

## 航空、航天

# 空中交通网络中航空器群的实证分析

王红勇<sup>1,2</sup> 徐肖豪<sup>2</sup> 温瑞英<sup>2</sup>

(南京航空航天大学民航学院<sup>1</sup>, 南京 210016; 中国民航大学天津市空管运行规划与安全技术重点实验室<sup>2</sup>, 天津 300300)

**摘要** 现有的空中交通复杂性研究忽略了空中交通流结构影响, 难以反映航空器空间密度分布不均匀的复杂性特征。利用复杂网络中社团结构的思想, 对空中交通流结构特征进行研究。建立了航空器群模型, 提出了基于深度优先遍历算法的航空器群发现方法, 避免了传统社团划分方法需事先指定社团个数的缺点; 并从模块度、内聚度、灵敏度几个角度形成了群性能指数, 用于综合反映航空器群划分质量。采用实际航班数据对群划分结果进行评价分析, 选取 60 km 为最佳阈值对航空器群的统计特征进行了进一步分析。结果表明, 扇区内航空器间的平均水平间隔约为群内航空器间平均水平间隔的 6 倍; 航空器群规模一般都比较小, 一半以上的群规模小于 6 架; 航空器群的生命期最长为 9 min, 但 57% 以上群的生命期为 2 min。

**关键词** 空中交通 复杂网络 社团结构 航空器群 交通复杂性

中图法分类号 V355; 文献标志码 A

空中交通管理的基本任务是保障空中交通安全, 当两架航空器或多架航空器接近时, 管制员必须及时观察航空器间的接近状态, 了解空中交通态势的危险程度并采取相应的解决方案。因此, 如何描述航空器间的这种接近关系, 并量化分析不同交通态势给管制员带来工作难度非常重要。目前, 国内外学者主要采用空中交通复杂性概念对空中交通态势进行刻画。

当前空管系统中, 空域被划分成多个扇区, 每个管制员负责其管辖扇区内的飞行安全。因此, 基于空中交通复杂性刻画空中交通态势特征必须以管制员工作负荷评估为依据。航空器数量表示了空中交通态势的基本特征, 是评估管制员工作负荷的基础, 首先被选为空中交通复杂性的基本指标<sup>[1,2]</sup>。除航空器数量外, 还有许多指标与管制员的工作负荷相关, 如空域结构和交通流特征<sup>[3—5]</sup>。空域结构因素包括一个空域所具有的物理结构, 如地形构造、航路数量、交叉点数量等。交通流特征包括了航空器机型混合度、爬升航空器比例、下降航空器比例、汇聚航空器比例等。这些空域结构和交通流因素综合相互作用形成了扇区整体空中交通复杂性<sup>[6—8]</sup>。也有不少学者从复杂系统的角度对空中交通系统的复杂性进行了深入研究。Delahaye 基于飞机航迹信息

(如位置、速度等)计算出交通态势最基本的内禀特征(如相对距离、相对速度), 形成航空器间影响关系的数学化描述, 计算出单航空器对的复杂性值, 再通过分形维数、李雅普诺夫指数等指标刻画航空器间影响关系的无序性, 以此作为空中交通复杂性的度量<sup>[9]</sup>。张进、王红勇等基于航空器迫近效应、冲突效应、连携效应等提出了扇区复杂度的计算方法<sup>[4,10]</sup>。为考虑突发扰动对原区域内航空器间关系的影响, Keumjin Lee 等提出了基于交通流扰动的复杂性模型, 将复杂性程度定义为管制员应对突发状态所需的管制活动的量度<sup>[11]</sup>。为进一步描述空中交通态势的演进过程, Delahaye 等基于航空器间影响关系建立了空中交通态势演进的动力系统模型, 并用拓扑熵描述交通组织无序性, 建立了新的空中交通复杂性度量标准<sup>[12]</sup>。

