

文章编号:1671-1637(2012)01-0115-06

固定航路最优飞行冲突解脱模型

韩云祥, 汤新民, 韩松臣

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对在固定航路条件下多个航空器之间的冲突解脱问题,提出了改变航向的飞行策略,比较了自由飞行条件下和固定航路飞行条件下的最优飞行冲突解脱模型。以航空器性能和航路空间为约束条件,以冲突解脱时间为目标函数,运用最优化控制理论和微分方程,计算了不同初始条件下的总冲突解脱时间。计算结果表明:当航空器的解脱终点从(80,0)变为(65,0)时,总冲突解脱时间减小了32 s;当航空器的解脱速度从 $833 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 降低为 $759 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,总冲突解脱时间增大了12 s;当航空器的初始位置由(20,0)增大为(29,0)时,总冲突解脱时间仅增大了2 s。航空器的解脱终点和解脱速度对冲突解脱时间影响较大,而航空器的初始位置对冲突解脱时间影响较小。

关键词:航空安全;空中交通管制;飞行轨迹;飞行间隔;冲突解脱;最优控制;固定航路;自由飞行
中图分类号:V355 **文献标志码:**A

Conflict resolution model of optimal flight for fixation airway

HAN Yun-xiang, TANG Xin-min, HAN Song-chen

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the conflict resolution problem among several aircrafts under fixation airway, the flight strategy of changing course was proposed, and the optimal conflict resolution models under free flight and fixation airway were compared. Aircraft performance and airway space were taken as constraint conditions, the conflict resolution time was taken as objective function, optimal control theory and differential equation were used, and the total conflict resolution times under different initial conditions were computed. Computation result shows that while the resolution endpoint of aircraft changes from (80, 0) to (65, 0), the total conflict resolution time reduces 32 s. While the resolution speed of aircraft decreases from $833 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ to $759 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, the total conflict resolution time increases 12 s. While the initial position of aircraft increases from (20, 0) to (29, 0), the total conflict resolution time only increases 2 s. The resolution endpoint and resolution speed of aircraft have great influence on the conflict resolution time, but the initial position of aircraft has little influence on the conflict resolution time. 4 tabs, 5 figs, 26 refs.

Key words: aviation safety; air traffic control; flight path; flight separation; conflict resolution; optimal control; fixation airway; free flight

Author resumes: HAN Yun-xiang(1985-), male, doctoral student, +86-25-84896456, hanyunxiang309789402@126.com; HAN Song-chen(1964-), male, professor, PhD, +86-25-84896005, hansongchen@nuaa.edu.cn.

收稿日期:2011-09-21

基金项目:国家自然科学基金项目(61174180);江苏省自然科学基金项目(BK2010502);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX-LX11_0210);南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NS2010177);南京航空航天大学民航(飞行)学院学生科技创新基金项目(BQ10078233006)

作者简介:韩云祥(1985-),男,河南驻马店人,南京航空航天大学工学博士研究生,从事空中交通管理研究。

导师简介:韩松臣(1964-),男,黑龙江哈尔滨人,南京航空航天大学教授,工学博士。

0 引言

随着空中交通流量的不断增长,空中交通面临越来越严重的拥挤,给现有的空中交通管制系统带来了很大的压力。为了保证飞行安全,提高民航空域的容量与使用效率及航空器运行的经济效益,对存在潜在冲突的航空器给出飞行调配方案显得十分必要。

