

## 空中高速路匝口流量控制

王莉莉, 李宏发

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津, 300300)

**摘要** 空中高速路系统有助于缓解日益严重的空中交通拥挤问题。从空中高速路及其匝口的基本概念入手, 基于元胞传输理论建立了空中高速路匝口流量控制模型, 通过对模型进行仿真求解, 建立匝口元胞连接图, 得到系统最短时间、系统清空时间、最优匝口流量分布等, 结果表明: 该模型既能够满足空中高速路匝口流量控制建模的需要, 又能反映空中高速路系统中交通流的动态特性。

**关键词** 空中高速路; 匝口流量控制; 元胞传输模型

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.02.004

**中图分类号** V355 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2013)02-0014-04

## Research on Air Highway Ramp Flow Control

WANG Li-li, LI Hong-fa

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** With the rapid development of the air transportation, air traffic will become heavier and heavier, establishing air highway is important to alleviate the increasingly serious problem of air traffic congestion. This paper gives a basic concept of air highway and of ramp, using the basic theory of cell transmission model to present an air highway ramp flow control model. By solving this model, the system minimum time, system clearance time, optimal flow distribution of ramp, and so on are obtained. Results of a case study show that this model can meet the modeling demand of air traffic highway ramp flow control, and also can describe the dynamics feature of traffic flow in air highway system.

**Key words:** air highway; ramp flow control; cell transmission model

为了缓解空中交通拥挤和提高空域的使用效率, 可以专为远程繁忙航班在高空开设单向、无交叉并对航空器性能有较高要求的高速航路。美国联邦航空局(FAA)的“新一代国家空域系统”的设想<sup>[1]</sup>和欧洲单一天空计划(Single Sky)<sup>[2]</sup>都提出需要合适的空域结构和规则以提供更多的航路容量和终端区容量, 其中空中高速路是一个主要的空域规划和设计内容。

目前, 国外研究主要针对管道以及空中走廊的

设计; 文献[3]定性给出了空中高速公路的结构和位置设置建议; 文献[4]通过仿真表明高速路应连接主要机场群; 文献[5]总结了基于管道理论的空中高速路从设计到运行需要解决的主要问题。国内, 文献[6~8]分别研究了空中高速路的微观流量模型、宏观流量模型和匝口延误现象, 对空中高速路的匝口流量控制研究还未见报道。

空中高速路的匝口即为飞机进出高速路的通道。由于高速路相对于常规航路来说飞机的速度

**收稿日期:** 2012-06-05

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61179042); 中央高校基本科研基金资助项目(ZXH 2012L005); 中国民航大学科研基金资助项目(06kym06)

**作者简介:** 王莉莉(1973—), 女, 陕西兴平人, 副教授, 博士, 主要从事空域规划研究。E-mail: llwang@cauc.edu.cn

大、间隔小,因此,在匝口处汇合时必然产生相互影响。匝口流量控制就是在保障安全间隔的前提下,合理对进出匝口的流量进行控制,使得整个流量既满足系统容量约束,又使整个航空系统的运行效率最优。本文基于元胞传输理论建立了空中高速路匝口入口控制模型,并进行了仿真求解

## 1 元胞传输模型基本理论

Daganzo 于 1994 年提出了元胞传输模型(简称 CTM)<sup>[9]</sup>,但在空中交通控制中应用的还很少,目前只见文献[10]采用该理论对空中高速路突发事件的消散过程进行了研究。元胞传输模型是一个在欧拉网络空域模型中发展起来的新交通流量模型,空中高速路上的交通流,由于被局限在高速路内按一定安全间隔顺序飞行,因此可以在欧拉空间被模拟演变为一个分离时间的动态系统,来进行交通流分布分析。

首先,在空间上将空中高速路和匝口离散化为一组相互连接的同质小段,称为元胞(cell)。每个元胞的长度定义为单位时间间隔内,飞机以规定速度飞行的距离。其次,在时间上,将飞机流动态的考察时间周期离散化为多个单位时间间隔  $\tau$ 。L 为单个元胞长度; $v$  为空中高速路规定的飞行速度; $\tau$  为单位时间间隔; $N$  为单个元胞可容纳的飞机数; $k$  为空中交通流的密度; $q$  为流量; $y$  为从一个元胞传输到另一个元胞的流量。

$L = v\tau$ ;  $N = lk$ , 交通流密度大、间隔小,具有流的特征,可以用流量、密度、速度 3 个参数来分析。飞机在空中只能通过盘旋来形成一种动态等待,这里假设飞机间的间隔达到了最小安全间隔,根据宏观交通流模型下的流量-密度关系,可以得出单位时间内从一个元胞传输到另一个元胞的流量为:  
 $y = qt = \min\{vk\tau\} = \min\{N, Q_{\max}\}$