以上研究从不同角度对空中交通态势的复杂程度进行了探讨; 但从交通流本身的结构角度进行航空器间的接近关系的研究稍显不足。事实上, 空中交通流的结构特性是空中交通态势的基本特征, 可从本质上刻画扇区内航空器间的接近关系。自然界中存在大量的复杂系统都可以通过网络加以描述, 复杂网络就是对复杂系统的抽象和描述方式, 它突出强调了系统结构的拓扑特征。原则上说, 任何包含大量组成单元的复杂系统, 当把构成单元抽象成节点、单元之间的相互关系抽象为边时, 都可以当作复杂网络来研究<sup>[13]</sup>。本文利用复杂网络理论, 从社团结构角度对空中交通流中普遍存在的一种典型网络簇结构进行研究。

2016年5月27日收到

国家自然科学基金委员会与

中国民用航空局联合资助项目(U1333108)、

天津市应用基础与前沿技术研究计划(14JCQNJC04500)资助  
第一作者简介: 王红勇(1979—), 男, 山西洪洞人, 博士研究生, 助理研究员。研究方向: 空中交通管理。E-mail: 13920819396@163.com。

## 1 建模

### 1.1 空中交通态势网络

空中交通系统在运行过程中经常会出现拥挤、延误等现象,这大多是由空域中运行的航空器通过相互影响而实现的,交通流的结构和动态特性决定了空中交通系统的整体行为特征。空中交通流的结构从复杂网络角度可以抽象为空中交通态势网络,节点为航空器,边为航空器间的空间接近关系。在空中交通运行过程中,航空器的空间位置及航空器间的接近关系在不断发生变化,同时考虑到航空器的起飞或落地情形,将空中交通态势网络视为随时间变化的动态网络。构建动态空中交通态势网络模型:

$$G = \{G(1), G(2), \dots, G(t)\}.$$

该模型是时间上的有序网络集合,其中  $G(t) = [V(t), E(t)]$  是  $t$  时刻网络拓扑图,  $V(t)$  与  $E(t)$  分别是该时刻网络的顶点集和边集。图 1 为空中交通态势动态网络示意。在空中交通态势动态网络中,节点位置的空间分布、拓扑连接关系都是动态演化的,节点的状态和网络的拓扑之间可能是相互影响的,且系统在整体层面上会展示出各种各样的整体行为。

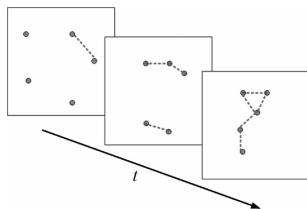


图 1 动态网络示意

Fig. 1 The schematic diagram of dynamic network

### 1.2 航空器群

在复杂网络的研究中,越来越多的网络被发现具有社团结构(或簇结构、群结构),即原网络可以看成是若干个社团或群进行相互耦合形成。在这些群内部各节点的耦合关系相对紧密,而在连接各群的那些节点之间的耦合关系则相对稀疏。在实际的空中交通态势网络中也存在类似的结构,将此定义为航空器群。在同一个航空器群内,航空器间的空间接近关系比较强,航空器的空间密度较大;在不同的航空器群内,航空器间的空间接近关系则较弱,航空器间的距离较远。从动态性角度看,当空中交通态势网络动态变化时,网络中的航空器群随时间推进也会发生生成、消散、合并、分裂等事件,这些事件将导致航空器群的结构形态发生动态演化。设空中交通态势动态网络中航空器群结构为:

$$C = \{C(1), C(2), \dots, C(t)\}.$$

式中,  $C(t) = \{C(t)_1, C(t)_2, \dots, C(t)_k\}$  是第  $t$  时刻网络  $G(t)$  的群结构,且  $C(t)_i$  是  $C(t)$  中第  $i$  个航空器群。

