

基于航空器航迹预推的飞行冲突探测模型

尹成义, 谭安胜

(海军大连舰艇学院舰船指挥系, 辽宁大连 116018)

摘要: 针对航空器飞行冲突的探测问题, 给出了航空器飞行冲突的基本概念。在假设航空器稳定飞行的前提下, 建立了航空器飞行航迹预推模型。以该模型为基础, 通过对两航空器最小水平距离的确定和水平方向存在安全风险的时间段内垂直距离的分析, 建立了飞行冲突探测模型, 并给出了飞行冲突探测的基本方法, 为飞行冲突的探测提供了理论依据。

关键词: 飞行冲突; 航迹预推; 冲突探测; 飞行安全

中图分类号: V271.4; TP273.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2015)12-0020-04

Flight Conflict Detection Model Based on Flight Path Prediction of Aircrafts

YIN Cheng-yi, TAN An-sheng

(Dept. of Surface Ship Command, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: Aiming at the problem of flight conflict detection, the basic concepts of aircraft flight conflict is introduced. Under the hypothesis of steady flight, a model of aircraft's flight path prediction is established. Based on this model, through calculating the minimum horizontal distance between two aircrafts and analyzing the vertical distance in the time of horizontal conflict, the model of flight conflict detection is established and the method for flight conflict detecting is presented, which provides a theoretical reference for flight conflict detecting.

Key words: flight conflict; flight path prediction; flight conflict detecting; flight safety

0 引言

随着民用航空的高速发展, 空中交通流量日益增长, 使得发生飞行冲突的可能性大大增加。在军事航空领域, 随着作战空域的范围限制和作战节奏的急剧加快, 军用飞机空中相撞的风险也急剧增加。为了提高民用航空的飞行安全与效益, 减少军用航空器的误撞事故、提高作战效能, 必须对飞行冲突进行有效预防。

飞行冲突预防的基本前提是飞行冲突探测, 即依据掌握的航空器位置和运动要素, 通过一定方法对当前及未来一段时间内航空器之间的飞行冲突情况进行预测, 从而为调整航空器飞行轨迹、消除飞行冲突提供依据^[1]。

文献[2-4]采用概率方法计算航空器相撞的风

险概率, 在理论上更接近飞行冲突的本质, 但具体使用时相关误差值不易获取, 同时得到的结果是概率值, 也不易对是否存在飞行冲突给出确切结果, 因此实际应用受限; 文献[5-7]采用预测航空器航迹的确定性方法来研究飞行冲突问题, 但没有充分考虑两飞行器垂直距离变化的影响。本文通过在三维空间上预测航空器航迹, 对航空器的水平冲突和垂直冲突进行了相关动态研究。

1 航空器飞行冲突的基本概念

在航空活动和空域管理过程中, 飞行冲突是指正在飞行的两航空器之间的距离接近到一定程度, 使飞行安全受到威胁的一种状态^[7-8]。飞行冲突不同于空中相撞, 空中相撞是指两架以上空中飞行的航空器实体在三维空间上位置的相互占用或重叠现象。即“相撞”是两架航空器发生机体接触, 而飞行冲突则在相撞之前就已经发生了, 也就是说, 通常并不是在两架航空器发生接触后, 才认为构成了飞行冲突, 而是当航空器

之间的距离小于一定的“安全间隔”时,就认为有了飞行冲突^[9]。

一次空中相撞事故的发生,总是以无相撞风险、飞行冲突和空中相撞这样固定逻辑顺序发生的^[10]。如果及时发现和有效控制飞行冲突环节,实现危险状态向无相撞风险状态转化,空中相撞事故链就会中断。因此,为保证飞行安全,应及时对飞行冲突进行探测,并进行相应的飞行调整,从而保证飞行安全。

2 基于航迹预推的飞行冲突探测模型

由于航空器飞行速度普遍较快,若两架航空器的相对位置已经处于飞行冲突状态后才做出判断,并指挥航空器进行飞行状态调整,往往为时已晚,航空器可能已来不及进行相应调整。因此,必须在航空器未处于飞行冲突时提前对其进行预测,而要想提前进行飞行冲突预测,则必须对航空器的航迹进行预测^[5-7],并依据航迹预测模型来判断飞行冲突。

2.1 基本假设

为预测飞行冲突,首先应对冲突产生的前提条件进行一定的假设:

