

文章编号:1671-1637(2016)02-0100-09

终端区空域结构调整对进场交通流的影响

张洪海,廖志华,张启钱,张翔宇

(南京航空航天大学 民航学院,江苏 南京 211106)

摘要:根据终端区空域运行规则,采用网络理论建立了终端区空域网络模型,基于终端区航空器微观行为建立了空中交通流跟驰模型和等待模型,基于 NetLogo 仿真平台进行了仿真试验,分析了不同入度分布的空域结构对交通流的影响。仿真结果表明:当密度小于等于 $0.075 \text{ 架次} \cdot \text{km}^{-1}$,速度大于等于 $0.04 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,交通流处于自由相;当密度为 $0.075 \sim 0.200 \text{ 架次} \cdot \text{km}^{-1}$ 且速度大于等于 $0.04 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,交通流处于畅行相;当密度大于 $0.200 \text{ 架次} \cdot \text{km}^{-1}$,小于最大密度时,交通流处于拥塞相;随着航班波作用的减弱,交通流进入反向畅行相,之后进入反向自由相;当进场交通流分布一定,入度值依次为 2、3、1 时,交通流速度小,密度大,拥塞消散最慢,入度值依次为 3、2、1 时,交通流速度大,密度小,拥塞消散最快。可知,增大空域网络上游关键节点的入度,使进场交通流提前完成汇聚,有利于交通流快速运行,增大交通流量;减小空域网络下游关键节点的入度,有利于交通流在达到拥塞相后快速完成消散。

关键词:空中运输;空中交通流;空域结构;跟驰模型;交通流相态;终端区

中图分类号:V355

文献标志码:A

Impact of adjusting airspace structure on arrival traffic flow in terminal area

ZHANG Hong-hai, LIAO Zhi-hua, ZHANG Qi-qian, ZHANG Xiang-yu

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: The airspace network model in terminal area was built according to the airspace operation rules in terminal area by the network theory. Air traffic flow following model and holding model were built based on aircraft microcosmic behaviors. Simulation test was carried out based on NetLogo simulation platform. The impact of airspace structures with different in-degree distributions on traffic flow was analyzed. Simulation result shows that when the density is less than or equal to $0.075 \text{ flight per km}$ and the velocity is more than or equal to $0.04 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, the traffic flow is in free phase. When the density is $0.075 \sim 0.200 \text{ flight per km}$ and the velocity is more than or equal to $0.04 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, the traffic flow is in unblocked phase. When the density is more than $0.200 \text{ flight per km}$ and less than the maximal density, the traffic flow is in congestion phase. With the decrease of flight wave function, the traffic flow enters inverse unblocked phase, then inverse free phase. Under the condition that the arrival traffic flow distribution is fixed, when the in-degree value is 2, 3, 1 successively, the velocity of traffic flow is small, the density is big, and the congestion dissipates slowest. When the in-degree value is 3, 2, 1 successively, the velocity of traffic flow is big, the density is small, and the congestion dissipates quickest. It

收稿日期:2015-11-21

基金项目:国家自然科学基金项目(61104159);江苏省自然科学基金项目(BK20131366)

作者简介:张洪海(1979-),男,山东鄄城人,南京航空航天大学副教授,工学博士,从事复杂空中交通系统研究。

is known that increasing key node in-degree of up-stream in airspace network can make arrival traffic flow converge ahead of time, make traffic flow operate faster and increase traffic flow rate. Decreasing key node in-degree of down-stream in airspace network is benefit to congestion dissipating quickly after traffic flow entering congestion phase. 1 tab, 6 figs, 25 refs.

Key words: air transportation; air traffic flow; airspace structure; following model; traffic flow phase; terminal area

Author resume: ZHANG Hong-hai(1979-), male, associate professor, PhD, +86-25-52112669, zhh0913@163.com.

0 引言

终端区是空域拥堵、航班延误、事故易发的空中交通管制区域,是整个空中交通网络的瓶颈。终端区空中交通流是进离场航班在有限的时间和空间内的聚集现象,能够反映终端区特定时空内航班的流量分布状况、密集程度和运行效率等。研究终端区交通流特性及其影响规律是揭示终端区空中交通拥堵机理的基础,对于优化终端区空域结构,提高运行效率、降低航班延误等具有重要的理论意义和应用价值。终端区空域结构、管制规则、航空气象等因素对空中交通流的影响较大。

终端区进离场航线网络结构复杂,交通密度较大,飞行冲突调配困难,是整个空中交通网络中最复杂的运行单元。目前,国内外相关研究主要集中在终端区容量^[1]与排序优化^[2-5]、空域结构优化、进离场流量管理等方面。Mihetec等基于空域灵活使用,研究了临时性、模块化空域结构优化对飞行效率的影响,模型优化结果使得飞行效率得到显著提升^[6];Kulkarni等基于管制负荷的均衡性提出了空域动态配置算法^[7];Savai等提出了自适应动态空域配置算法,并基于图模型研究了空域配置优化方法^[8];Tang等基于智能体和几何模型研究了多目标约束下的空域资源动态配置问题^[9];De Albuquerque Filho分析了空中交通结构和管控技术,明确了空域结构与交通流的定性关系^[10];张明等研究了基于空域灵活使用的终端区扇区优化划设方法,并验证了该划设方法对终端区交通运行具有较好的优化效果^[11];孙晓阳等则以空域航路为研究对象提出了空域和流量协同管理概念,建立了以最小运行成本为目标的数学模型,以达到减小航班延误的目标^[12];陈星分别从航路、扇区、终端区3个方面研究了空域动态管理策略,提出了一种动态多阶段优化模型与启发式求解算法^[13],但并未深入研究空域与交通流的内在关系;陈欣等通过引入满意度函数,以航班流量和容