## 2 方法

### 2.1 航空器群发现方法

社团结构发现是复杂网络领域中的一个重要课题,从空中交通网络中发现航空器群的本质就是从一个动态复杂网络中寻找网络社团结构。目前由物理学、应用数学、计算机科学、生物学和社会学中的原理和方法已发展出许多社团结构探测算法,如基于 Laplace 矩阵或 Normal 矩阵的谱方法、基于相似度层次聚类或  $K$ -means 聚类的方法等<sup>[14]</sup>。当前大多社团结构发现方法,都需要事先指定社团数量或其他一些社团判定参数。本文基于图的深度优先搜索算法提出了一种适宜航空器群特征的社团结构发现方法。深度优先搜索过程为:首先建立相应的网络结构,从网络中某个顶点  $V$  出发,访问此顶点,然后依次从  $V$  的未被访问的邻接点出发深度优先遍历网络,直至网络中所有和  $V$  有路径连通的顶点都被访问到。若此时网络中尚有顶点未被访问到,则另选网络中一个未曾被访问的顶点作起始点,重复上述过程,直到所有点都被访问过<sup>[15]</sup>。

本算法包括五个步骤,具体描述如下:

Step1 初始化。计算当前航空器数目,记为  $n$ ;计算所有航空器间的距离,生成  $n \times n$  的航空器间隔矩阵  $D$ ;生成  $1 \times n$  的访问标记数组  $visited$ ,数组中每个元素的初值为 0。

Step2 设定阈值  $S$ ,生成当前时刻的邻接矩阵  $A$ 。若航空器  $i$ 、航空器  $j$  间存在接近关系,即两架航空器的水平距离小于等于  $S$ ,则  $a_{i,j} = 1$ ,否则  $a_{i,j} = 0$ 。

Step3 在邻接矩阵  $A$  中搜索一个顶点  $V_i$  满足  $visited(i) \neq 0$ 。若搜索失败,即所有航空器都被访问,则转至 Step5。

Step4 设置  $visited(i) = 1$ ,以节点  $V_i$  为起始点搜索建立航空器群集合  $C$ 。

Step4.1 如果对于所有顶点  $V_j$  ( $0 < j, j \leq n, j \neq i$ )

都有  $A_{i,j} = 0$ ,即该航空器节点没有邻接航空器,该航空器与任意航空器的距离都大于阈值,则跳转 Step3 重新选取新的节点。

Step4.2 创建新的航空器群  $C$ ,初始值  $C = \{V_i\}$ 。

Step4.3 搜索节点  $V_i$  所有未被访问的邻接航空器  $V' = \{V'_1, \dots, V'_j\}$ ,更新航空器群  $C = C \cup V'$ ,设

置相应节点的访问标记为 1。

Step4.4 搜索  $V'$  中所有未被访问的邻接航空器  $V'' = \{V'_i, \dots, V'_j\}$ , 更新航空器群  $C = C \cup V''$ , 设置相应节点的访问标记为 1, 递归搜索, 最终生成第  $k$  个群  $C_k = C$ 。跳转 Step3。

Step5 验证, 删除节点数量小于 3 的航空器群。

## 2.2 航空器群的评价指标

航空器群作为空中交通态势网络中的一种社团结构, 其划分的合理性、有效性需要一个评价准则。当前应用最广泛的社团结构评价指标是模块度指标, 可作为大部分网络中社团结构的评价标准。结合航空器群的实际物理意义, 本文进一步提出了考虑节点间距的内聚度指标, 反映群内航空器间的空间接近程度。空中交通态势网络本质上是一种动态复杂网络, 为测量这种动态网络中社团划分的灵敏程度, 提出了灵敏度指标。最后, 综合模块度、内聚度、灵敏度提出航空器群划分质量评价的群性能指数。

### 2.2.1 模块度

目前应用最广泛的群划分评价指标是 Newman 等于 2004 年定义的 NG 模块度函数(modularity), 基本思想是随机网络不会具有明显的群结构, 是通过衡量实际覆盖度与随机连接情况下期望覆盖度的差异大小来评估群结构<sup>[16]</sup>。模块度函数定义为:

$$Q_m(C) = \sum_{i=1}^k (e_{i,i} - a_i^2) \quad (1)$$

式(1)中,  $e_{i,i}$  表示第  $i$  个群内部连接边数目占原始网络总边数的比例,  $a_i$  表示第  $i$  个群与其他群相连边数目占原始网络总边数的比例,  $k$  为所划分的群数目,  $C$  为将网络进行群划分后的群集合,  $Q_m(C)$  为

$$Q_s(C) = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{|n_c - n_c^p|}{n_c^p}\right)^2 + \left(\frac{|m_c - m_c^p|}{m_c^p}\right)^2 + \left(\frac{|D_c - D_c^p|}{D_c^p}\right)^2}, & m_c^p, n_c^p, D_c^p \neq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad (5)$$