鉴于飞行冲突解脱方案的重要性,国内外学者借鉴运筹学、概率论、自动控制以及人工智能等理论进行了相关研究,赵荣等以航空器的总飞行航线长度最短为目标函数,通过将航段细分,将遗传算法应用于自由飞行条件下的飞行冲突解脱^[1-4],其不足之处在于算法太复杂;王洁宁等通过构造适合自由飞行条件下的飞行冲突解脱问题的粒子表达方式,设计了飞行冲突解脱问题的粒子群算法^[5];郭茜等将空中交通飞行冲突问题转化为有约束的非线性整数规划问题,并设计了基于蚁群算法和人工势场法的求解算法^[6-9];戴玲等基于自由飞行的概念,提出了一种分布式的飞行冲突解脱方法,通过多Agent技术之间的交互来实现系统目标^[10-11];Clements等以解脱时间最短为目标函数,通过设定具体的解脱变量,将最优控制理论应用于自由飞行条件下的航空器冲突解脱问题^[12-14];Tomlin等采用混合自动机研究了自由飞行条件下航空器的飞行状态和参数,发现通过切换不同飞行状态,航空器都会自动产生相应安全机动方式^[15-17],但这种方法考虑因素较多,并且是基于分散式的空中交通管理方式,并不适合中国空中交通管理的现状。

总体来讲,上述研究主要集中在自由飞行或无约束条件下的飞行冲突避让算法中,研究思路有一定的借鉴意义,但并不完全适合中国国情,因此,如何从中国空域实际运行状况出发,在机载或地面监视设备预测到冲突状况时,为航空器规划出避免飞行冲突的最优航迹,并使航空器能够按该航迹运行就显得十分必要。本文以总解脱时间最短作为目标函数,研究当解脱变量受航空器性能和航路空间约束时航空器的最短时间飞行冲突解脱问题,为在同一高度层上运行的航空器设计出冲突解脱的最优航线轨迹,并给出具体的航空器操纵指令,为研制空管自动化系统提供依据。

1 自由飞行条件下航空器最优解脱模型

在自由飞行条件下,由于航路空间约束较小,本

文以2个航空器的飞行状况为例,参考文献[18-26],假设2个航空器最优冲突解脱的前提条件如下。

- (1)解脱区域在一个水平面内。
- (2)航空器的解脱始点和终点均为已知。
- (3)不改变航空器1的运动状态,仅通过改变航空器2航向来实施冲突解脱。
- (4)2个航空器在飞行过程中速率保持不变。
- (5)航空器1视为一个移动的圆环,航空器2视为质点。

在自由飞行条件下,2个航空器的运行状态见图1,航空器1位于 O_1 ; R_0 为航空器1的保护区半径,本文取10 km; a 为航空器2的解脱始点, x_0 、 y_0 为对应坐标; b 为航空器2的解脱终点, x_f 、 y_f 为对应坐标。

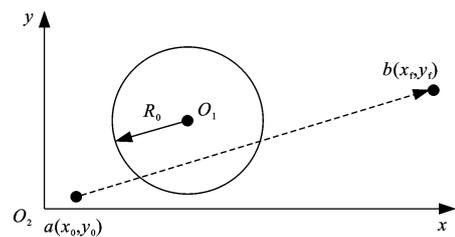


图1 自由飞行轨迹

Fig. 1 Free flight path

令航空器1、2的速度分别为 v_1 和 v_2 , φ_0 为航空器2在解脱始点 a 时的航向,在自由飞行条件下,基于解脱时间最短的2个航空器冲突解脱目标函数 f_1 为

$$f_1 = \min(t_f) \quad (1)$$

航空器2的运行状态为

$$\dot{x}_2 = v_2 \sin(\varphi), \dot{y}_2 = v_2 \cos(\varphi), \dot{\varphi} = u, 0 \leq t \leq t_f \quad (2)$$

约束条件为

$$|u| \leq u_m \quad (3)$$

$$R_0^2 - [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2] \leq 0 \quad (4)$$

式中: t_f 为航空器2从点 a 到达点 b 的时间; x_2 、 y_2 分别为 t 时刻航空器2的横坐标和纵坐标; x_1 、 y_1 分别为 t 时刻航空器1的横坐标和纵坐标; φ 、 u 分别在 t 时刻航空器2的航向和转弯率; u_m 为在航空器性能限制下航空器2的最大转弯率。