量利用满意度最大化为目标,建立了机场空侧定位点流量分配和跑道容量利用的多目标优化模型^[14];刘强等通过对交通流LWR理论进行改进与元胞模型理论相结合,并采用离散控制系统线性二次型最优控制理论对模型进行了分析,实现对特定区域内流量进行预测^[15];程朋等研究了空域网络结构和确定容量条件下空中交通流的动态行为,提出了多品种动态网络流模型,从宏观角度分析了动态网络流模型的计算性能^[16]。

近年来,国内外学者开始关注空中交通流蕴含的科学规律问题。Menon等建立了简化空中交通流欧拉数学模型^[17];Bayen等把欧拉网络模型转化成线性网络控制问题^[18];Sun等对比分析了不同空中交通流模型的特点^[19];王莉莉等提出了空中高速跟驰飞行模型^[20];张洪海等通过广义跟驰仿真初步探讨了终端区空中交通流的不同相位问题^[21],并对空中交通流基本参数关系进行了仿真试验分析^[22-24],实测数据也表明了空中交通流基本相态阶段和参数间的相关关系^[25]。但上述研究尚处于起步阶段,空中交通流受空域结构、航空气象等因素的影响规律尚不清楚,因此,本文基于终端区空域网络、航空器微观跟驰原理和交通管制策略,着重研究揭示不同终端区空域结构下进场交通流演变规律,以期为终端区空域结构优化调整和空中交通高效运行提供部分理论基础。

1 终端区空域网络建模

在传统导航或区域导航方式下,终端区空域的导航点是通过导航台或卫星定位系统确定的。在一般情况下,所有进场航空器均需沿既定航线朝导航点飞行,且飞行方向唯一。考虑等待空域的特殊性,允许航空器从等待定位点返回等待定位点,其飞行距离与等待程序时间、指定的等待速度有关。将导航点作为网络的节点,不同导航点之间的连线作为网络的边,边长为航空器飞行距

离,因此,终端区进场空域结构网络是一个有权、单向的网络,也是规则网络。与一般复杂网络相比,其节点度分布均匀,聚类系数很小,结构相对简单,从节点度、权值、网络有效性等指标难以区分此类网络。根据空域运行特点,汇聚点和等待空域的设计是影响空域运行的关键,因此,节点的入度与出度能较客观地反映空域网络中交通流流入与流出的复杂状态。

一般地,终端区进场航线构成的网络可抽象为有向图,用 (P, E) 表示, P 为网络的节点, E 为网络的边。有向边 $(p_\alpha, p_\beta) \in E$ 存在一个理论容量 C , $C \geq 0$, p_α, p_β 为编号为 α, β 的节点,网络的静态拓扑结构可描述为 (P, E, C) 。用 n 阶广义邻接矩阵 A 表示具有 n 个节点网络的连通性和有向性

$$A = [a_{\alpha\beta}(t)]_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11}(t) & \cdots & a_{1n}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1}(t) & \cdots & a_{nn}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $a_{\alpha\beta}(t)$ 为 t 时刻编号为 α 的节点 p_α 与编号为 β 的节点 p_β 的连通状态变量, $a_{\alpha\beta}(t)=1$ 表示从节点 p_α 可飞向节点 p_β , $a_{\alpha\beta}(t)=-1$ 表示从节点 p_β 可飞向节点 p_α , $a_{\alpha\beta}(t)=0$ 表示节点 p_α 与节点 p_β 无航线。

当 $a_{\alpha\beta}(t)+a_{\beta\alpha}(t)=2$ 时,则 $a_{\alpha\beta}(t)=a_{\beta\alpha}(t)=1$, $\alpha=\beta$,表示节点 p_α 为等待空域的出入口,允许交通流在此节点循环运行;当 $a_{\alpha\beta}(t)+a_{\beta\alpha}(t)=0$ 且 $a_{\alpha\beta}(t) \neq 0$,则 $a_{\alpha\beta}(t)=1, a_{\beta\alpha}(t)=-1$ 或 $a_{\alpha\beta}(t)=-1, a_{\beta\alpha}(t)=1$, $\alpha \neq \beta$,表示存在节点 p_α 到节点 p_β 的单向航段或节点 p_β 到节点 p_α 的单向航段。

用 n 阶权值矩阵 $L=[l_{\alpha\beta}(t)]_{n \times n}$ 表示各航段有效长度

$$l_{\alpha\beta}(t) = \begin{cases} l_0 & \alpha = \beta \\ s_{\alpha\beta} & \alpha \neq \beta \end{cases} \quad (2)$$

式中: l_0 为标准等待程序飞行距离; $s_{\alpha\beta}$ 为节点 p_α 与 p_β 的直线距离,为标准航段长度。

设航段 $l_{\alpha\beta}(t)$ 指定的飞行速度为 $v_{\alpha\beta}(t)$,则速度矩阵为 $V=[v_{\alpha\beta}(t)]_{n \times n}$ 。设节点 p_α 与节点 p_β 之间的管制间隔为 $d_{\alpha\beta}(t)$,管制间隔矩阵为 $[d_{\alpha\beta}(t)]_{n \times n}$,则容量矩阵可表示为 $C_1=[a_{\alpha\beta}(t)l_{\alpha\beta}(t)/d_{\alpha\beta}(t)]_{n \times n}$ 。