式(5)中,  $n_c, m_c, D_c$  分别为当前群划分为  $C$  时群内节点个数、边个数、平均间距;  $n_c^p, m_c^p, D_c^p$  分别为前一时刻群划分中的群内节点个数、边个数、平均间距;  $Q_s(C)$  为群划分  $C$  的灵敏度函数。 $Q_s(C)$  越大说明当前时刻的群划分结果与前一时刻的差异性越大, 划分的航空器群结构对交通流动态变化的反映越灵敏。

### 2.2.4 群性能指数

综合模块度、内聚度、灵敏度, 基于几何平均数给出了航空器群划分的群性能指数:

$$P(C) = \sqrt[3]{Q_m(C) Q_d(C) Q_s(C)} \quad (6)$$

群集合为  $C$  时的模块度值, 值为  $[0, 1]$ , 值越大说明网络的群结构越明显。

### 2.2.2 内聚度

模块度指数忽略了网络中节点间的距离对群划分的影响, 进一步考虑节点间的距离提出内聚度指数。定义如下:

$$Q_d(C) = 1 - \frac{D_c}{D} \quad (2)$$

式中,  $Q_d(C)$  为群集合为  $C$  时的内聚度值,  $D_c$  为所有群内节点的平均距离,  $D$  为网络中节点的平均距离, 设  $d_{u,v}$  为节点  $u, v$  间的距离,  $C_i$  为第  $i$  个群,  $n_i$  为群  $C_i$  中的节点个数,  $n$  为网络中节点个数, 则  $D_c$  和  $D$  可通过式(3)、式(4)计算:

$$D_c = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{(u,v \in C_i; u \neq v)} d_{u,v}}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (3)$$

$$D = \frac{\sum_{u=1}^{n-1} \sum_{v=u+1}^n d_{u,v}}{n} \quad (4)$$

从式(2)可知, 群内节点的平均间距相对于网络中所有节点的平均间距越小, 说明群内的连接越紧密, 群的内聚程度就越高, 所对应的群结构越佳。

### 2.2.3 灵敏度

航空器在空中飞行时, 其间距是随时间动态变化的。因此, 空中交通态势网络本质上是一种时变动态复杂网络, 为测量这种动态网络中群划分的灵敏程度, 提出了灵敏度指标。灵敏度指标是通过群内点个数、边个数、平均距离等的变化率来衡量群划分的灵敏程度, 定义如下:

将式(1)、式(2)、式(5)代入式(6)计算可得群性能指数  $P(C)$ ,  $P(C)$  越大说明当前群划分的总体性能越好。

## 3 统计分析

选取中国民航华东区域管制中心某管制扇区在 2013 年 10 月 1 日 09:00 至 23:59 期间的实际雷达数据, 对上述理论进行验证和统计分析。所选数据为该管制中心管制自动化的日常备份数据, 在通过文件进行拷贝和存储后, 实现对数据文件的解析。数据内容包括时间戳、二次雷达编码、航班号、

经度、纬度、高度、速度等信息。以 1 min 为时间步长,计算每时间步该扇区内航空器的水平间距,建立相应的空中交通态势网络。基于前一部分阐述的航空器群发现方法对网络中的航空器群进行识别,并依据群划分评价指标对划分结果进行评价和统计分析。

### 3.1 群划分的性能统计

在航空器群发现算法中,阈值  $S$  的设置非常关键,不同的  $S$  会导致完全不同的划分结果。为取得最佳的群划分结果,有必要对不同阈值的划分结果进行综合评价。本文设定 10 ~ 100 km 为阈值  $S$  的取值范围(步长为 10 km),对建立的 900 个空中交通态势网络(每分钟 1 个)进行航空器群划分。通过对每个阈值的群划分结果进行评价,从中选择性能指数最佳的阈值。

