

文章编号:1674-8190(2017)04-394-07

# 基于 ADS-B 信息的通航飞行冲突避让算法研究

程擎, 黄俊贤, 郭文豪

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 广汉 618307)

**摘要:** 随着低空空域的开放和通用航空的发展, 低空空域流量大幅增加, 致使飞机飞行冲突事件呈多发态势。为了解决低空冲突问题, 基于广播式自动相关监视(ADS-B)信息的避让算法, 首先利用相对运动关系对本机周围的飞行状况进行分析, 排除不存在危险冲突的航空器; 然后针对危险接近的航空器, 提出调整速度和改变航向两种避让策略; 最后利用 Matlab 软件, 对两种避让算法进行仿真分析。结果表明: 算法正确有效, 能够快速辨别飞行冲突, 并给出合理的避让策略; 调整航向的避让算法, 其有效性优于调整速度的避让算法, 但在实际飞行中, 由于调整速度的避让方法更易操作且节约成本, 应优先选择调整速度的避让方案。

**关键词:** 通航; 飞行冲突; 广播式自动相关监视; 相对运动; 冲突探测; 冲突避让

中图分类号: V328.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.04.005

## Research on Flight Conflict Avoidance Algorithm Based on ADS-B Information for General Aviation

Cheng Qing, Huang Junxian, Guo Wenhao

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** With the opening of low-altitude and development of general aviation, low-altitude airspace flow will increase dramatically, this is bound to cause more flight conflicts. To solve the problem of low-altitude conflict, a conflict avoidance algorithm based on ADS-B information is presented to offer the pilot with reasonable avoidance strategy if needed. Firstly, the safe aircraft is excluded after analyzing situation around the plane by using relative motion. And then collision resolution strategy for the potential conflict aircraft is researched, including course change and speed change. Finally, the algorithm is verified by computer simulation. Simulation results show that this algorithm is correct and effective, which can quickly find the flight conflict and give collision resolution strategy, and the validity of course change is better than speed change.

**Key words:** general aviation; flight conflict; automatic dependent surveillance-broadcast(ADS-B); relative motion; conflict survey; conflict avoiding

## 0 引言

我国的航空商业运输主要集中于高空空域, 有关高空空域的管理和硬件设施等研究均取得了丰硕的研究成果, 而对于低空空域的研究则较少, 制约了民航业的进一步发展<sup>[1]</sup>。据统计, 美国通用航

空机群占全美注册民用航空器的 96%, 且这些飞机的累计飞行小时占民用飞行器总飞行小时的 80%。可见, 我国若想由航空大国发展成为航空强国, 在低空空域的通航飞行上必须有所突破。

不同于中高空飞行, 通用航空飞行器上并未安装、也不适合安装空中交通警戒与防撞系统(Traffic Alert and Collision Avoidance System, 简称 TCAS)<sup>[2]</sup>, 因此, 无法进行有效的冲突探测和避让, 这已成为限制通航流量增长的一个重要因素。随着广播式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, 简称 ADS-B)的迅速发展,

收稿日期: 2017-07-18; 修回日期: 2017-09-16

基金项目: 中国民用航空飞行学院研究生创新项目(X2016-59)

通信作者: 黄俊贤, 510814240@qq.com

ADS-B 信息在民航领域得到了广泛应用,例如,罗文田等<sup>[3]</sup>提出了基于 ADS-B 数据的飞机预警防撞算法,该算法通过在航空器周围建立碰撞区和保护区,并确定告警门限来达到防撞的目的;戴超成等<sup>[4]</sup>提出了采用 ADS-B 的冲突飞机选择算法,通过矢量比较排除无碰撞风险的航空器,提高了计算机对冲突的预测效率;R. Chamlou 等<sup>[5]</sup>给出了两种采用 ADS-B 的防撞算法:一种是结合 TCAS 系统和 ADS-B 信息评估航空器之间距离和高度的变化率,以达到防撞的目的,另一种是三维空间中航空器之间的冲突探测和解脱方法。但多数研究并未综合考虑低空飞行情况,所建立的冲突探测或避让算法不能完全适用于通航飞行。

