和入侵飞机的垂直高度随时间的变化曲线。

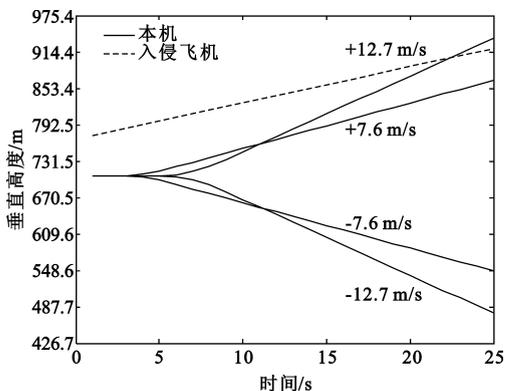


图 3 垂直高度随时间变化的预测曲线

Fig.3 Curves of the predicted vertical altitude versus time

表 1 给出了根据垂直防撞模型预测的本机采取垂直机动措施后,本机与入侵飞机之间的最小垂直间隔距离值。由表 1 可知,在模拟示例中两架飞机相遇的情形下,为了避免碰撞,本机下降比本机爬升将会产生更大的垂直间隔距离,并且本机不论以  $-7.6$  m/s 还是以  $-12.7$  m/s 作为目的垂直速度,都能够产生安全的垂直间隔距离。

表 1 最小垂直间隔距离的预测值

Table 1 Predicted values of the minimum vertical separation

$\dot{Z}_{GOAL}/(m/s)$	$Accel/(m/s^2)$	垂直间隔距离/m
+7.6	+2.4	-53.6
+12.7	+3.4	+16.8
-7.6	-2.4	-372
-12.7	-3.4	-443

### 3 垂直防撞措施的选择及处理逻辑

根据上述两种垂直防撞模型和计算公式,我们可以得到本机选择垂直机动(垂直决策咨询)的处理流程。垂直防撞决策主要有以下几个步骤:

(1)首先对入侵飞机进行监视和跟踪,同时进行碰撞威胁的探测。根据两架飞机之间的相对距离和相对距离变化率计算出到最接近点的预留时间  $\tau$ 、水平间隔距离  $HMD$  和垂直间隔距离  $VMD$ 。如果预测的两机在最接近点的水平间隔距离小于水平间隔距离的安全门限值  $HMD_{min}$ ,并且垂直间隔距离小于垂直间隔距离的安全门限值  $VMD_{min}$ ,那么就需要进

行垂直机动措施的选择,进入步骤 2;否则继续进行碰撞威胁的探测;

(2)利用本文给出的两种垂直防撞的物理模型,分别计算和模拟出本机在垂直方向上采取标称爬升和标称下降两种机动飞行措施后,在两架飞机之间的最接近点产生的垂直间隔距离  $\Delta Z_{CLIMB}$  和  $\Delta Z_{DESCEND}$ ,然后进行比较。如果  $\Delta Z_{CLIMB} > \Delta Z_{DESCEND}$ ,并且满足  $\Delta Z_{CLIMB} > VMD_{min}$ ,那么就选择标称爬升作为垂直防撞的机动措施,此时机载防撞系统提示飞行员以目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL} = +7.6$  m/s 爬升;如果  $\Delta Z_{CLIMB} < \Delta Z_{DESCEND}$ ,并且满足  $\Delta Z_{DESCEND} > VMD_{min}$ ,那么就选择标称下降作为垂直防撞的机动措施,此时机载防撞系统提示飞行员以目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL} = -7.6$  m/s 下降;如果飞机采取标称爬升和标称下降在最接近点产生的垂直间隔距离都不能达到垂直间隔距离的安全门限值  $VMD_{min}$ ,那么进入步骤 3;