综合式(1)、(2),空域结构的网络矩阵 B 可描述为

$$B = [A \quad C_2 \quad C_1] \quad (3)$$

$$C_2 = [a_{\alpha\beta}(t)l_{\alpha\beta}(t)]_{n \times n}$$

为描述空域网络的结构特性,定义节点的入度与出度,当入度较大且出度较小时,节点汇聚航

段多且下游航段少,易形成交通堵塞,导致调配难度大;等待空域节点入度越大,航空器进等待程序越复杂,下游节点出度越大,航空器出等待程序越复杂。

2 终端区空中交通流建模

终端区航空器微观行为有汇聚飞行与冲突解脱、高度穿越、速度调整、盘旋等待和机动飞行等,与空域拓扑结构和管制策略密切相关。与地面交通网络不同,空中交通网络更具有动态性和使用灵活性,交通流的流向影响空域结构,同时空域结构制约交通流的演变。

2.1 调速跟驰模型

航空器进场飞行是一个逐渐减速和下降高度的过程,忽略不同类型航空器的加速性能。设 t 时刻前、后航空器 i, j 在同航段内飞行,其位置分别为 $x_i(t), x_j(t)$,速度分别为 $\dot{x}_i(t), \dot{x}_j(t)$,加速度分别为 $\ddot{x}_i(t), \ddot{x}_j(t)$,最小安全间隔为 D_0 ,管制员经验管制余度为 ΔS ,管制余度表示达到最小安全间隔之前的一定距离。本文假设管制员具有可靠的冲突探测与解脱能力,能够同时解脱多架冲突航空器。

在最后进近阶段,航空器以一定的加速度下降,其安全间隔已经调配完成,设 v_{\min}, v_{\max} 为最后进近阶段的速度限制, Δt 为单位时间间隔,其速度变化可描述为

$$\dot{x}_i(t+1) = \dot{x}_i(t) - \ddot{x}_i(t)\Delta t \quad (4)$$

(1)当前、后机速度满足 $\dot{x}_i(t) \geq \dot{x}_j(t)$ 时,无论前机匀速或匀减速飞行,后机将保持匀速飞行。

(2)当前、后机速度满足 $\dot{x}_i(t) < \dot{x}_j(t)$ 时,前、后机存在追及趋势。

若前机匀速飞行,当二者间隔达到 $D_0 + \Delta S$ 时,后机将以前机速度为目标速度进行减速跟驰,有

$$|x_i(t) - x_j(t)| = D_0 + \Delta S \quad (5)$$

设经过时间 T 后,前、后机速度相等,设此时间间隔为 $D_1, D_1 \geq D_0$,则

$$D_1 = |x_i(t+T) - x_j(t+T)| = |x_i(t) - x_j(t) - \frac{1}{2} \int_t^{t+T} [\dot{x}_j(t) - \dot{x}_i(t)] dt| \quad (6)$$

由式(5)、(6)可得

$$\Delta S \geq \frac{[\dot{x}_j(t) - \dot{x}_i(t)]^2}{2 \ddot{x}_j(t+T)} \quad (7)$$

当式(7)成立时,后机以前机速度为目标速度进行减速跟驰,能保证基本安全间隔,否则后机需要采取机动跟驰。

若前机以 $v_0(t)$ 为目标速度匀减速飞行,当二者间隔达到 $D_0 + \Delta S$ 时,后机将以 $v_0(t)$ 为目标速度进行减速跟驰,同理有

$$\Delta S \geq \frac{[\dot{x}_j(t) - \dot{x}_i(t)][\dot{x}_j(t) + \dot{x}_i(t) - 2v_0(t)]}{2\ddot{x}_j(t+T)} \quad (8)$$

当式(8)成立时,后机以 $v_0(t)$ 为目标速度进行减速跟驰,能保证基本安全间隔,否则后机需要采取机动跟驰。

若前机处于偏航机动状态,前机机动出航角为 $\theta_i(t)$,后机将以前机的投影速度 $\dot{x}_i(t) \cos[\theta_i(t)]$ 为目标速度进行减速跟驰,假设前机匀速机动飞行,可得

$$\Delta S \geq \frac{\{\dot{x}_j(t) - \dot{x}_i(t) \cos[\theta_i(t)]\}^2}{2\ddot{x}_j(t+T)} \quad (9)$$

若前机以 $v_0(t)$ 为目标速度匀减速机动飞行,可得

$$\Delta S \geq \frac{\{\dot{x}_j(t) - v_0(t) \cos[\theta_i(t)]\}^2}{2\ddot{x}_j(t+T)} - \frac{[\dot{x}_i(t) - v_0(t)]^2 \cos^2[\theta_i(t)]}{2\ddot{x}_j(t+T)} \quad (10)$$

2.2 机动跟驰模型

在汇聚航线结构下,航空器汇聚排队的前后机关系较复杂,以距离汇聚点的实时距离为基准,根据先到先服务(First Come First Served, FCFS)策略进行排序,确定所有航空器的前后机关系,本节主要解析当管制余度无法满足调速要求时的后机机动问题。

设目标定位点的位置为 $x_0(t)$,后机出航角为 $\theta_j(t)$,则后机实际飞行距离为 $|x_0(t) - x_j(t)| / \cos[\theta_j(t)]$ 。若前机匀速(包括机动匀速)飞行,出航角为 $\theta_i(t)$,为求出后机最小出航角,令

$$|x_0(t) - x_i(t)| + D_0 + \left\{ \dot{x}_j(t) - \dot{x}_i(t) \cos[\theta_i(t)] \right\}^2 / 2\ddot{x}_j(t+T) = |x_0(t) - x_j(t)| / \cos[\theta_j(t)] \quad (11)$$