求目标函数 f_1 的实质则为得到一个控制序列 $(u_k)(k=1, 2, \dots, p)$, p 为航空器2航线轨迹的子段总数量, u_k 为在每一个子段上所实施的控制策略,表现为航空器2的转弯率,当且仅当航空器2在不同时间段(不同位置点)按照该序列飞行时,使得总解脱时间

$$t_f = \sum_{k=1}^p t_k \quad (t_k \text{ 为在每一个子段上所运行的时间}) \text{ 取得}$$

最小值,即使目标函数取最小值。

以上讨论的是在自由飞行条件下基于解脱时间最短的 2 个航空器的冲突解脱问题,而中国民用航空器只允许在特定的航路上飞行,解脱变量不仅会受到航空器性能的制约,还会受到航路空间因素的制约,为了符合中国空中管制的实际情况,需要考虑解脱变量受以上两类因素制约时的多个航空器最优冲突解脱模型。

2 固定航路飞行条件下航空器最优解脱模型

在固定航路飞行条件下,多个航空器最优冲突解脱的前提条件除了自由飞行条件中的式(1)和式(2)外,还包括各个航空器仅通过改变航向来解脱冲突,在飞行过程中速率均保持不变;各个航空器均不能飞出航路边界。

假定空域内飞行的航空器总数为 n ,在满足空管规定的前提下,每个航空器 i 均需得到一个控制序列 $U_i=(u_{ij})(j=1,2,\dots,q_i)$, q_i 为航空器 i 航线轨迹的子段总数量, u_{ij} 为航空器 i 在每一子段 j 上运用的控制策略,表现为航空器 i 的转弯率。要使得航空器 i 从冲突解脱始点到终点所用的时间最小,即使航空器 i 的总解脱时间 $T_i = \sum_{j=1}^{q_i} t_{ij}$ (t_{ij} 为航空器 i 在每一个子段 j 上运行的时间)最小。

不失一般性,在固定航路飞行条件下 2 个航空器运行状态见图 2,上下两段虚线表示航路边界。

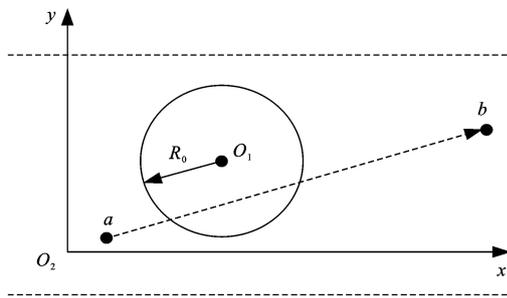


图 2 固定航路下的运行轨迹

Fig. 2 Flight path under fixation airway

在本文中, i 取 2,为了得到总的控制序列

$$U = [U_1 \ U_2]^T = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & \cdots & u_{1q_1} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & \cdots & u_{2q_2} \end{bmatrix}$$

在固定航路飞行条件下,基于总解脱时间最短的 2 个航空器最优冲突解脱模型的目标函数 f_2 为

$$f_2 = \min(T_{if}) \quad (5)$$

2 个航空器的运行状态分别为

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = V_1 \sin(\rho_1), \dot{Y}_1 = V_1 \cos(\rho_1) \\ \dot{\rho}_1 = r_1, 0 \leq T \leq T_{1f} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{X}_2 = V_2 \sin(\rho_2), \dot{Y}_2 = V_2 \cos(\rho_2) \\ \dot{\rho}_2 = r_2, 0 \leq T \leq T_{2f} \end{cases} \quad (7)$$

约束条件为

$$|r_1| \leq r_{m1}, 0 \leq T \leq T_{1f} \quad (8)$$

$$|r_2| \leq r_{m2}, 0 \leq T \leq T_{2f} \quad (9)$$

$$R_0^2 - [(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2] \leq 0 \quad (10)$$

$$L_1 \leq 0, L_2 \leq 0 \quad (11)$$

式中: X_1, Y_1, ρ_1, r_1 分别为 T 时刻航空器 1 的横坐标、纵坐标、航向和转弯率; X_2, Y_2, ρ_2, r_2 分别为 T 时刻航空器 2 的横坐标、纵坐标、航向和转弯率; V_1, V_2 分别为航空器 1、2 的速度; T_{1f}, T_{2f} 分别为航空器 1、2 到达解脱终点的时间; X_{1f}, Y_{1f} 分别为航空器 1 在解脱终点的横坐标和纵坐标; X_{2f}, Y_{2f} 分别为航空器 2 在解脱终点处的横坐标和纵坐标; r_{m1}, r_{m2} 分别为在航空器性能限制下的航空器 1、2 的最大转弯率; L_1, L_2 分别为航路边界线方程式。