- 1) 飞行中,航空器被看成一个有方向的质点,其运动方向就是航空器的飞行航向;
- 2) 飞行中,飞行员随时修正航空器因风影响和仪表误差等原因所产生的航迹偏差,按预定航迹飞行;
- 3) 航空器之间的水平安全间隔定义为 D_s ,垂直安全间隔定义为 D_v ;
- 4) 仅考虑两架航空器之间的空间位置关系。

2.2 模型建立

为研究方便,以真北方向为 y 轴, x 轴指向东方, z 轴向上建立三维直角坐标系,如图 1 所示。

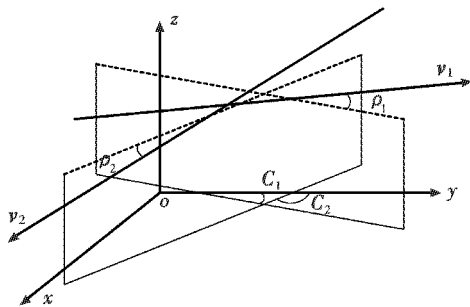


图 1 交叉航线飞行冲突示意图

Fig. 1 Flight conflict of crossed flight course

设两架航空器 I 和 II 沿各自航线飞行,飞行速度分别为 v_1 和 v_2 ,航向(飞行航线与 x 轴的夹角)分别为 C_1 和 C_2 ,爬升角(飞行航线与水平方向的夹角)分别为 ρ_1 和 ρ_2 ,雷达建立目标航迹时二者的位置分别为 (x_1^0, y_1^0, h_1^0) 和 (x_2^0, y_2^0, h_2^0) ,若认为二者航速、航向、爬升

角保持不变,则时间 t 后,航空器 i ($i = 1, 2$) 的位置可表示为

$$\begin{cases} x_i(t) = x_i^0 + v_i t \cos \rho_i \cos \alpha_i \\ y_i(t) = y_i^0 + v_i t \cos \rho_i \sin \alpha_i \\ h_i(t) = h_i^0 + v_i t \sin \rho_i \end{cases} \quad (1)$$

根据坐标轴及航向的定义可知

$$\alpha_i = \begin{cases} 90^\circ - C_i & 0 \leq C_i \leq 270^\circ \\ 450^\circ - C_i & 270^\circ < C_i < 360^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中, α_i 为航向 C_i 与 x 轴正向的夹角, $i = 1, 2$ 。

根据式(1)可计算时间 t 后,两架航空器的水平距离 $D(t)$,则

$$\begin{aligned} D^2(t) &= (x_1(t) - x_2(t))^2 + (y_1(t) - y_2(t))^2 = \\ &= (v_1 \cos \rho_1 \cos \alpha_1 - v_2 \cos \rho_2 \cos \alpha_2)^2 t^2 + \\ &= (v_1 \cos \rho_1 \sin \alpha_1 - v_2 \cos \rho_2 \sin \alpha_2)^2 t^2 + \\ &= 2(x_1^0 - x_2^0)(v_1 \cos \rho_1 \cos \alpha_1 - v_2 \cos \rho_2 \cos \alpha_2)t + \\ &= 2(y_1^0 - y_2^0)(v_1 \cos \rho_1 \sin \alpha_1 - v_2 \cos \rho_2 \sin \alpha_2)t + \\ &= (x_1^0 - x_2^0)^2 + (y_1^0 - y_2^0)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

若令 $\Delta x = x_1^0 - x_2^0$, $\Delta y = y_1^0 - y_2^0$, $D_0 = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$, $\Delta v_x = v_1 \cos \rho_1 \cos \alpha_1 - v_2 \cos \rho_2 \cos \alpha_2$, $\Delta v_y = v_1 \cos \rho_1 \sin \alpha_1 - v_2 \cos \rho_2 \sin \alpha_2$,则式(3)可化为

$$D^2(t) = ((\Delta v_x)^2 + (\Delta v_y)^2)t^2 + 2(\Delta x \Delta v_x + \Delta y \Delta v_y)t + D_0^2 \quad (4)$$