则

$$\theta_j(t) = \arccos \left\{ |x_0(t) - x_j(t)| / \left[|x_0(t) - x_i(t)| + D_0 + \left(\dot{x}_j(t) - \dot{x}_i(t) \cos(\theta_i(t)) \right)^2 / 2\ddot{x}_j(t+T) \right] \right\} \quad (12)$$

后机以出航角 $\theta_j(t)$ 飞行 $|x_0(t) - x_j(t)| / 2\cos[\theta_j(t)]$ 距离后,再以入航角 $\theta_j(t)$ 飞行相等距离,即以指定速度到达目标定位点。

同理,若前机匀减速(包括机动匀减速)飞行,后机最小出航角满足

$$\theta_j(t) = \arccos \left\{ |x_0(t) - x_j(t)| / \left[|x_0(t) - x_i(t)| + D_0 + \left(\dot{x}_j(t+T) - v_0(t) \cos(\theta_i(t)) \right)^2 / 2\ddot{x}_j(t+T) - \left(\dot{x}_i(t+T) - v_0(t) \right)^2 \cos^2(\theta_i(t)) / 2\ddot{x}_j(t+T) \right] \right\} \leq \theta_{\max} \quad (13)$$

式中: θ_{\max} 为考虑航空器性能和飞行安全所规定的最大机动角。

2.3 盘旋等待模型

由于进场是一个排序汇聚的过程,管制员需要控制进入排序队列航空器的架次,通常采用盘旋等待策略。航空器是否进入等待程序与过点间隔、尾流间隔、进场航段长度、队列航空器架次等因素有关,本文主要考虑过点间隔和航空器架次的影响。假设长度为 l 的航段上航空器架次为 m ,某定位点的过点间隔为 d ,当满足 $m \geq l/d$ 时,通过定位点的航空器需进入等待程序。

航空器爬升至指定空域进行盘旋等待等效于延迟了航空器到达目标节点的时间,设标准等待程序的时间为 h 。当管制员采取 FCFS 策略时,后机到达定位点后也将进入等待程序,后机与前机处于不同高度层,以保证与前机的过点间隔;当管制员允许后机“超车”行为时,则等待空域的航空器 i 在时刻 $t+h$ 需重新选择插队时机,其出等待约束为

$$\begin{cases} m < l/d \\ |x_j(t+h) - x_i(t)| \geq D_0 \end{cases} \quad (14)$$

或

$$\begin{cases} m < l/d \\ x_j(t+h) - x_i(t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

一般地说,一个指定等待空域最大允许等待架次受可使用高度层数限制。

3 仿真结果分析

3.1 仿真试验

本文基于 NetLogo 仿真平台编写 JAVA 程序实现上述模型,以中国某机场典型繁忙日的进场航班计划为原始数据,统计得到航班到达时间间隔服从负二项式分布,通过减小到达时间间隔的均值实现仿真时段内航班流的增量,从而保证增量后的航班仍满足航班到达特性。图 1 为仿真逻辑流程,图 2 为仿真界面。

主要参数设置:进场移交间隔为 12 km,当 $\alpha \neq \beta$ 时管制间隔为 6 km,当 $\alpha = \beta$ 时管制间隔为 2 km,标准等待程序飞行距离为 22 km,最大偏航角度为 45° ,航班计划选取增量后的高峰时段,入口节点 A1、A2、