ADS-B 具有价格低,方位、速度信息精度高,监视范围广,高速更新数据等特点<sup>[3]</sup>。通过 ADS-B 信息可实现飞行信息共享,使监视人员获取本区域或跨区域航空器飞行的监视信息;加强空-空协同,实现航空器之间的相互监视;最重要的是可有效避免因监视问题而引起的飞行冲突。此外,ADS-B 还可用于机场的地面活动区域,实现对场面上的航空器进行全方位管理,建立一种不依靠监视雷达的新型管理手段。因此,ADS-B 必将成为未来通航的主要监视技术<sup>[6]</sup>。建立一个适用于通用航空的基于 ADS-B 信息的冲突探测和避让算法对于提高中低空飞行流量,改善飞行环境,促进通航发展具有重要意义。

本文主要研究基于 ADS-B 的通航飞行冲突避让算法,通过 ADS-B 中包含的丰富信息,对飞机间的运动状态进行分析,并根据飞行性能提出合适的避让策略,以期提高通航飞行的安全性。

## 1 算法建立

结合实际,建立算法之前存在如下前提:

(1) ADS-B 是利用空-空和地-空通信手段,以先进的导航系统及其他机载设备产生的信息为数据源,通过对外发送自身的状态参数,例如 4D 位置、3 维速度、航迹(向)角信息等,同时也接收他机广播的状态参数信息,达到飞机与飞机之间、飞机与地面站之间的监视目的<sup>[7-8]</sup>。由于 ADS-B 的位置信息来源于全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,简称 GNSS)<sup>[9]</sup>,速度航向信息来源于飞机本身,且信息更新速度快,达到 1 次/s 或 2 次/s,完

全能够实时反映飞机的状态。

(2) 对于低空通航飞机,其避免冲突的方式主要是高度调整、速度调整和改变航向<sup>[10]</sup>,而针对水平方向上的速度和角度调整,目前仍缺乏有效的系统来提供所需信息,即使是成熟的 TCAS II 系统也无法提供水平方向上的冲突解决方案,只能提供垂直方向上的避让建议<sup>[11]</sup>,故本文主要研究调速和改航算法。

(3) 除起飞和降落阶段外,低空飞机一般是在固定的高度飞行,不会轻易改变飞行高度<sup>[12]</sup>,而两架不同高度的航空器也不存在飞行冲突,故将研究问题转化为平面问题。

(4) 航空器在二维上存在水平安全距离  $R$  和保护区,并且保护区是以  $R$  为半径的圆。当两架飞机的“圆”区域相交时,即认为发生冲突。

飞机物理运动几何关系如图 1 所示。

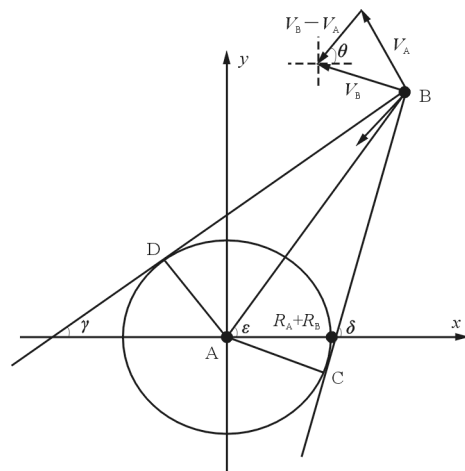


图 1 飞机物理运动几何关系图

Fig. 1 Physical-geometry relation of the aircraft

坐标系建立:以北端作为坐标系  $y$  轴正方向,将本机(飞机 A)置于原点,并沿某一方向以某一速度飞行。定义飞机水平安全间隔  $R$ ,其在不同飞行规则和管制条件下取值不同。引入联合保护区的概念,即将其中一架飞机的保护圆叠加到另一架飞机上,将两个保护圆的冲突避让问题简化为质点与叠加保护圆的冲突避让问题。例如将飞机 A 在原水平安全间隔  $R_A$  的基础上叠加  $R_B$ ,使问题简化为他机(飞机 B)与水平安全间隔为  $R_A + R_B$  的飞机 A 的冲突避让问题。因此以飞机 A 为原点, $R_A + R_B$  为半径的圆内若有飞机 B 的存在,则两机的保护区域必然已发生交叉,即发生飞行冲突。故本