若 $(\Delta v_x)^2 + (\Delta v_y)^2 \neq 0$,则式(4)为一条抛物线,且 $(\Delta v_x)^2 + (\Delta v_y)^2 > 0$,因此 $t = 0$ 时, $\frac{dD^2(t)}{dt} \Big|_{t=0} \geq 0$,即

$$\Delta x \Delta v_x + \Delta y \Delta v_y \geq 0 \quad (5)$$

则说明两架航空器的水平距离呈不断增加的趋势,两架航空器不存在碰撞的风险;若 $\Delta x \Delta v_x + \Delta y \Delta v_y < 0$,则说明二者水平距离呈不断减小的趋势,有发生碰撞的风险,为判断二者在水平方向上是否可能碰撞,式(3)对 t 求导,得

$$\frac{dD^2(t)}{dt} = 2((\Delta v_x)^2 + (\Delta v_y)^2)t + 2(\Delta x \Delta v_x + \Delta y \Delta v_y) \quad (6)$$

令式(6)等于 0,解得

$$t = -\frac{\Delta x \Delta v_x + \Delta y \Delta v_y}{(\Delta v_x)^2 + (\Delta v_y)^2} \quad (7)$$

将式(7)代入式(4),可得二者的最小水平距离为

$$D_{\min} = \sqrt{D_0^2 - \frac{(\Delta x \Delta v_x + \Delta y \Delta v_y)^2}{(\Delta v_x)^2 + (\Delta v_y)^2}} = \sqrt{\frac{(\Delta x \Delta v_y - \Delta y \Delta v_x)^2}{(\Delta v_x)^2 + (\Delta v_y)^2}} \quad (8)$$

设保证飞行安全的水平间隔标准为 D_s ,若 $D_{\min} > D_s$,则说明两架航空器在不改变当前飞行状态时,不存在相撞风险,即没有飞行冲突;若 $D_{\min} \leq D_s$,则说明两架航空器水平间隔存在安全风险,这时两架航空器是

否存在安全风险还需考虑在水平间隔存在安全风险时的垂直间隔。若设建立目标航迹时为0时刻,即 $t=0$,则存在水平安全风险的时间 t 应满足 $((\Delta v_x)^2 + (\Delta v_y)^2)t^2 + 2(\Delta x\Delta v_x + \Delta y\Delta v_y)t + (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 \leq D_s^2$,解得对应的时间段为

$$t^- \leq t \leq t^+ \quad (9)$$

其中: $t^- = \{ -(\Delta x\Delta v_x + \Delta y\Delta v_y) - [(\Delta x\Delta v_x + \Delta y\Delta v_y)^2 - ((\Delta v_x)^2 + (\Delta v_y)^2)(D_0^2 - D_s^2)]^{1/2} \} / [(\Delta v_x)^2 + (\Delta v_y)^2]$,
 $t^+ = \{ -(\Delta x\Delta v_x + \Delta y\Delta v_y) + [(\Delta x\Delta v_x + \Delta y\Delta v_y)^2 - ((\Delta v_x)^2 + (\Delta v_y)^2)(D_0^2 - D_s^2)]^{1/2} \} / [(\Delta v_x)^2 + (\Delta v_y)^2]$,则 $t \in [t^-, t^+]$ 时,两架航空器的垂直间隔不能小于垂直间隔标准,否则两架航空器即存在飞行冲突。

根据式(1)可知,两架航空器在任意时刻的高度差为

$$H(t) = h_1(t) - h_2(t) = h_1^0 + v_1 t \sin \rho_1 - h_2^0 - v_2 t \sin \rho_2 \quad (10)$$

对式(10)求导,可得两架航空器在垂直方向上的接近率 $Z = \frac{dH(t)}{dt} = v_1 \sin \rho_1 - v_2 \sin \rho_2$,由于高度差 $H(t)$ 可正可负,为判断两架航空器垂直距离的变化趋势,令

$$Z_H = \frac{v_1 \sin \rho_1 - v_2 \sin \rho_2}{h_1(0) - h_2(0)} \quad h_1(0) \neq h_2(0) \quad (11)$$

根据式(11)可知以下3点。

1) 若 $Z_H \geq 0$,则两架航空器垂直距离呈不断增加的趋势,若 $|H(t^-)| > D_v$,表明二者在水平间隔存在安全风险时,其垂直间隔不存在风险,即二者不存在飞行冲突;否则,二者在水平间隔存在安全风险时,垂直间隔也存在风险,即二者存在飞行冲突。

2) 若 $Z_H < 0$,则两架航空器垂直距离呈不断减小的趋势,若 $|H(t^+)| > D_v$,表明二者在水平间隔存在安全风险时,垂直间隔不存在风险,即二者不存在飞行冲突;否则,二者在水平间隔存在安全风险时,垂直间隔也存在风险,即二者存在飞行冲突。