3 计算结果分析

在固定航路飞行条件下,本文利用仿真试验验证航空器航线轨迹的有效性和安全性,分析了 2 个航空器的冲突状况。航路宽度为 20 km, 2 个航空器均在航路的中心线上飞行,航空器 1 在前,航空器 2 在后,相关模型参数见表 1。

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

参数	取值
航空器 2 解脱始点坐标/km	(0,0)
航空器 1 航向/rad	$\pi/2$
航空器 2 初始航向/rad	$\pi/2$
航空器 1 速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	648
航空器 2 最大转弯率/($\text{rad} \cdot \text{h}^{-1}$)	189

3.1 不同解脱终点下的最优航线轨迹

当航空器 2 解脱终点分别取为(80,0)、(75,0)、(70,0)和(65,0)(单位为 km,下同)时,可以得到航空器 2 的最优解脱航线轨迹和运行状态,分别见图 3和表 2。

由图 3、表 2 可知,航空器 2 的解脱过程可以分为 4 个阶段,两段转弯飞行阶段和两段直线飞行阶段,航空器 2 在第 1 段圆弧转弯、第 2 段直线飞行以及第 3 段圆弧转弯的飞行姿态没有变化,只是第 3 段圆弧转弯的时间有所变化,即当航空器 2 速度一定并且解脱始点给定时,航空器在前期通常会

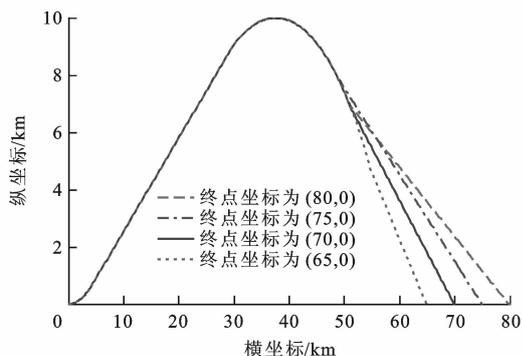


图 3 不同解脱终点下航空器 2 的航线轨迹

Fig. 3 Flight paths of aircraft 2 under different resolution endpoints

表 2 不同解脱终点下航空器 2 的运行状态

Tab. 2 Flight states of aircraft 2 under different resolution endpoints

飞行阶段	路段始、终点坐标/km	飞行时间/s	操作方式	总时间/s	解脱终点坐标/km	
第 1 段圆弧转弯	(0,0),(4,1)	11	以坡度 23°飞行		(80,0)	
	(0,0),(4,1)	11	以坡度 23°飞行		(75,0)	
	(0,0),(4,1)	11	以坡度 23°飞行		(70,0)	
	(0,0),(4,1)	11	以坡度 23°飞行		(65,0)	
第 2 段直线飞行	(4,1),(29,9)	67	保持航向 72°飞行		(80,0)	
	(4,1),(29,9)	67	保持航向 72°飞行		(75,0)	
	(4,1),(29,9)	67	保持航向 72°飞行		(70,0)	
	(4,1),(29,9)	67	保持航向 72°飞行		(65,0)	
第 3 段圆弧转弯	(29,9),(51,7)	54	以坡度 10°飞行		(80,0)	
	(29,9),(49,8)	49	以坡度 10°飞行		(75,0)	
	(29,9),(51,7)	54	以坡度 10°飞行		(70,0)	
	(29,9),(55,5)	66	以坡度 10°飞行		(65,0)	
第 4 段直线飞行	(51,7),(80,0)	74	保持航向 104°飞行	206	(80,0)	
	(49,8),(75,0)	68	保持航向 107°飞行		195	(75,0)
	(51,7),(70,0)	51	保持航向 110°飞行		183	(65,0)
	(55,5),(65,0)	30	保持航向 115°飞行		174	(60,0)