文讨论的范围不包含以飞机 A 为原点,  $R_A + R_B$  为半径的圆形区域, 且飞机 B 在此区域内沿某一方向以某一速度飞行。算法需要充分利用 ADS-B 报文提供的信息, 例如坐标、航向角、速度等。

## 2 冲突探测

第一步: 由于 ADS-B 传输的信息包含了飞机

$$S'_{AB} = \sqrt{[(X_A + \Delta X_A) - (X_B + \Delta X_B)]^2 + [(Y_A + \Delta Y_A) - (Y_B + \Delta Y_B)]^2} \quad (2)$$

若  $S_{AB} > S'_{AB}$ , 则两架飞机正在不断接近, 应对其进行第二步冲突判断; 若  $S_{AB} \leq S'_{AB}$ , 则两架飞机不存在冲突。

第二步: 由于 ADS-B 报文包含了飞机的三维速度信息, 且此速度信息同样使用 WGS-84 坐标, 设两架飞机的速度分别为  $\mathbf{V}_A = (V_A \sin \alpha, V_A \cos \alpha)$  和  $\mathbf{V}_B = (V_B \sin \beta, V_B \cos \beta)$ ,  $\alpha$  为飞机 A 的航向角,  $\beta$  为飞机 B 的航向角。

$$\mathbf{V}_B - \mathbf{V}_A = (V_B \sin \beta - V_A \sin \alpha, V_B \cos \beta - V_A \cos \alpha) \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{V}_B - \mathbf{V}_A$  为飞机 B 相对于飞机 A 的运动速度矢量, 即视飞机 A 静止, 飞机 B 的相对运动速度方向和大小。

飞机 B 相对运动轨迹的斜率  $K$  为

$$K = \tan \theta = \frac{V_B \cos \beta - V_A \cos \alpha}{V_B \sin \beta - V_A \sin \alpha} \quad (4)$$

结合飞机 B 的坐标, 得相对运动轨迹方程为

$$Kx - y + (Y_B - KX_B) = 0 \quad (5)$$

若飞机 B 在此运动轨迹上与飞机 A 的最接近点大于等于联合保护区半径, 则两架飞机不存在冲突; 反之, 则有碰撞风险。两架飞机最接近的距离为

$$\min S_{AB} = \left| \frac{KX_A - Y_A + (Y_B - KX_B)}{\sqrt{K^2 + 1}} \right| \quad (6)$$

若  $\min S_{AB} \geq R_A + R_B$ , 则两架飞机无冲突; 若  $\min S_{AB} < R_A + R_B$ , 则两架飞机存在碰撞风险, 需要进行避让。

## 3 避让算法研究

### 3.1 调速算法

如图 1 所示,  $\mathbf{V}_B - \mathbf{V}_A$  斜率对应的角度为  $\theta$ , 为了安全避让, 应使  $\theta \leq \gamma$  或  $\theta \geq \delta$ , 才能保证两架飞机在飞行中不会发生保护区的交叉。而由两架飞机

的三维位置, 不仅能显示飞机的经纬度, 还能显示基于 WGS-84 坐标系下的几何位置坐标。故设两架飞机的位置分别为  $(X_A, Y_A)$  和  $(X_B, Y_B)$ 。当飞机接收到他机发送的 ADS-B 报文时, 可根据两架飞机的坐标判断相互间的距离  $S_{AB}$ :

$$S_{AB} = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2} \quad (1)$$

随时间推移, 有:

的坐标可求得他们之间的距离  $S_{AB}$  和直线 AB 的斜率  $K_2$ :

$$K_2 = \tan \epsilon = \frac{Y_B - Y_A}{X_B - X_A} \quad (7)$$

由  $S_{AD} = S_{AC} = R_A + R_B$  和正弦定理可得:

$$\angle ABD = \arcsin \frac{S_{AD}}{S_{AB}} \quad (8)$$

则进行避让时, 应使

$$\begin{cases} \theta \leq \gamma \\ \gamma = \epsilon - \angle ABD \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{或} \quad \begin{cases} \theta \geq \delta \\ \delta = \epsilon + \angle ABC \end{cases} \quad (10)$$

设  $V_{A\text{调}}$  为飞机 A 调整后的速度大小, 因为

$$\tan \gamma = \frac{V_B \cos \beta - V_{A\text{调}} \cos \alpha}{V_B \sin \beta - V_{A\text{调}} \sin \alpha} \quad (11)$$

$$\tan \delta = \frac{V_B \cos \beta - V_{A\text{调}} \cos \alpha}{V_B \sin \beta - V_{A\text{调}} \sin \alpha} \quad (12)$$

则

$$\left. \begin{aligned} V_{A\text{调}} &= \frac{V_B (\cos \beta - \tan \gamma \sin \beta)}{\cos \alpha - \tan \gamma \sin \alpha} \\ \text{或} \quad V_{A\text{调}} &= \frac{V_B (\cos \beta - \tan \delta \sin \beta)}{\cos \alpha - \tan \delta \sin \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$V_{A\text{调}}$  应在飞机速度上下限范围以内。由此可得调整的速度  $\Delta V = V_{A\text{调}} - V_A$ , 结果正号为加速, 负号为减速。若为加速, 则  $\max V_A - V_A \geq \Delta V \geq V_{A\text{调}} - V_A$ ; 若为减速, 则  $V_{A\text{调}} - V_A \geq \Delta V \geq \min V_A - V_A$ 。

### 3.2 调整航向算法

设  $\alpha_{\text{调}}$  为调整后的飞机航向, 要使飞机 B 从左面通过, 则

$$\tan \gamma \sin \alpha_{\text{调}} - \cos \alpha_{\text{调}} = \frac{V_B (\tan \gamma \sin \beta - \cos \beta)}{V_A} \quad (14)$$

由三角函数公式得

$$\sin\left(\alpha_{\text{调}} + \arctan \frac{-1}{\tan\gamma}\right) = \frac{V_B(\tan\gamma\sin\beta - \cos\beta)}{V_A \sqrt{\tan^2\gamma + 1}} \quad (15)$$

若式(15)中等号右边的绝对值大于 1,则表示此情况无法仅通过调整航向使飞机 B 由左侧通过;若右边的绝对值小于 1,则

$$\alpha_{\text{调}} = \arcsin\left[\frac{V_B(\tan\gamma\sin\beta - \cos\beta)}{V_A \sqrt{\tan^2\gamma + 1}} - \arctan \frac{-1}{\tan\gamma}\right] \quad (16)$$

同理,要使飞机 B 从右侧通过,则

$$\alpha_{\text{调}} = \arcsin\left[\frac{V_B(\tan\gamma\sin\beta - \cos\beta)}{V_A \sqrt{\tan^2\delta + 1}} - \arctan \frac{-1}{\tan\delta}\right] \quad (17)$$

实际飞行中,飞机的调整角度应控制在  $90^\circ$  范围内,故  $\alpha_{\text{调}} \in (\alpha - 90^\circ, \alpha + 90^\circ)$ 。

### 4 算法仿真

根据上述调整速度和角度的避让算法,飞机 A 可通过接收飞机 B 的 ADS-B 报文,确定其相对于本机的坐标和运动速度,并根据实时变化的报文数据,确定其是否对本机存在潜在威胁,如果存在潜在威胁,则应进行速度或角度调整。现通过 Matlab R2008a 版本软件进行仿真实验,以验证算法的实用性和正确性,仿真流程如图 2 所示。