3) 若 $h_1(0) = h_2(0)$,则说明两架航空器初始时处于同一高度,若二者垂直方向上的接近率 $Z=0$,则说明它们始终处于同一飞行高度,当水平方向存在碰撞风险时,二者必存在飞行冲突;若 $Z \neq 0$,则二者垂直距离呈不断增加的趋势,若 $|H(t^-)| > D_v$,则二者不存在飞行冲突,否则存在飞行冲突。

2.3 飞行冲突判定方法

根据以上模型,对空域中多架航空器的飞行冲突进行判定时,首先建立各航空器的航迹模型,然后由任意两架航空器的航迹组成航迹对,再分三步进行判断:1)对航迹对进行粗选,根据式(5)判断两架航空器水平距离的变化趋势,滤除掉明显不会发生冲突(即水平

距离不断增加)的航迹对,以此减少计算量;2)对剩余的航迹对根据式(8)判断最小水平距离,将最小水平距离小于水平安全间隔标准的航迹对滤除;3)对剩余的航迹对根据式(11)判断垂直距离的变化趋势,并根据垂直距离的变化趋势对航迹对对应的航空器的飞行冲突状态进行判断。

2.4 实例应用

设在同一空域内有4架飞机同时飞行,建立目标航迹时,各架飞机的初始位置、航速、航向、飞行高度和爬升角等飞行参数如表1所示。

表1 各飞机的飞行参数

Table 1 The flight parameters of each plan

飞机编号	初始位置/ km	航速/ (km·h ⁻¹)	航向/ (°)	飞行高度/ m	爬升角/ (°)
I	(40, 20)	800	195	9500	0
II	(0, 0)	790	120	10 000	0
III	(20, 30)	800	15	9000	0
IV	(50, -20)	780	300	6400	5

设水平安全间隔标准 $D_s = 10$ km,垂直安全间隔标准 $D_v = 1000$ m。则由表1中数据,利用式(5)判断水平距离变化情况及使用式(8)计算得各飞机航迹对对应的最小水平距离,如表2所示。

表2 各飞机航迹对对应的最小水平距离

Table 2 The minimum horizontal interval of the planned flight paths

参数	飞机航迹对					
	(I,II)	(I,III)	(I,IV)	(II,III)	(II,IV)	(III,IV)
$\Delta x\Delta v_x + \Delta y\Delta v_y$	<0	>0	<0	>0	<0	<0
最小水平距离/km	2.8	-	5.6	-	7.8	57.8
$(t^-, t^+)/s$	-	-	(93, 142)	-	(107, 137)	-
$H(t^+)/m$	500	-	431	-	1010	-

由表2中的数据可以看出,飞机航迹对(I, III), (II, III)对应的两架飞机水平距离呈不断增大的趋势,不存在飞行冲突,予以剔除。飞机航迹对(III, IV)的最小水平距离大于水平安全间隔标准,因此它们之间也不存在飞行冲突。

飞机航迹对(I, II), (I, IV)及(II, IV)最小水平距离小于水平安全间隔标准,其中航空器I和II均为水平飞行,且高度差仅有500 m,因此,二者必存在飞行冲突。

飞机IV处于爬升飞行,且根据式(11)可知其与飞机I和II的垂直距离均呈逐渐较小的趋势。为此,由式(9)计算其存在水平安全风险的时间段,如表2中倒数第二行所示。由式(10)可以计算在时间 (t^-, t^+) 内的相应飞机对的最小高度差 $H(t^+)$,如表2中最后一行所示。由表中数据可以看出,飞机I和IV在对应的 (t^-, t^+) 内最小高度差为431 m,小于垂直间隔标

准,即二者存在飞行冲突;而飞机 II 和 IV 在对应的(t^- , t^+)内最小高度差为 1010 m,大于垂直间隔标准,因此二者不存在飞行冲突。

经过水平和垂直两个方向的综合判断,存在飞行冲突的飞机对为 I 和 II, II 和 IV。

3 结束语

本文在假设航空器始终保持直线、匀速飞行条件下建立飞行冲突探测模型和冲突探测方法,具有模型简单、计算方便等优点,但本模型没有考虑各种误差因素及飞行员的意图,因此,模型主要适用于民航飞机及军用飞机的航线飞行阶段的飞行冲突探测。但本文的研究思路,也适用于可预测的非直线匀速飞行的航空器,但对于空战中大机动飞行的情况,由于难以预测其下阶段的飞行轨迹,必须采用其他方法解决。