## 2 建立匝口控制模型

$C$  为元胞的集合,包括普通元胞( $C_O$ )、分流元胞( $C_D$ )、合流元胞( $C_M$ )、起始点元胞( $C_R$ )、终点元胞( $C_S$ ); $L$  为元胞间连接的集合,包括普通元胞连接( $L_O$ )、分流元胞连接( $L_D$ )、合流元胞连接( $L_M$ )、起始点元胞连接( $L_R$ )、终点元胞连接( $L_S$ ); $T$  为离散的时间间隔的集合, $T_m$  表示最大仿真时段; $\tau$  为单位时间间隔; $x_i^t$  为  $t$  时段  $i$  元胞里的飞机数; $y_{i,j}^t$  为  $t$  时段从  $i$  元胞流入  $j$  元胞的飞机数; $d_i^t$  为  $t$  时段从  $i$  元胞的需求, $i \in C_R$ ;  $\Gamma(i)$  为  $i$  元胞的紧后元胞的集

合; $\Gamma^{-1}(i)$  为  $i$  元胞的紧前元胞的集合; $Q_i^t$  为  $t$  时段  $i$  元胞的最大流量,包括流入  $i$  元胞的飞机数和从  $i$  元胞流出的飞机数; $N_i^t$  为  $t$  时段  $i$  元胞最大可容纳的飞机数; $x_i^0$  为  $i$  元胞内飞机数的初始值; $\theta_i$  为权重系数。

根据元胞传输理论和空中高速路及匝口流量特性,改进传统的元胞传输模型,给出以系统时间最短为目标函数的空中高速路匝口流量控制模型,目标函数  $\min z = \sum_{i \in TV} \sum_{i \in C \setminus C_S} \theta_i \tau x_i^t$ 。考虑主路与匝口的飞机流的优先级别,在此引入权重系数  $\theta_i$ 。

约束条件如下:

① 除起点与终点元胞以外的元胞流量守恒约束:

$$x_i^t - x_i^{t-1} - \sum_{k \in \Gamma^{-1}(i)} y_{k,i}^{t-1} + \sum_{j \in \Gamma(i)} y_{i,j}^{t-1} = 0, \forall i \in C \setminus \{C_R, C_S\}, \forall t \in T, t \neq 0$$

② 起点元胞流量守恒约束:  $x_i^t = x_i^{t-1} + d_i^{t-1} - \sum_{j \in \Gamma^{-1}(i)} y_{i,j}^{t-1}, \forall i \in C_R, \forall t \in T, t \neq 0$

③ 终点元胞流量守恒约束:  $x_i^t = x_i^{t-1} + \sum_{j \in \Gamma^{-1}(i)} y_{k,i}^{t-1}, \forall i \in C_S, \forall t \in T, t \neq 0$

④ 分流点元胞流量守恒约束:  $\sum_{j \in \Gamma(i)} y_{i,j}^t \leq x_i^t, \sum_{j \in \Gamma(i)} y_{i,j}^t \leq Q_i^t, \forall i \in C_D, \forall t \in T$

⑤ 合流点元胞流量守恒约束:  $\sum_{i \in \Gamma^{-1}(j)} y_{i,j}^t \leq Q_j^t, \sum_{i \in \Gamma^{-1}(j)} y_{i,j}^t \leq N_j^t - x_j^t, \forall j \in C_M, \forall t \in T$

⑥ 普通元胞和起点元胞连接的流量约束:  $y_{i,j}^t \leq x_i^t, y_{i,j}^t \leq Q_i^t, y_{i,j}^t \leq Q_j^t, \forall (i,j) \in L_O \cup L_R, \forall t \in T$

⑦ 终点元胞连接的流量约束:  $y_{i,j}^t \leq x_i^t, y_{i,j}^t \leq Q_i^t, \forall (i,j) \in L_S, \forall t \in T$

⑧ 分流点元胞连接的流量约束:  $y_{i,j}^t \leq Q_i^t, y_{i,j}^t \leq N_j^t - x_j^t, \forall (i,j) \in L_D, \forall t \in T$

⑨ 合流点元胞连接的流量约束:  $y_{i,j}^t \leq x_i^t, y_{i,j}^t \leq Q_i^t, \forall (i,j) \in L_M, \forall t \in T$

⑩ 初始化条件和非负约束:  $x_i^0 = x_i, y_{i,j}^0 = 0, x_i^t \geq 0, y_{i,j}^t \geq 0, \forall i \in C, \forall (i,j) \in L, \forall t \in T$