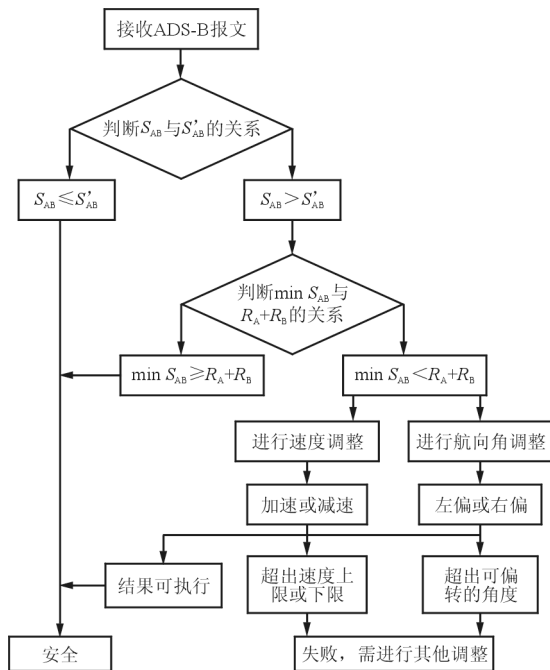


图 2 仿真流程图

Fig. 2 Simulation flow chart

研究区域是以本机为中心,30 km 范围的圆区域,飞机 A 的坐标为(0,0),飞机 B 的坐标为( $X_B, Y_B$ ),两机的航向角范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ ,联合保护区半径为 5 km<sup>[13]</sup>,飞行速度上下界设置如表 1 所示,采用部分典型的通航飞机数据作为基础,具体数据由 Matlab 随机产生。

表 1 飞机飞行速度的上下界

Table 1 The upper and lower bounds of aircraft flight speed

机 型	最大速度/(km · h <sup>-1</sup> )	失速速度/(km · h <sup>-1</sup> )
DA20	340	78
DA42	356	126
172R	302	87
TB20	247	97

仿真过程中,在本机周围随机产生某型飞机,研究两机的飞行状态和位置情况,并判断是否存在冲突。累计实验 1 000 次后,冲突探测算法的排除效果和飞机的分布情况如图 3 所示。

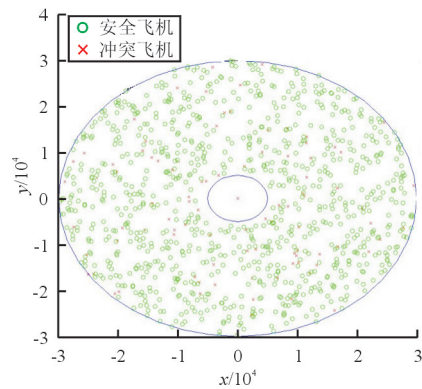


图 3 安全飞机排除情况

Fig. 3 Exclude the security plane

从图 3 可以看出:在 1 000 次实验中,共排除 906 次安全飞行,筛选出 94 次存在冲突的情况,表明冲突探测算法可有效筛选冲突飞机。

对于调整速度的避撞实验,产生的数据如下:飞机 A(0,0),速度 245 km/h,航向角  $180^\circ$ ,机型 DA20;飞机 B(-18 242, -19 925),速度 210 km/h,航向角  $170^\circ$ ,机型 TB20。根据探测算法,确认两架飞机在未来某时刻存在交叉冲突。