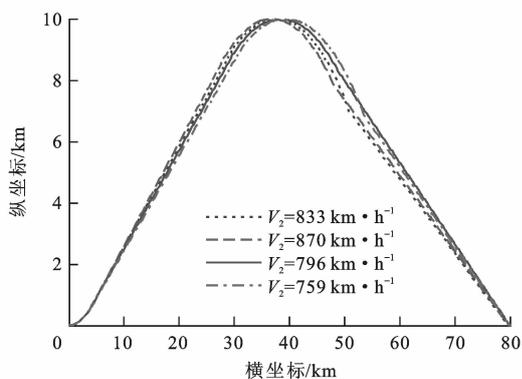


图 4 不同解脱速度下航空器 2 的航线轨迹

Fig. 4 Flight paths of aircraft 2 under different resolution speeds

保持同样的飞行姿态实施冲突解脱。与前 3 段相比,变化最显著的是第 4 段直线飞行,不仅航向有较大变化,飞行时间也有很大变化。当航空器 2 速度一定,解脱终点从(80,0)变为(65,0)时,总解脱时间减小了 32 s,总解脱时间与距离的变化率约为 $2 \text{ s} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

3.2 不同解脱速度下的最优航线轨迹

当航空器 2 速度分别取为 870、833、796 和 759 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,可以得到航空器 2 的最优解脱航线轨迹和运行状态,分别见图 4 和表 3。

由图 4、表 3 可知,航空器 2 解脱速度的变化不仅对各阶段的飞行时间有影响,而且对各阶段的飞

行姿态也有显著影响。当航空器 2 解脱终点一定并且解脱速度从 833 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 降低为 759 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,总解脱时间增加了 12 s,总解脱时间与速度的变化率约为 $-0.2 \text{ s} \cdot (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^{-1}$ 。

3.3 不同初始位置下的最优航线轨迹

当航空器 1 初始位置分别取为(20,20)、(23,0)、(26,0)和(29,0)(单位为 km,下同)时,可以得到航空器 2 的最优解脱航线轨迹和运行状态,分别见图 5 和表 4。

由图 5、表 4 可知,不同航空器 1 初始位置的变化对航空器 2 各航段的飞行时间均有一定的影响,但是在第 1 段圆弧转弯和第 3 段圆弧转弯上,航空器 2 的飞行姿态无显著差异,即当航空器 1 解脱始

表 3 不同解脱速度下航空器 2 的运行状态
Tab. 3 Flight states of aircraft 2 under different resolution speeds

飞行阶段	路段始、终点坐标/km	飞行时间/s	操作方式	总时间/s	解脱速度/(km · h ⁻¹)
第 1 段圆弧转弯	(0,0),(4,1)	11	以坡度 23°飞行		833
	(0,0),(4,1)	11	以坡度 25°飞行		870
	(0,0),(4,1)	11	以坡度 21°飞行		796
	(0,0),(4,1)	11	以坡度 19°飞行		759
第 2 段直线飞行	(4,1),(29,9)	67	保持航向 72°飞行		833
	(4,1),(28,9)	60	保持航向 71°飞行		870
	(4,1),(29,9)	69	保持航向 72°飞行		706
	(4,1),(31,9)	76	保持航向 73°飞行		759
第 3 段圆弧转弯	(29,9),(51,7)	54	以坡度 10°飞行		833
	(28,9),(48,8)	49	以坡度 11°飞行		870
	(29,9),(49,8)	49	以坡度 9°飞行		796
	(31,9),(53,7)	59	以坡度 8°飞行		759
第 4 段直线飞行	(51,7),(80,0)	74	保持航向 104°飞行	206	833
	(48,8),(80,0)	80	保持航向 104°飞行	200	870
	(49,8),(80,0)	83	保持航向 105°飞行	212	796
	(53,7),(80,0)	72	保持航向 105°飞行	218	759