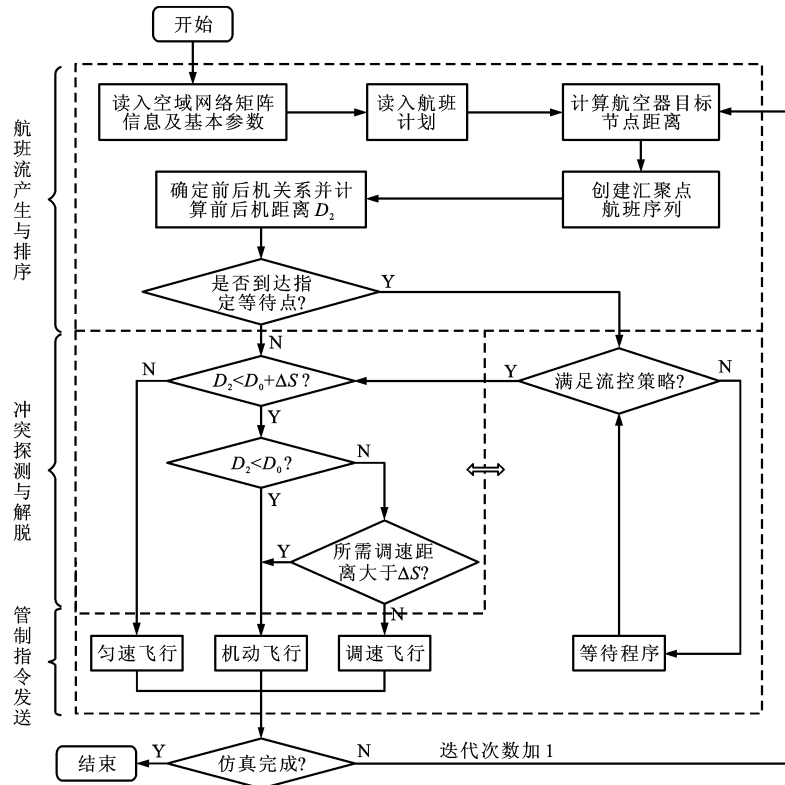


图 1 仿真逻辑流程

Fig. 1 Simulation logic flowchart

A3、A4 进场移交架次均为 30。静态权值矩阵与速度 矩阵分别为

$$[L_{qj}(t)]_{8 \times 8} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 55.6 & 70.2 & 70.0 & 82.4 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 25.0 & 44.6 & 57.3 & 73.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 25.0 & 39.6 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 40.2 & 45.0 & 0.0 & 83.4 \\ 55.6 & 25.0 & 25.0 & 40.2 & 0.0 & 20.0 & 38.4 & 0.0 \\ 70.2 & 44.6 & 39.6 & 45.0 & 20.0 & 22.0 & 25.0 & 39.0 \\ 70.0 & 57.3 & 0.0 & 0.0 & 38.4 & 25.0 & 0.0 & 16.0 \\ 82.4 & 73.0 & 0.0 & 83.4 & 0.0 & 39.0 & 16.0 & 0.0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[v_{qj}(t)]_{8 \times 8} = \begin{bmatrix} 0 & 650 & 650 & 650 & 580 & 500 & 420 & 360 \\ 650 & 0 & 650 & 650 & 580 & 500 & 420 & 360 \\ 650 & 650 & 0 & 650 & 580 & 500 & 420 & 360 \\ 650 & 650 & 650 & 0 & 580 & 500 & 420 & 360 \\ 580 & 580 & 580 & 580 & 0 & 500 & 420 & 360 \\ 500 & 500 & 500 & 500 & 500 & 430 & 400 & 340 \\ 420 & 420 & 420 & 420 & 420 & 400 & 0 & 320 \\ 360 & 360 & 360 & 360 & 360 & 340 & 320 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.2 结果分析

为分析空域结构调整对进场交通流的影响,改变邻接矩阵的连通状态即可实现空域结构的调整,并执行相同的航班计划进行仿真试验。本文通过大量仿真试验,选取最典型的 3 类入度分布的空域结构见图 3,H、I、F 分别为等待节点上游节点、等待节

点处和等待节点下游节点。

由图 3 可知,入口节点 A1 的进场路径存在 3 种方式,即在等待节点上游汇聚、等待节点处汇聚和等待节点下游汇聚。根据网络拓扑结构信息,除跑道端节点以外的所有节点的出度均为 1,表 1 为不同结构下关键节点的入度。

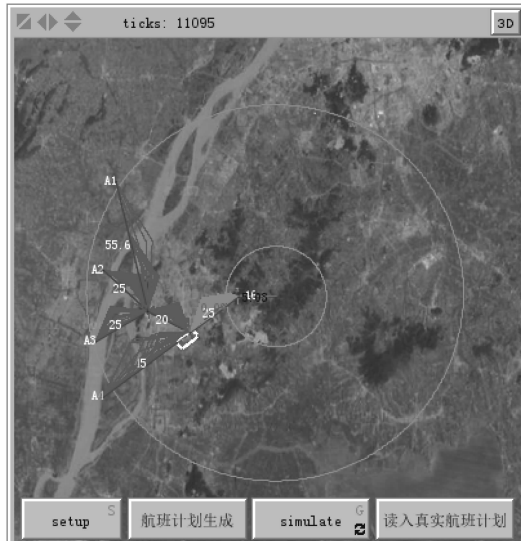


图2 仿真界面

Fig. 2 Simulation interface

表1 空域结构关键节点的入度

Tab. 1 In-degrees of key nodes in airspace structures

结构	点 H 入度值	点 I 入度值	点 F 入度值	总入度值
1	3	2	1	6
2	2	3	1	6
3	2	2	2	6

3.2.1 交通流参数影响分析

空中交通流基本特性参数包括流量、密度和速度,这些参数的定义在特定的研究对象下有具体的形式和内涵。本文研究对象是终端区,流量是指单位时间内终端区内某观测航段内的航空器数量,速度反映终端区交通流运行快慢,密度体现交通流的疏密程度。

不同空域汇聚结构下交通流参数变化见图4。图4(a)为不同空域汇聚结构下的流量变化,每个时间段为3 min,在相同的航班计划下,流量分布总体趋势一致;结构1最大流量为24架次,且最早完成120架次的降落;结构2最大流量为22架次,但完成航班降落耗时最长;结构3最大流量为20架次,其航班流分布最均匀。比较分析空域结构可知:结构1在等待空域上游的节点H完成了67%航班的汇聚,其入度值为2,航空器进等待程序只受航段A4-I交通流的影响,流量较大,下游节点F入度值为1,航空器出等待程序不会受到其他航段的影响,流速更快;结构2在等待点处汇聚,导致节点I短时交通流迅速增大,大量航空器需进入等待空域以满足安全间隔,造成流量减小,由于只有完成标准等待程序后才能进入下游航段,因此,交通流消散较慢;结构3等待节点上游完成50%航班的汇聚,航空器