#### 3.1.1 模块度

基于公式(1)对每个空中交通态势网络中的群划分结果进行模块度评价,结果如图 2 所示。横轴为时间,纵轴为不同小时内群划分结果的模块度均值。从图 2 中可知,模块度的取值范围基本维持在 [0.1, 0.7] 之间,基本符合复杂网络中社团划分标准。然而,不同阈值对应的模块度值差别较大,且阈值越大模块度值越大,说明阈值越大则会有更多的航空器被划分在航空器群中。此外,即使同一个阈值,其对应的模块度在不同的时段也有所不同,说明航空器群的模块度是随着时间变化而变化的。众所周知,空中交通流模式是动态发生变化的,这也决定了在不同的时段内,空中交通网络中的群划分并不完全相同,其模块度也就会呈现相应的时间统计特征。

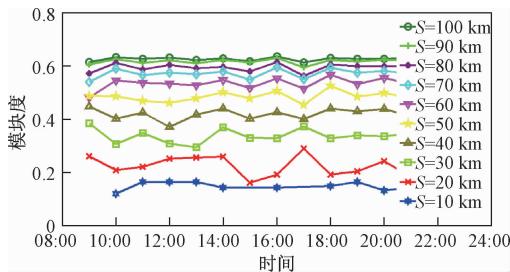


图 2 模块度统计特征

Fig. 2 Modularity statistical characteristics

#### 3.1.2 内聚度

基于公式(2)对每个空中交通态势网络中的群划分结果进行内聚度评价,结果如图 3 所示。从图 3 中可知,大多数的内聚度都比较大,说明航空器群之间的平均间隔与群外航空器之间相比都比较小,这也验证了航空器群划分的现实意义。同时,阈值

越小内聚度值越大,也与实际的空中交通特征相符。此外,与模块度类似,内聚度随着动态变化的空中交通流模式也具动态变化特征,且阈值越大动态变化特征越发明显。

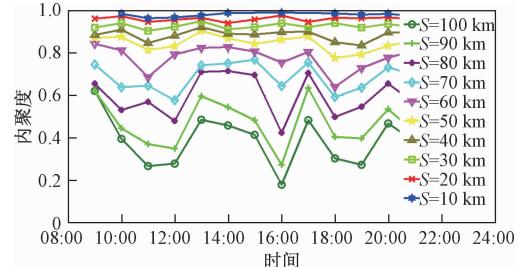


图 3 内聚度统计特征

Fig. 3 Cohesion statistical characteristics

#### 3.1.3 敏感度

敏感度可以反映动态网络中群划分的灵敏程度,图 4 展示了每小时内航空器群划分结果的灵敏度均值。从图 4 中可知,群结构灵敏度都比较大。如时间为 14 时阈值取 20 km,对应的群划分灵敏度均值达到了 0.93,阈值取 30 km、80 km 时也都有比较高的灵敏度值。但阈值 10 km 划分的群结构灵敏度较小,主要原因是本文研究空域的水平安全间隔标准恰好为 10 km,因此航空器间的水平间隔小于该数值的情况极少,以该阈值划分的群结构内的点个数、边个数及群内航空器间的水平间隔的取值范围都比较小。这种比较稳定的群结构也就造成总体上群灵敏度较低的特征。此外,与模块度、内聚度类似,灵敏度也具动态变化特征。

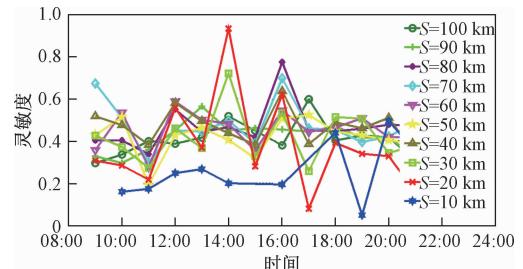


图 4 敏感度统计特征

Fig. 4 Sensitivity statistical characteristics

#### 3.1.4 群性能指数

不同阈值对应的群性能指数统计结果如图 5 所示,群性能指数随着阈值的增加先增加后减小,当阈值达到 60 km 时,性能指数达到最大值。为此,本文将选择 60 km 作为阈值进行群划分,并对划分结果进行进一步统计分析。