根据上述数据,由调整速度算法计算可得:当飞机 A 减速至 234 km/h 或加速至 265 km/h 时,

未来两机将不存在飞行冲突。飞机进行调速后,可使两机的最接近距离不小于 5 km,即成功地避免了冲突问题,如图 4~图 5 所示。

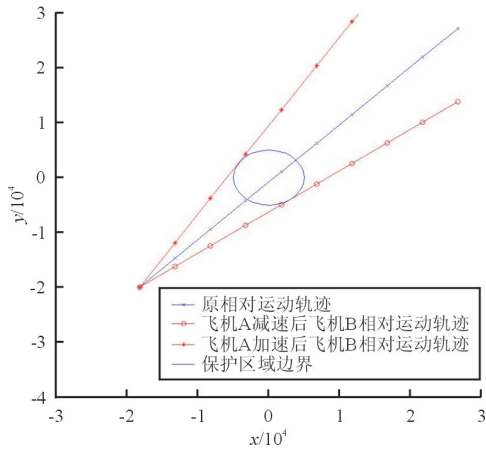


图 4 飞机 A 调整速度后两机关系

Fig. 4 Geometry relation after speed change

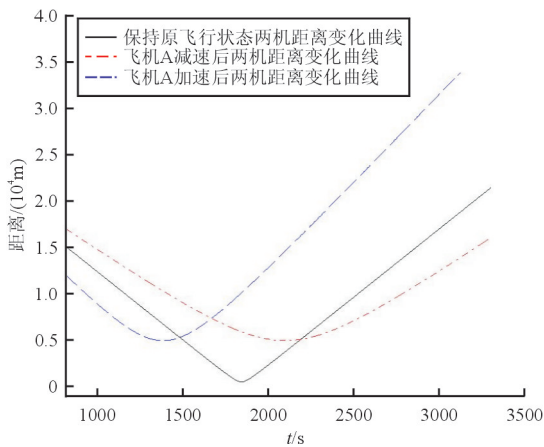


图 5 两机距离变化图(调整速度)

Fig. 5 Distance change between the two planes (adjusting speed)

对于调整航向的避让实验,产生的数据如下:飞机 A(0,0),速度 156 km/h,航向角 90°,机型 TB20;飞机 B(-19 974,-508),速度 208 km/h,航向角 90°,机型 TB20。根据探测算法,确认两架飞机在未来某时刻存在同向冲突。

根据上述数据,由调整航向算法计算可得:当飞机 A 左偏至 85.53°或右偏至 95.54°时,未来两机将不存在飞行冲突。飞机进行调整航向后,可使两机的最接近距离不小于 5 km,即成功地避免了冲突问题,如图 6~图 7 所示。

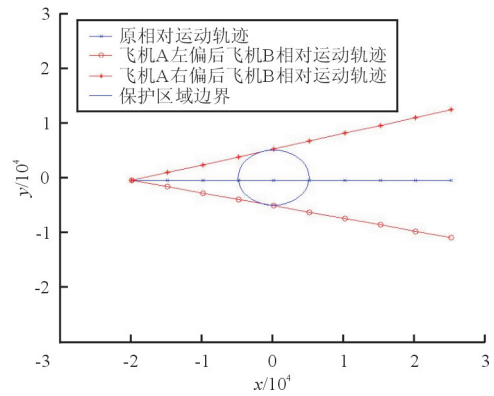


图 6 飞机 A 调整航向后两机关系

Fig. 6 Geometry relation after course change

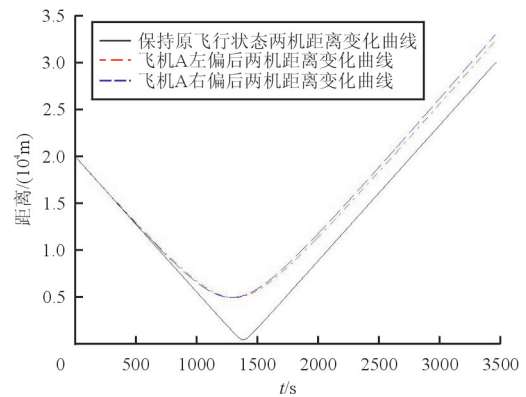


图 7 两机距离变化图(调整航向)

Fig. 7 Distance change between the two planes (adjusting course)

通过随机产生机型、位置、速度和航向信息进行 100 000 次实验以验证算法的有效性,仿真结果如表 2 所示。

表 2 仿真结果

Table 2 Simulation results

飞机 A 机型	调速避让成功率/%	调整航向避让成功率/%	调速或调整航向避让成功率/%
DA20	72.522	98.859	99.444
DA42	65.845	99.372	99.635
172R	69.846	99.107	99.493
TB20	62.031	99.475	99.679