表 4 不同初始位置下航空器 2 的运行状态
Tab. 4 Flight states of aircraft 2 under different initial positions

飞行阶段	路段始、终点坐标/km	飞行时间/s	操作方式	总时间/s	航空器 1 不同初始位置/km
第 1 段圆弧转弯	(0,0),(4,1.0)	11	以坡度 23°飞行		(20,0)
	(0,0),(4,0.5)	9	以坡度 23°飞行		(23,0)
	(0,0),(3,0.4)	8	以坡度 23°飞行		(26,0)
	(0,0),(3,0.3)	7	以坡度 23°飞行		(29,0)
第 2 段直线飞行	(4,1.0),(29,9)	67	保持航向 72°飞行		(20,0)
	(4,0.5),(36,9)	83	保持航向 75°飞行		(23,0)
	(3,0.4),(42,9)	99	保持航向 77°飞行		(26,0)
	(3,0.3),(48,10)	114	保持航向 78°飞行		(29,0)
第 3 段圆弧转弯	(29,9),(51,7)	54	以坡度 10°飞行		(20,0)
	(36,9),(54,8)	45	以坡度 10°飞行		(23,0)
	(42,9),(61,7)	49	以坡度 10°飞行		(26,0)
	(48,10),(69,6)	54	以坡度 10°飞行		(20,0)
第 4 段直线飞行	(51,7),(80,0)	74	保持航向 104°飞行	206	(20,0)
	(54,8),(80,0)	68	保持航向 107°飞行	205	(23,0)
	(61,7),(80,0)	49	保持航向 110°飞行	205	(26,0)
	(69,6),(80,0)	33	保持航向 116°飞行	208	(29,0)

点给定时,航空器 2 在解脱前期和解脱后期通常会保持同样的飞行姿态实施转向操作。当航空器 1 初始位置由(20,0)增大为(29,0)时,航空器 2 总解脱时间仅增大了 2 s,与前 2 种情况相比,总解脱时间对航空器 1 初始位置的变化不太敏感。

4 结 语

本文从中国空中管制实际出发,运用最优化控制理论构造了固定航路飞行条件下同一高度层时航空器的最优冲突解脱模型,根据求解的最优解脱航

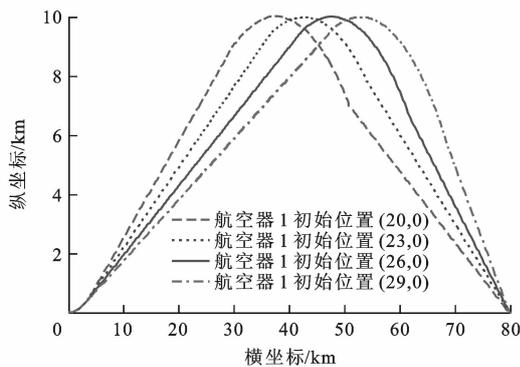


图5 不同初始位置下航空器2的航线轨迹

Fig. 5 Flight paths of aircraft 2 under different initial positions

线轨迹,得到了航空器在最优航线轨迹各个子阶段内的操作方式。值得注意的是,应用该模型需要解决航空器的精确定位问题,将调整航向、速度与高度3种策略相结合,利用组合控制方案实施最优冲突解脱将是下一步的研究重点。

参考文献:

References:

- [1] 赵荣,张京娟.改进的遗传算法在飞行冲突解脱中的应用[J].电子测量技术,2009,32(11):37-39.
ZHAO Rong, ZHANG Jing-juan. Conflict resolution based on an improved genetic algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(11): 37-39. (in Chinese)
- [2] 杨尚文,戴福青.基于一种免疫遗传算法的自由飞行冲突解脱[J].航空计算技术,2007,37(1):41-43.
YANG Shang-wen, DAI Fu-qing. Conflict resolution in free flight based on an immune genetic algorithm[J]. Aeronautical Computer Technique, 2007, 37(1): 41-43. (in Chinese)
- [3] 裴志刚,李华星,王庆胜.模拟退火遗传算法在飞行冲突解脱中的应用[J].交通与计算机,2005,23(1):115-117.
PEI Zhi-gang, LI Hua-xing, WANG Qing-sheng. Application of simulated annealing/genetic algorithms to solving flight conflicts[J]. Computer and Communications, 2005, 23(1): 115-117. (in Chinese)
- [4] 刘星,胡明华,董襄宁.遗传算法在飞行冲突解脱中的应用[J].南京航空航天大学学报,2002,34(1):35-39.
LIU Xing, HU Ming-hua, DONG Xiang-ning. Application of genetic algorithms for solving flight conflicts[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 34(1): 35-39. (in Chinese)
- [5] 王洁宁,袁志娟.基于粒子群算法的飞行冲突解脱问题[J].中国民航大学学报,2010,28(4):1-4.
WANG Jie-ning, YUAN Zhi-juan. Study on resolution of flight conflicts based on particle swarm optimization[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010, 28(4): 1-4. (in Chinese)
- [6] 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 Run-tu, 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)

[7] 郭茜,聂润兔.改进蚁群算法在飞行冲突求解问题中的应用[J].计算机工程与设计,2009,30(11):2769-2771.

GUO Qian, NIE Run-tu. Aircraft conflict resolution by using improved ant colony algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(11): 2769-2771. (in Chinese)

[8] 郭茜,聂润兔,王超.多机飞行冲突解决方法研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2010,34(3):460-463.

GUO Qian, NIE Run-tu, WANG Chao. Study of multi-aircraft conflict resolution method[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2010, 34(3): 460-463. (in Chinese)

[9] 郭茜,聂润兔.改进人工势场法在解决飞行冲突问题中的应用[J].交通与计算机,2008,26(5):103-106.

GUO Qian, NIE Run-tu. Application of improved artificial field method in aircraft conflict resolution[J]. Computer and Communications, 2008, 26(5): 103-106. (in Chinese)

[10] 戴玲,夏学知.多Agent技术在飞行冲突解脱中的应用[J].舰船电子工程,2008,28(3):62-64.

DAI Ling, XIA Xue-zhi. Application of multi-agent in flight-conflict resolution[J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 28(3): 62-64. (in Chinese)

[11] ARCHIBALD J K, HILL J C, JEPSEN N A, et al. A satisficing approach to aircraft conflict resolution[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews, 2008, 38(4): 510-521.

[12] CLEMENTS J C. The optimal control of collision avoidance trajectories in air traffic management[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1999, 33(4): 265-280.

[13] FRIEDMAN M F. Decision analysis and optimality in air traffic control conflict resolution: II. optimal heading (vectoring) control in a linear planar configuration[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1991, 25(1): 39-53.

[14] FRIEDMAN M F. Decision analysis and optimality in air traffic control conflict resolution. I. optimal timing of speed control in a linear planar configuration[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1988, 22(3): 207-216.

[15] TOMLIN C, PAPPAS G J, SASTRY S. Conflict resolution for air traffic management: a study in multi-agent hybrid systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 43(4): 509-521.

[16] TOMLIN C, MITCHELL I, GHOSH R. Safety verification of conflict resolution maneuvers[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2001, 2(2): 110-120.