### 3.2 群的统计特征

#### 3.2.1 平均水平间隔

对扇区及群内航空器间的平均水平间隔分别进

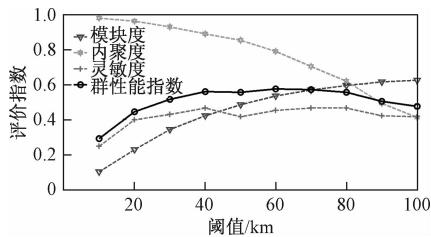


图 5 群性能指数统计特征

Fig. 5 Cluster performance index statistical characteristics

行统计分析,结果如图 6 所示。可知,航空器间的水平间隔基本服从正态分布,但扇区内统计均值约 400 km,群内统计均值约 70 km。即扇区内航空器间的水平间隔要远远大于群内航空器间的水平间隔,而群内的航空器密度更大,这也印证了群划分的现实意义。

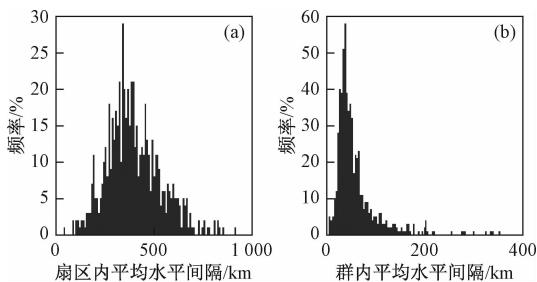


图 6 水平间隔统计

Fig. 6 Horizontal separation statistical graph

### 3.2.2 群的规模

航空器群的规模是指组成航空器群的航空器数目。对航空器群的规模进行统计,有助于发现航空器群的发展演化特征。图 7 展示了航空器群的规模统计特征,可知航空器群的规模最大值为 14,但大部分航空器群的规模都比较小,有一半以上的航空器群的规模小于 6 架。规模越大的航空器群带来的管制复杂程度自然越大,管制员在实际运行中总是尽力减少航空器群的规模大小。

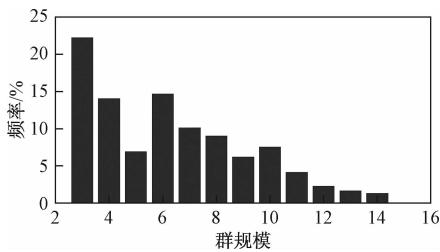


图 7 航空器群规模统计特征

Fig. 7 Aircraft cluster size statistical graph

图 8 中展示了航空器群规模与扇区内航空器间的平均水平间隔的关系。可知,扇区内航空器间的水平间隔越大,大规模群存在的可能性就越大。而航空器间的水平间隔越小,航空器群的规模也就越

小,这与实际的空中交通运行相符。

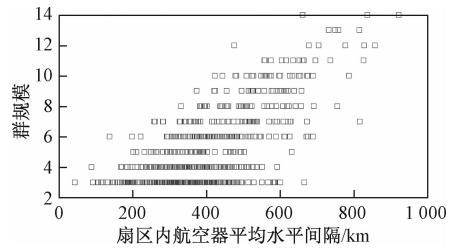


图 8 航空器群规模与水平间隔

Fig. 8 Aircraft cluster size vs. horizontal separation

### 3.2.3 群的生命期

群的生命期是指某一航空器群在空中交通运行过程中持续存在的时间,航空器群的生命期越长,给管制员的安全压力就越大。图 9 中统计了不同生命期的出现频率。大部分群的生命期都比较短,有 57% 以上的群在持续 2 min 后都在管制员的调配下解散了,但也有极少数的群在扇区中存在了较长时间,如 8 min、9 min。当管制员无法及时解脱具有较长生命期的航空器群时,必须持续高度关注,带来的管制压力和复杂性也就相应增加。因此,航空器群的生命期可以有效反映空中交通的复杂程度。