(3)利用本文给出的两种垂直防撞的物理模型,分别模拟和计算出本机在垂直方向采取增大爬升和增大下降两种机动飞行措施后,在两架飞机的最接近点产生的垂直间隔距离  $\Delta Z_{CLIMB}$  和  $\Delta Z_{DESCEND}$ ,然后进行比较。如果  $\Delta Z_{CLIMB} > \Delta Z_{DESCEND}$ ,并且满足  $\Delta Z_{CLIMB} > VMD_{min}$ ,那么就选择增大爬升作为垂直防撞的机动措施,此时机载防撞系统提示飞行员以目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL} = +12.7$  m/s 爬升;如果  $\Delta Z_{CLIMB} < \Delta Z_{DESCEND}$ ,并且满足  $\Delta Z_{DESCEND} > VMD_{min}$ ,那么就选择增大下降作为垂直防撞的机动措施,此时机载防撞系统提示飞行员以目的垂直速度  $\dot{Z}_{GOAL} = -12.7$  m/s 下降;如果飞机采取增大爬升和增大下降在最接近点产生的垂直间隔距离都不能达到垂直间隔距离的安全门限值  $VMD_{min}$ ,那么就选择  $\Delta Z_{CLIMB}$  和  $\Delta Z_{DESCEND}$  中的较大者所对应的垂直机动(增大爬升或者增大下降)作为飞机避免碰撞的机动飞行措施;

(4)显示和输出垂直防撞机动措施的垂直决策咨询(VRA)信息。

### 4 结束语

如何准确预测和计算本机采取机动飞行措施后本机与入侵飞机在最接近点将产生的最小垂直间隔距离值,是机载防撞系统实现防撞功能的关键<sup>[8-9]</sup>。如何建立准确描述两架飞机之间的空中几何形态的

物理模型是设计机载防撞系统防撞算法的核心。本文给出的机载防撞系统垂直防撞的物理模型,能够正确预测和计算本机采取垂直机动的防撞措施后两机在最接近点产生的垂直间隔距离,在理论上为本机选择正确的垂直防撞机动措施提供了决策依据,同时也有助于从事机载防撞系统国产化的科技人员掌握 TCAS 的防撞原理和进行相关的软件开发。

## 5 致谢

感谢项目组的李琦同志在机载防撞系统防撞机制的计算机仿真方面提供的帮助。

## 参考文献:

- [1] Williamson T, Spencer N A. Development and Operation of the Traffic Alert and Collision Avoidance System(TCAS)[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(11): 1735 - 1744.
- [2] 周其焕. 交通警戒和避撞系统的技术特点和发展现状[J]. 航空电子技术, 1999, 30(2): 10 - 16.  
ZHOU Qi - huan. The technical characteristic and development and present situation of the traffic alert and collision avoidance system[J]. Avionics Technology, 1999, 30(2): 10 - 16. (in Chinese)
- [3] Kelly W E. Conflict detection and alerting for separation assurance systems[C]//Proceedings of 18th Digital Avionics System Conference. Louis, Missouri; [s. n. ], 1999: 35 - 44.
- [4] Shirakawa M, Sumiya Y, Ozeki S. A numerical evaluation method of the revised ACAS algorithms using smoothed spline interpolation[C]//Proceedings of 2000 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2000: 539 - 545.
- [5] 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 Yun - song, PENG Liang - fu, TONG Ling. Mathematics model for collision avoidance in traffic alert and collision avoidance system[J]. Journal of University of Electronic Sci-

ence and Technology of China, 2008, 37(4): 552 - 555 (in Chinese)

- [6] RTCA/DO - 185A, Minimum operational performance standards for traffic alert and collision avoidance systems II (TCAS II) airborne equipment[S].
- [7] Abdul - Baki B, Baldwin J, Rudel M - P. Independent validation and verification of the TCAS II collision avoidance subsystem[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2000, 15(8): 3 - 9.
- [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] Ennis R L, Zhao Y J. Defining appropriate inter - aircraft separation requirements[C]//Proceedings of AIAA 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum. Chicago, Illinois: AIAA, 2004: 1 - 12.

## 作者简介:

彭良福(1966 - ),男,四川成都人,1994年于电子科技大学获博士学位,现为高级工程师,主要从事机载防撞系统、信号与信息处理方面的研究;

PENG Liang - fu was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1966. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China(UESTC) in 1994. His research interests include traffic alert and collision avoidance system, signal and information processing.

Email: pengliangfu@126.com

林云松(1969 - ),男,四川成都人,1999年于电子科技大学获博士学位,现为副教授,主要从事机载防撞系统、自动控制理论及工程应用方面的研究。

LIN Yun - song was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1969. He received the Ph. D. degree from UESTC in 1999. He is now an associate professor. His research interests include traffic alert and collision avoidance system, automatic control theory and its engineering application.