参考文献

- [1] HAVEL K, HUSARCLK J. A theory of the tactical conflict prediction of a pair of aircraft[J]. The Journal of Navigation, 1989, 42(3):417-429.
- [2] 张权,吴振亚. 一种适用于机动飞行的航行冲突探测方法[J]. 微计算机信息, 2010, 26(10):194-196. (ZHANG Q, WU Z Y. Algorithm of probabilistic conflict detection for maneuvering flight[J]. Microprocessors Information, 2010, 26(10):194-196.)
- [3] 陈晨,崔德光,程朋. 空中交通管制中改进型冲突探测算法研究与应用[J]. 计算机工程与应用, 2002(19):250-253. (CHEN C, CUI D G, CHENG P. Research and application of an improved conflict detection algorithm for air traffic control[J]. Computer Engineering and Application, 2002(19):250-253.)
- [4] 梅丹,吴文海,徐家义,等. 现代空战条件下的飞行冲突探测与解脱[J]. 电光与控制, 2007, 14(6):131-134. (MEI D, WU W H, XU J Y, et al. Flight conflicts detection and elusion in modern air combat [J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(6):131-134.)
- [5] 王绍平,崔德光. 空中交通控制的冲突探测算法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2004, 44(10):1368-1371. (WANG S P, CUI D G. Conflict detection algorithm for air traffic control [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(10):1368-1371.)
- [6] 舒红平,游至胜,刘健波. 基于飞行姿态的潜在冲突预警算法[J]. 计算机工程, 2004, 30(15):28-30. (SHU H P, YOU Z S, LIU J B. Potential conflict alert algorithm based on flight posture[J]. Computer Engineering, 2004, 30(15):28-30.)
- [7] 李彬,吴珍珍. 基于航迹预测的飞行冲突探测[J]. 微处理器, 2011, 4(2):73-75. (LI B, WU Z Z. Flight conflict detection based on flight path prediction[J]. Microprocessors, 2011, 4(2):73-75.)
- [8] PETER C. A review of conflict detection and resolution modeling methods [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2000, 1(4):179-189.
- [9] 陈志杰. 空域管理理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2012. (CHEN Z J. Theory and method of airspace management[M]. Beijing: Science Press, 2012.)
- [10] 乔柯. 程序管制[M]. 西安:空军工程大学, 2009. (QIAO K. Procedure air control [M]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2009.)
- [6] 谢丽霞,王亚超,于巾博. 基于神经网络的网络安全态势感知[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2013, 53(12):1750-1760. (XIE L X, WANG Y C, YU J B. Network security situation awareness based on neural networks[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2013, 53(12):1750-1760.)
- [7] MARINAKIS Y, MARINAKI M. A hybrid multi-swarm particle swarm optimization algorithm for the probabilistic traveling salesman problem [J]. Computers and Operations Research, 2010, 37(3):432-442.
- [8] 王劲松,邹磊,孙雪飞. 基于灰色模糊综合评价的网络作战能力评估[J]. 现代防御技术, 2013, 41(4):74-81. (WANG J S, ZOU L, SUN X F. Research on gray fuzzy comprehensive of net war capability[J]. Modern Defense Technology, 2013, 41(4):74-81.)
- [9] TRANTAFYLLOU M, BODSON M. Real time prediction of marine vessel motion using Kalman filtering techniques[C]//Proceedings of OTC, Texas: Houston, 1982:4343-4388.
- [10] 尚军亮,方敏. 一种优化的高精度灰色 GM(1,1) 预测模型[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(6):1301-1305. (SHANG J L, FANG M. New optimized method of high-precision grey GM(1,1) forecasting model[J]. Journal of Electronics and Information, 2010, 32(6):1301-1305.)
- [11] 刘小丽,王申涛,代睿,等. 基于改进的粒子群优化的神经网络故障诊断方法研究[J]. 计算应用与软件, 2011, 28(1):207-209. (LIU X L, WANG S T, DAI R, et al. On fault diagnosis of neural network based on improved particle swarm optimization[J]. Computer Applications and Software, 2011, 28(1):207-209.)

(上接第19页)