## 3 仿真分析

### 3.1 空中高速路及匝口元胞连接图构建

选取某空域范围内部分高速路航路和入口匝口为研究对象。航路路段和匝口长度见图 1。假定空中高速路飞机流的速度  $v_1$  为 800 km/h,匝口中飞

机流的速度  $v_2$  为 600 km/h,需要仿真时间间隔  $T$  设定为 40 个单位时间间隔,单位时间间隔  $\tau$  为 3 min. 则计算可得高速路上的单位元胞长度  $L_1$  为 40 km,匝口上的单位元胞长度  $L_2$  为 30 km. 可构建出元胞连接图,见图 2,其中,元胞 20、21、22 为虚拟的起始点元胞;元胞 23 为虚拟的终点元胞;元胞 3 和 11 为合流点元胞;其余的元胞为普通连接元胞。

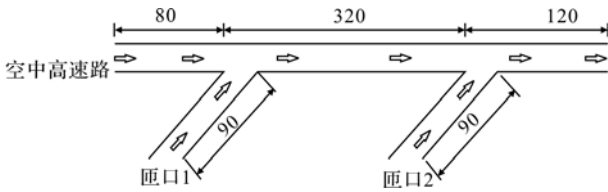


图 1 空中高速路航路和匝口平面示意图

Fig. 1 Flat diagram of air highway route and ramp

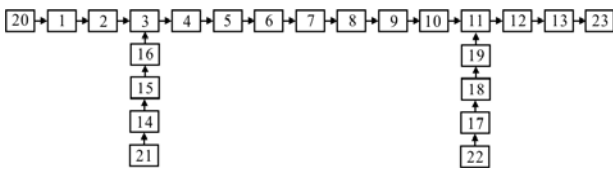


图 2 元胞连接案例图

Fig. 2 Case diagram of cells connection

根据空中交通安全间隔的规定,前后两架飞机的纵向间隔至少为 10 km,取在空中高速路中所有飞机的纵向间隔均为 10 km. 考虑到空中高速路上的飞机流拥有优先权,这里取匝口上的飞机流的权重系数  $\theta_i$  为 1,而空中高速路上的飞机流的权重系数  $\theta_i$  为 1.2. 表 1 给出了元胞的一些恒量特性:元胞最大可容纳的飞机数  $N_i$ ,单位时间间隔内的最大流量  $Q_i$ ,元胞内初始飞机数  $x_i^0$  以及权重系数  $\theta_i$ . 表 2 给出了起始点元胞的时变交通需求。

表 1 元胞的恒量特性

Tab. 1 Cells' constant characteristics

元胞编号	$N_i$ /架	$Q_i$ (架/单位时间间隔)	$x_i^0$ /架	权重系数 $\theta_i$
1~13, 23	4	4	0	1.2
14~19	3	3	0	1.0
20	4	4	1	1.2
21	3	3	3	1.0
22	3	3	4	1.0

表 2 起始点元胞的时变交通需求

Tab. 2 Resource cells' flow demand change with time

时段	0	1	2	3	4	5	6	7~11	12~40
元胞 20 的需求 $d_{20}^i$ (架)	1	1	1	1	1	1	1	1	0
元胞 21 的需求 $d_{21}^i$ (架)	3	3	2	2	1	1	1	0	0
元胞 22 的需求 $d_{22}^i$ (架)	4	4	3	3	2	2	1	0	0

### 3.2 仿真结果分析

采用 GAMS23. 4. 3 求解第 2 节的匝口流量控制模型,结果分析如下:

1)系统清空时间:定义为从仿真开始到最后一架飞机抵达虚拟终点所经历的时间。能反映空中高速路系统运行的效率,可用于评价空中高速路匝口设置方案。计算得 30 个单位时间间隔  $\tau$ 。

2)系统最短时间:定义为所有飞机从起点到虚拟终点所用的时间总和。其反应的是系统的总时间成本,计算得  $679\tau$ 。

3)匝口起点处的等待时间:定义为所有飞机等待起飞进入匝口时间之和,即匝口起点处的总延误,计算得  $157\tau$ 。

4)目标函数最小值:求计算得 2 257. 8 min。

5)最优匝口流量分布:定义为匝口处飞机进入空中高速路的最优流量分布。求解结果见表 3。

6)系统最优的交通流动态结果。通过模型,可以获得任意时间间隔内每个元胞上的飞机数。

表 3 最优匝口流量分布

Tab. 3 Optimal flow distribution of ramps

匝口序号	元胞连接	时段	流量/架
1	16-3	4	2
	16-3	8	2
	16-3	10	1
	16-3	14	2
	16-3	16	3
	16-3	18	3
2	19-11	4	3
	19-11	6	3
	19-11	8	3
	19-11	10	3
	19-11	14	2
	19-11	18	1
	19-11	20	2
	19-11	21	1
	19-11	25	1

## 4 结语

本文基于元胞传输理论建立了空中高速路匝口流量控制模型,通过对线性模型的求解得出了一系列有关匝口控制的参数和结果,并进行了仿真模拟,获取系统最优的动态交通流结果。仿真结果显示,本文方法可为设置空中高速路的匝口以及优化整个空中高速路系统的运行提供理论参考。