从表 2 可以看出:调整航向法较调速法效果更明显,仅通过调整航向就几乎能对所有的冲突进行合理避让;而调速法的效果则较差,只能满足部分

冲突情况的避让要求,这是由于受自身速度上下界的限制所造成的;调速法的效果受飞机的飞行性能影响较大,一般速度上下界较宽裕的飞机,调速法的效果更好,而调整航向法受影响程度则较小。在总的避让效果上,本算法的避让成功率维持在 99.5% 左右,即能通过调整航向或速度对绝大部分冲突进行安全避让。

每次冲突中调速方案的计算结果如图 8 所示,可以看出:由于受自身速度上下界的限制,两架飞机在发生冲突时,飞机能进行调速安全避让的可执行方案大多只有一个(加速或减速),而能同时进行加速和减速进行避让的情况则较少,表明在进行调速避让时,飞行员可选择的余地不多,通常只能通过一个方案进行冲突避让。

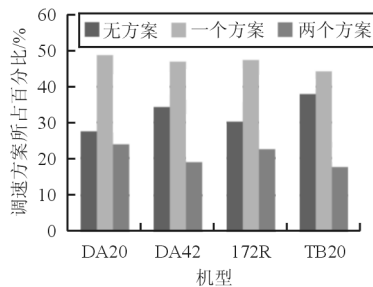


图 8 调速可执行方案数量百分比

Fig. 8 The percentage of executable speed change

每次冲突中调整航向方案的计算结果如图 9 所示,可以看出:飞机能通过调整航向以安全避让的方案大多有两个(左偏和右偏),只有唯一一个可执行方案的情况则较少,表明在进行调速避让时,飞行员可选择的余地较多。

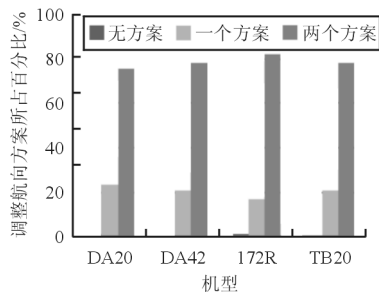


图 9 调整航向可执行方案数量百分比

Fig. 9 The percentage of executable course change

综上所述,在发生冲突时,调整航向法比调速

法更有效,不仅体现在避让的成功率上,还体现在可执行方案的数量上。但在实际操作中,调速法更易操作也更节约成本,而调整航向需要进行连续操作,并且会带来额外的飞行路程,因此,若发生冲突,应优先考虑调速法进行避让,再考虑改变航向<sup>[14]</sup>。若是进行目视飞行,相向冲突情景下,飞行器应选择向右规避冲突,并保持安全间隔通过<sup>[15]</sup>。

## 5 结 论

(1) 本文提出的基于 ADS-B 信息的通航飞行冲突避让算法能有效排除与本机无冲突的飞机,并在大部分发生冲突的飞行中通过速度和角度调整进行安全避让。

(2) 对比速度调整和航向调整两种方法,航向调整的有效性要大于速度调整,但由于速度调整比较经济方便,故在实际飞行中应优先选择速度调整方案,其次选择航向(角度)调整方案。

## 参 考 文 献

- [1] 朱代武. 低空空域飞行冲突避让算法[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(3): 73-76.  
Zhu Daiwu. Computational methods of avoiding flight conflict in low altitude airspace[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 73-76. (in Chinese)
- [2] 彭良福, 颜悦, 石佳奇, 等. 通航飞机避碰区域防撞模型的等效性研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(8): 95-99.  
Peng Liangfu, Yan Yue, Shi Jiaqi, et al. Equivalence study on collision avoidance zone based models for general aviation aircraft collision avoidance[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(8): 95-99. (in Chinese)
- [3] 罗文田, 赵泽荣, 张德银. 基于 ADS-B 的飞机预警避撞算法研究[J]. 控制工程, 2011, 18(4): 559-563.  
Luo Wentian, Zhao Zerong, Zhang Deyin. Investigation of aircraft collision avoidance and early warning algorithm based on ADS-B[J]. Control Engineering of China, 2011, 18(4): 559-563. (in Chinese)
- [4] 戴超成, 肖刚, 敬忠良. 采用 ADS-B 的冲突飞机选择算法[J]. 电光与控制, 2011, 18(10): 11-14.  
Dai Chaocheng, Xiao Gang, Jing Zhongliang. A selection algorithm of conflict aircrafts based on ADS-B[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(10): 11-14. (in Chinese)
- [5] Chamlou R, McLean, Virginia. Design principles and algorithm development for two types of NextGen airborne conflict detection and collision avoidance[C]. Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Confer-