[17] TOMLIN C J, LYGEROS J, SHANKAR SASTRY S. A game theoretic approach to controller design for hybrid sys-

(下转第126页)

- tion[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2009, 22(3): 95-100. (in Chinese)
- [8] 石小法, 王 炜, 李文权. 交通信息对交通网络的影响研究[J]. *系统工程学报*, 2001, 16(3): 167-171.
SHI Xiao-fa, WANG Wei, LI Wen-quan. Information effects in transportation network[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2001, 16(3): 167-171. (in Chinese)
- [9] MAMMAR S, MESSMER A, JENSEN P, et al. Automatic control of variable message signs in AALBORG[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1996, 4(3): 131-150.
- [10] 孟 超, 邵春福, 李 玮, 等. VMS对驾驶人路径选择行为影响的仿真研究[J]. *城市交通*, 2009, 7(1): 76-81.
MENG Chao, SHAO Chun-fu, LI Wei, et al. Impact simulation of VMSs on driver's route selection behaviors[J]. *Urban Transport of China*, 2009, 7(1): 76-81. (in Chinese)
- [11] 杨晓光, 伍速锋, 云美萍. 日常出行中的交通信息有效性仿真研究[J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(4): 12-15.
YANG Xiao-guang, WU Su-feng, YUN Mei-ping. Validity analysis of traffic information on day-to-day travel by simulating[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(4): 12-15. (in Chinese)
- [12] 杨珍珍, 干宏程. 面向大型社会活动的快速路网控制策略仿真评价方法[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(12): 4473-4475.
YANG Zhen-zhen, GAN Hong-cheng. Large social event oriented freeway network control strategy simulation evaluation approach[J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(12): 4473-4475. (in Chinese)
- [13] 尚华艳, 黄海军, 高自由. 基于元胞传输模型的可变信息标准选址问题研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(8): 4342-4347.
SHANG Hua-yan, HUANG Hai-jun, GAO Zi-you. Locating the variable message signs by cell transmission model[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(8): 4342-4347. (in Chinese)
- [14] GAN Hong-cheng, SUN Li-jun, CHEN Jian-yang, et al. Advanced traveler information system for metropolitan expressways in Shanghai, China [J]. *Transportation Research Record*, 2006(1944): 35-40.
- [15] GAN Hong-cheng. Graphical route information panel for the urban freeway network in Shanghai, China[J]. *Intelligent Transport Systems*, 2010, 4(3): 212-220.
- [16] KOTSIALOS A, PAPAGEORGIOU M, MANGEAS M, et al. Coordinated and integrated control of motorway networks via non-linear optimal control[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2002, 10(1): 65-84.

(上接第 120 页)

- tems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(7): 949-970.
- [18] INGALLS B. Conflict resolution in air traffic management using the methods of optimal control theory[D]. Halifax, Dalhousie University, 1997.
- [19] 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.
- [20] PALLOTTINO L, FERON E M, BICCHI A. Conflict resolution problems for air traffic management systems solved with mixed integer programming[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2002, 3(1): 3-11.
- [21] NIEDRINGHAUS W P. Maneuver option manager: automated simplification of complex air traffic control problems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1992, 22(5): 1047-1057.
- [22] ALLIOT J M, DURAND N, GRANGER G. Faces: a free flight autonomous and coordinated embarked solver(1998)[J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 2000, 8(6): 109-130.
- [23] 何晓菊, 廖志武. 基于动态调速的定航线飞行冲突探测与解脱[J]. *计算机应用*, 2010, 30(2): 540-542.
HE Xiao-ju, LIAO Zhi-wu. Airline flying conflict survey and extrication based on dynamic velocity modulation[J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(2): 540-542. (in Chinese)
- [24] 夏怡凡, 朱允民, 马 洪, 等. 空中交通冲突调速最优解决方案[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2006, 43(5): 955-961.
XIA Yi-fan, ZHU Yun-min, MA Hong, et al. An optimal conflict resolution by adjusting the velocity in air traffic[J]. *Journal of Sichuan University: Natural Science Edition*, 2006, 43(5): 955-961. (in Chinese)
- [25] MENON R K, SWERIDUK G D, SRKDHAR B. Optimal strategies for free-flight air traffic conflict resolution [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1999, 22(2): 202-211.
- [26] DURAND N, ALLIOT J N, CHANSOU O. Optimal resolution of en-route conflicts[J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 1995, 3(3): 139-161.