### 参考文献(References):

- [1] Concept of operation for the next generation air transportation[R]. Washington DC:Joint planning and development office, 2007.
  - [2] Ben van Houtte. The single European sky:EU reform of air traffic management[J]. Common market law review,2004,41(6):1595-1612.
  - [3] Hering H. Air traffic freeway system for Europe [J]. Eurocontrol experimental centre technical note, 2005,3(5):29-36.
  - [4] Banavar Sridhar, Shon Grabbe, Kapil Sheth, et al. Initial study of tube networks for flexible airspace utilization[R]. AIAA 2006-6768.
  - [5] Robert Hoffman, Joseph Prete. Principles of airspace tube design for dynamic airspace configuration [C]// The 26th congress of international council of the aeronautical sciences (ICAS). Alaska:ICAS press,2008: 14-19.
  - [6] 张新瑜,王莉莉,张兆宁. 空中交通流微观跟驰模型研究[J]. 中国民航飞行学院学报,2011,22(4):5-8.
  - [7] 王莉莉,张新瑜,张兆宁. 空中高速路交通流的跟驰现象及流量模型[J]. 西南交通大学学报,2012,47(1): 158-162.
  - [8] 王莉莉,李宏发,张雄飞. 空中高速路匝口排序延误研究[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(6):1-3.
  - [9] DAGANZO F C. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory [J]. Transportation research part B,1994,28(4):269-287.
  - [10] 张兆宁,黄雪征,王莉莉. 基于元胞传输理论的空中高速路突发事件消散建模[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2012,33(3):1-5.
- ZHANG Xinyu, WANG Lili, ZHANG Zhaoning. Study on air traffic flow microscopic following model [J] Journal of civil aviation flight university of china, 2011,22(4):5-8. (in Chinese)
- WANG Lili, ZHANG Xinyu, ZHANG Zhaoning. Following phenomenon and air freeway flow model[J] Journal of southwest jiaotong university,2012,47(1): 158-162. (in Chinese)
- WANG Lili, LI Hongfa, ZHANG Xiongfei. Study on queuing delay of air highway ramp[J]. Journal of civil aviation university of China, 2011, 29(6):1-3. (in Chinese)
- ZHANG Zhaoning, HUANG Xuezheng, WANG Lili. Modeling of air highway emergencies dissipation[J]. Journal of henan university of science and technology: natural science edition,2012,33(3):1-5. (in Chinese)

(编辑:徐敏)

## 第二届全国图象图形联合学术会议(UCIG 2013)

### 征文通知

主办单位:陕西省图象图形学学会  
 承办单位:空军工程大学航空航天工程学院、陕西省图象图形学学会  
 协办单位:中国地球物理学会国家安全专业委员会  
 陕西省计算机学会 陕西省信号处理学会  
 陕西省地球物理军事地理安全专业委员会  
 陕西省生物医学工程学会 天津市图象图形学学会  
 北京市图象图形学学会 上海市图象图形学学会  
 广东省图象图形学学会 东北地区图象图形学学会

本届全国图象图形联合学术会议由多家学会联合主办,将于2013年8月2日~5日在古城西安召开。会议的主题是“图象图形理论与应用研究”。这是继首届全国省市级图象图形学会联合学术会议成功召开后的又一次盛会。会议将团结广大图象图形科技工作者,提供图象图形学科同其他相关学科和技术领域的交流研讨,展示图象图形科技领域的研究成果,促进图象图形学术研究和科技发展。届时将邀请中国图象图形学学会常务理事、安徽大学原副校长韦穗教授作“光相位的非干涉检索”报告,西安交通大学机械学院院长徐光华教授作“基于稳态视觉诱发电位的意念控制技术研究与应”报

告,并开设多个专题小组进行交流和讨论。大会除出版论文集以外,将从参会宣读的论文中评选优秀论文,并向《中国图象图形学报》、《空军工程大学学报》、《光子学报》、《信号处理》、《数据采集与处理》、《中国体视学与图像分析》、《光电工程》等刊物推荐发表。

#### 征文范围:

- (1) 图象图形学基础理论与算法;
- (2) 军事领域的图象图形技术;
- (3) 农业工程中的图象图形技术;
- (4) 文化遗产领域的图象图形技术;
- (5) 医学影像技术;
- (6) 其他领域的图象图形技术。

征稿截止日期:2013年5月30日

录用通知日期:2013年6月30日

投稿方式:纸质和电子稿同时邮寄和发送(论文格式见本刊46页);请在信封左下角标注“稿件”二字。

邮寄投稿:陕西省西安市友谊西路西北工业大学电子信息学院蒋晓悦

(邮编:710072)

电子稿投稿邮箱:ucig2013@163.com

联系人:蒋晓悦 手机:18092499579