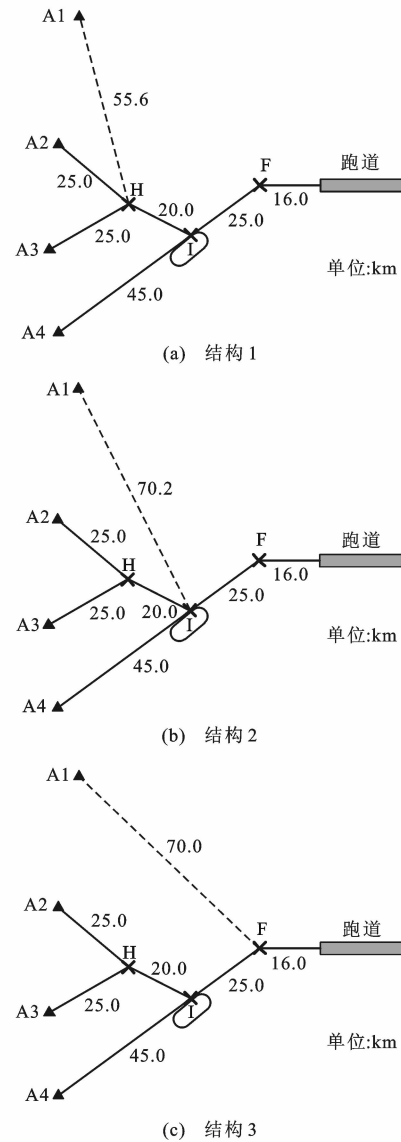


图3 三类空域结构

Fig. 3 Three kinds of airspace structures

出等待程序还受到航段A1-F交通流的影响。

图4(b)、(c)为不同空域汇聚结构下速度和密度的变化曲线,每个时间段为30 s。速度为当前空域所有航空器的平均速度,当航空器加入等待程序时,统计速度为零,密度为所有航段的线密度。分析可知,随着高密度航班波进入该空域,其速度在波动中缓慢下降,密度逐渐增大;当航班波消失时,速度逐渐增大,密度平稳减小。当大量航班到达时,3种结构下的交通流密度均逐渐增大,速度波动性减小;当超过时间段315时,航班波消失,空域自行完成交通流的消散,由于结构1在等待节点上游已经完成汇聚,且下游不受其他航段交通流的影响,因此,交通流密度较小,流速更快;结构2等待节点的入度为3,且达到速度的最小值,即大量航空器在等待空域

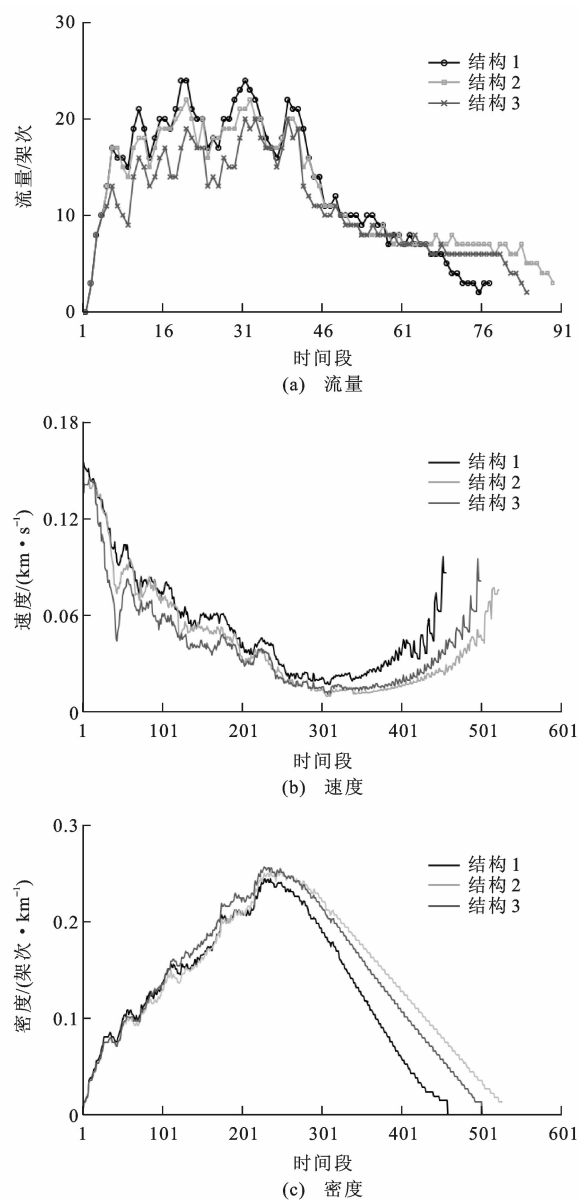


图4 不同空域结构下交通流参数变化曲线

Fig. 4 Variation curves of traffic flow parameters in different airspace structures

等待,导致后续交通流均将进入等待程序,交通流密度较大,消散缓慢。可见,结构1速度增加最快,密度下降率最大,结构2速度增大缓慢,密度下降率最小。

3.2.2 交通流相态影响分析

图5为结构1下的速度-密度关系。在一定密度区间内,终端区进场交通流存在明显相变和迟滞特征。根据仿真结果,可将交通流相态分为自由相、畅行相、拥塞相、反向畅行相以及反向自由相等5种相态。在自由相,交通流处于较高运行速度,速度随密度的增大缓慢减小,跟驰强度可忽略,交通流主要受标准进场程序约束;在畅行相,速度随密度的增大

波动性减小,航空器相互产生一定的跟驰反应,但跟驰强度暂未造成大量航空器机动飞行或进入等待程序,此时密度为 $0.075 \sim 0.200$ 架次 $\cdot \text{km}^{-1}$,且在密度分别为 0.075 、 0.100 、 0.150 、 0.200 架次 $\cdot \text{km}^{-1}$ 时,速度出现陡降现象;在拥塞相,跟驰强度过大而导致大量航空器机动飞行,且由于受到安全间隔约束,大量航空器进入等待空域,此时密度超过 0.200 架次 $\cdot \text{km}^{-1}$,速度变化发生反转,速度达到最小值,散点分布密集;在反向畅行相,航空器跟驰强度明显减小,速度随密度的减小逐渐增大;在反向自由相,跟驰强度可忽略,密度小于 0.025 架次 $\cdot \text{km}^{-1}$ 时速度随密度的减小迅速增大。与地面的三相交通流理论相比,空中交通流在拥塞消散时产生的反向相态是其独有的特点。