- ence, 2010.
- [6] 中国民用航空局. 中国民用航空 ADS-B 实施规划[S]. 北京: 中国民用航空局, 2012.  
Civil Aviation Administration of China. China's civil aviation ADS-B implementation rules [S]. Beijing: CAAC, 2012. (in Chinese)
- [7] Radio Technical Commission for Aeronautics. Minimum aviation system performance standards for automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B); RTCA DO-242A[S]. Washington D C: RTCA Inc, 2002.
- [8] 程擎. 通信导航监视设施[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2015.  
Cheng Qing. Communication navigation monitoring facilities[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2013. (in Chinese)
- [9] Jae Honn Soon, Kyung Ryooh Oh. Prototype design of traffic information service-broadcast server using the ADS-B test-bed[C]. International Conference on Control, Automation and Systems, 2008; 1583-1586.
- [10] Sridhar B. Optimal strategies for free flight air traffic conflict resolution[J]. Journal of Guidance Control and Dynamic, 2001, 33(2): 1-35.
- [11] 丁腾跃. 民机 TCAS 冲突算法及仿真系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
Ding Tengyue. Study on the algorithm and simulation of civil aircraft traffic collisions avoidance system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)
- [12] 郭茜, 聂润兔, 王超. 蚁群算法在解决空中交通飞行冲突中的应用[J]. 交通运输工程与信息学报, 2009, 7(2): 116-119.  
Guo Qian, Nie Runtu, Wang Chao. Application of ant colony algorithm to aircraft conflict resolution[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2009, 7(2): 116-119. (in Chinese)
- [13] 潘卫军. 空中交通管理基础[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2013.  
Pan Weijun. Basic air traffic management[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2013. (in Chinese)
- [14] Mao Zhihong, Eric Feron, Daid Dugail. Stability of intersecting aircraft flows under decentralized conflict avoidance rules[C]. Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2001.
- [15] 牟奇丰. 空中交通管理中的防撞策略问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
Mou Qifeng. Collision prevention strategy problem research in air traffic[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- 作者简介:**  
程 擎(1972—), 男, 硕士, 教授, 硕导。主要研究方向: 通信导航监视技术及其相关应用。  
黄俊贤(1992—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 通信导航监视技术及其相关应用。  
郭文豪(1996—), 男, 本科生。主要研究方向: 通信导航监视技术及其相关应用。
- (编辑: 马文静)

(上接第 380 页)

- for vehicle routing problems with three-dimensional loading constraints[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 201(3): 751-759.
- [9] 张德富, 魏丽军, 陈青山, 等. 三维装箱问题的组合启发式算法[J]. 软件学报, 2007, 18(9): 2083-2089.  
Zhang Defu, Wei Lijun, Chen Qingshan, et al. A combinational heuristic algorithm for the three dimensional packing problem[J]. Journal of Software, 2007, 8(9): 2083-2089. (in Chinese)
- [10] Lim A, Rodrigues B, Yang Y. 3-D container packing heuristics[J]. Applied Intelligence, 2005, 22(2): 125-134.
- [11] Stefanj. On genetic algorithms for the packing of polygons [J]. European Journal of Operations. 1996, 88: 165-181.
- [12] Leng T W, Yung C H, Troutt M D. Applications of genetic search and simulated annealing to the two-dimensional non-guillotine cutting stock problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2001(40): 201-214.
- 作者简介:**  
马嘉呈(1992—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 空域与流量管理。  
姚登凯(1966—), 男, 博士, 教授。主要研究方向: 空域管理。  
赵顾颢(1986—), 男, 博士研究生, 讲师。主要研究方向: 空域管理和量子密钥等。
- (编辑: 赵毓梅)