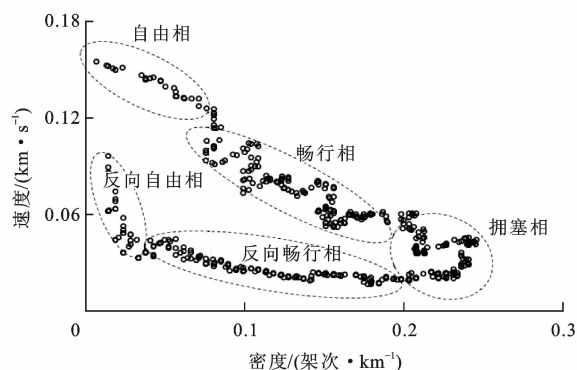


图5 结构1下的速度-密度关系

Fig. 5 Velocity-density relationship in structure 1

图6为不同空域汇聚结构下的速度-密度关系,在不同结构下,交通流均表现出了5种相态:当密度小于等于 0.075 架次 $\cdot \text{km}^{-1}$ 且速度大于等于 $0.04 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,交通流处于自由相,3种结构下的变化趋势一致;当密度为 $0.075 \sim 0.200$ 架次 $\cdot \text{km}^{-1}$ 且速度大于等于 $0.04 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,交通流处于畅行相,相同密度下结构1的速度最大,结构2、3较小,

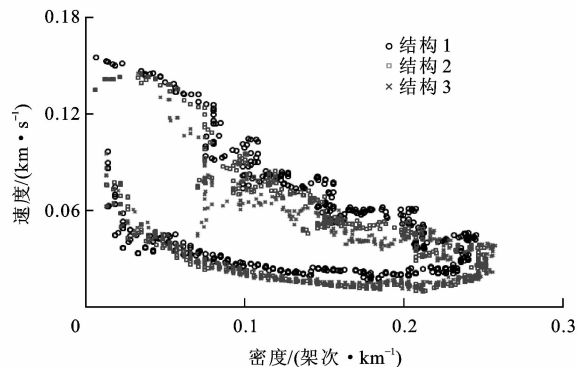


图6 不同空域结构下的速度-密度关系

Fig. 6 Velocity-density relationships in different airspace structures

与图4(b)一致;当密度大于 $0.200 \text{ 架次} \cdot \text{km}^{-1}$ 小于最大密度时,结构1以最大的速度进入拥塞相,结构3以最小的速度进入拥塞相;随着航班波作用的减弱,密度开始减小,交通流进入反向畅行相,此时速度小于等于 $0.04 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,结构1运行速度最大,结构2则出现了最小速度;当密度小于等于 $0.025 \text{ 架次} \cdot \text{km}^{-1}$ 时,3种结构下的速度均快速增大。

从空域结构上分析,结构1从上游到下游关键节点入度依次为3、2、1,交通流主要在上游完成汇聚,平均速度较大,有利于交通流快速运行,其进入拥塞相和反向畅行相后的速度仍较大,有利于交通流拥塞的快速消散;结构2的关键节点入度依次为2、3、1,交通流主要在等待空域节点I完成汇聚排序,造成该等待空域交通流消散缓慢,且达到拥塞相后速度较小;结构3的关键节点入度依次为2、2、2,交通流汇聚主要在节点F完成,由于交通流已经处于五边进近航段上,汇聚速度较小,速度调整余地很小,因此,交通流在畅行相运行速度最小,由于交通流分布较均匀,进入拥塞相后其运行速度较结构2大,拥塞消散较快。

综上分析,在既定进场交通流分布下,增大空域网络上游关键节点入度,使进场交通流提前完成汇聚,有利于降低交通流高峰时段密度,同时加快运行速度,达到增大交通流量的目的;减小空域网络下游关键节点的入度,有利于交通流在达到拥塞相后快速完成消散,但容易造成局部交通流量过大;增大上游关键节点入度,同时减小下游汇聚点入度,有利于交通流以较大的速度、较低的密度运行,且拥塞消散更快,既增大交通流量,又降低了一定的安全风险。

4 结 语

本文基于动态网络、跟驰原理和管制策略建立了终端区进场交通流模型,仿真分析了3类空域网络入度分布下的交通流特性。研究结果表明,增大空域网络上游关键节点入度,使进场交通流提前完成汇聚,有利于交通流快速运行,增大交通流量;减小空域网络下游关键节点的入度,有利于交通流在达到拥塞相后快速完成消散,但容易造成局部交通流量过大;当空域网络关键节点入度相等时,有利于促使交通流分布均匀,快速降低交通密度,但不同流向的交通流相互影响加剧,可能导致运行速度较小,因此,根据交通流到达分布特点合理调整空域结构,能达到增大交通流量、提高交通流运行速度与快速完成拥塞消散的目的。由于交通流与空域结构互适

应的耦合关系十分复杂,且具有动态特性,如何根据预测到达流实时调整空域结构以提升终端区交通流运行效率将是下一步需要研究的工作。

参考文献:

References:

- [1] CLARKE J P B, SOLAK S, REN Li-ling, et al. Determining stochastic airspace capacity for air traffic flow management [J]. *Transportation Science*, 2013, 47(4): 542-559.
- [2] JANIC M. Modelling the capacity of closely-spaced parallel runways using innovative approach procedures[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2008, 16(6): 704-730.
- [3] DELL'OLMO P, LULLI G. A dynamic programming approach for the airport capacity allocation problem[J]. *IMA Journal of Management Mathematics*, 2003, 14(3): 235-249.
- [4] ROMANO E, SANTILLO L C, ZOPPOLI P. A static algorithm to solve the air traffic sequencing problem[J]. *WSEAS Transactions on Systems*, 2008, 7(6): 682-695.
- [5] NIKOLERIS T, HANSEN M. Queueing models for trajectory-based aircraft operations[J]. *Transportation Science*, 2012, 46(4): 501-511.
- [6] MIHETEC T, STEINER S, ODIĆ D. Utilization of flexible airspace structure in flight efficiency optimization[J]. *PROMET-Traffic and Transportation*, 2013, 25(2): 109-118.
- [7] KULKARNI S, GANESAN R, SHERRY L. Dynamic airspace configuration using approximate dynamic programming: intelligence-based paradigm[J]. *Transportation Research Record*, 2012(2266): 31-37.
- [8] SAVAI M P, LI Jin-hua, WANG Tong, et al. An algorithm for adaptable dynamic airspace configuration[C]//AIAA. 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Reston: AIAA, 2010: 1-10.
- [9] TANG Jiang-jun, ALAM S, LOKAN C, et al. A multi-objective approach for dynamic airspace sectorization using agent based and geometric models[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 21(1): 89-121.
- [10] DE ALBUQUERQUE FILHO E A F. Analysis of airspace traffic structure and air traffic control techniques [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [11] 张 明,韩松臣. 基于空域灵活使用的终端空域规划设计方法[J]. *交通信息与安全*, 2013, 31(5): 5-9.
ZHANG Ming, HAN Song-chen. Method of terminal airspace planning based on flexible use of airspace[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2013, 31(5): 5-9. (in Chinese)
- [12] 孙晓阳,胡明华,张洪海. 空域和流量协同管理建模与仿真[J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10(1): 72-76.
SUN Xiao-yang, HU Ming-hua, ZHANG Hong-hai. Modeling and simulation of collaborative management for airspace and traffic flow[J]. *Journal of Traffic and Transportation*

- Engineering, 2010, 10(1): 72-76. (in Chinese)
- [13] 陈 星. 动态空域飞行流量自适应调配技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- CHEN Xing. Auto-adapted adjusting technology of flight flow in the dynamic airspace[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [14] 陈 欣, 陆 迅, 朱金福. 枢纽机场空侧容量利用和流量分配优化模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(5): 680-684.
- CHEN Xin, LU Xun, ZHU Jin-fu. Optimization model of hub-airport airside capacity utilization and flow allocation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 39(5): 680-684. (in Chinese)
- [15] 刘 强, 白存儒, 林 键, 等. 空中交通流线性二次型最优控制[J]. 交通与计算机, 2008, 26(6): 116-119.
- LIU Qiang, BAI Cun-ru, LIN Jian, et al. Linear-quadratic optimal control of air traffic flow [J]. Computer and Communications, 2008, 26(6): 116-119. (in Chinese)
- [16] 程 朋, 崔德光, 吴 澄. 空中交通短期流量管理的动态网络流模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(11): 114-118.
- CHENG Peng, CUI De-guang, WU Cheng. Dynamic network flow model for short-term air traffic flow management[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2000, 40(11): 114-118. (in Chinese)
- [17] MENON P K, SWERIDUK G D, BILIMORIA K D. New approach for modeling, analysis and control of air traffic flow[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2004, 27(5): 737-744.
- [18] BAYEN A M, RAFFARD R L, TOMLIN C J. Adjoint-based control of a new Eulerian network model of air traffic flow[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(5): 804-818.
- [19] SUN Deng-feng, STRUB I S, BAYEN A M. Comparison of the performance of four Eulerian network flow models for strategic air traffic management[J]. Networks and Heterogeneous Media, 2007, 2(4): 569-595.
- [20] 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.
- WANG Li-li, ZHANG Xin-yu, ZHANG Zhao-ning. Following phenomenon and air freeway flow model[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(1): 158-162. (in Chinese)
- [21] 张洪海, 杨 磊, 别翌荟, 等. 终端区进场交通流广义跟驰行为与复杂相变分析[J]. 航空学报, 2015, 36(3): 949-961.
- ZHANG Hong-hai, YANG Lei, BIE Yi-hui, et al. Analysis on generalized following behavior and complex phase-transition law of approaching traffic flow in terminal airspace[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(3): 949-961. (in Chinese)
- [22] ZHANG Hong-hai, XU Yan, YANG Lei, et al. Macroscopic model and simulation analysis of air traffic flow in airport terminal area[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2014, 2014: 1-15.
- [23] 张洪海, 许 炎, 张哲铭, 等. 终端区空中交通流参数模型与仿真[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(6): 58-64.
- ZHANG Hong-hai, XU Yan, ZHANG Zhe-ming, et al. Air traffic flow parameter model and simulation for airport terminal area[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(6): 58-64. (in Chinese)
- [24] 张洪海, 廖志华, 祝前进. 基于 CTM 的终端区交通流参数关系研究[J]. 航空计算技术, 2014, 44(4): 1-5, 9.
- ZHANG Hong-hai, LIAO Zhi-hua, ZHU Qian-jin. Research on relationships among terminal traffic flow parameters based on CTM[J]. Aeronautical Computing Technique, 2014, 44(4): 1-5, 9. (in Chinese)
- [25] 许 炎, 张洪海, 杨 磊, 等. 基于实测数据的终端区空中交通流特性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(1): 205-211.
- XU Yan, ZHANG Hong-hai, YANG Lei, et al. Analysis of air traffic flow characteristics in airport terminal area based on observed data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(1): 205-211. (in Chinese)