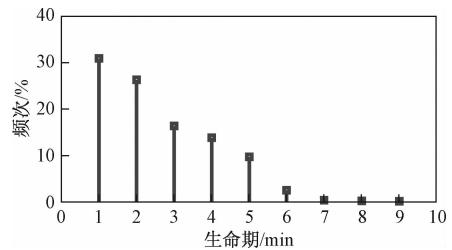


图 9 航空器群的生命期

Fig. 9 Life of aircraft cluster

## 4 结论

针对空中交通中航空器空间密度分布不均匀的特征,本文提出了航空器群的概念,首先将空中交通态势映射为一个动态网络模型,并利用复杂网络中社团结构的思想从空中交通态势网络中识别航空器群结构。提出了基于深度优先遍历算法的航空器群发现方法,避免了传统社团划分方法需事先指定社团个数的缺点。从模块度、内聚度、灵敏度几个角度提出了群性能指数,用于综合反映航空器群划分质量。选取 2013 年中国空域内某空中交通管制区的实际航班数据,对群划分结果进行评价分析。结果表明,阈值为 60 km 时划分的群结构综合性能最优。通过对该阈值下的航空器群统计特征进行分析,发现群内的平均水平间隔要远远小于扇区内所有航空器间的平均水平间隔,一半以上的群规模小于 6 架,57% 以上群

的生命期为2 min。从航空器群的拓扑结构特征分析来看,空中交通系统尽管是个高度复杂系统,但其内部还是具有内在的发展规律和特征。航空器群结构的特征对分析空中交通态势结构、理解空中交通态势复杂性的本质特征、发现空中交通流模式、预测空中交通系统行为都具有十分重要的理论意义。

## 参 考 文 献

- 1 Parimal K, Albert S, Sherri M, et al. Airspace Complexity Measurement: An Air Traffic Control Simulation Analysis. International Journal of Industrial Engineering, 2009;16(1):61—70
- 2 Fedja N, Milan J, Vojin T. Developing a generic metric of terminal airspace traffic complexity. Transportmetrica, 2011;7(5):369—394
- 3 蒋兵,胡明华,田勇.终端区空中交通容量评估的仿真方法.交通运输工程学报,2003;3(1):97—100  
Jiang Bing, Hu Minghua, Tian Yong. Simulation method of airspace capacity evaluation at terminal area. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003; 3(1): 97—100
- 4 张进,胡明华,张晨.空域复杂性建模.南京航空航天大学学报,2010;42(4):454—460  
Zhang Jin, Hu Minghua, Zhang Chen. Airspace complexity modeling. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010;42(4): 454—460
- 5 张进,胡明华,张晨.空中交通管理中的复杂性研究.航空学报,2009;30(11):2132—2142  
Zhang Jin, Hu Minghua, Zhang Chen. Complexity Research in Air Traffic Management. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009; 30(11):2132—2142
- 6 Saam N, Hasan, Rossiter J A. Sustaining trajectory flexibility for air traffic complexity alleviation. The 9th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences, 2012;451—458
- 7 Kirwan B, Scaife R, Kennedy R. Investigating complexity factors in UK air traffic. Management, Human Factors and Aerospace Safety, 2001;1(2):125—144
- 8 叶博嘉,胡明华,张晨.基于交通结构的空中交通复杂性建模.交通运输系统工程与信息,2012;12(1):166—172  
Ye Bojia, Hu Minghua, Zhang Chen. Traffic structure-based air traffic complexity modeling. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012;12(1): 166—172
- 9 Delahaye D, Puechmorel S, Hansman R J. Air traffic complexity map based on non linear dynamical systems. Air Traffic Control Quarterly, 2004;12(4):367—388
- 10 王红勇,赵巍飞,王飞,等.空中交通管制扇区复杂度评估研究.交通运输系统工程与信息,2013;13(6):147—153  
Wang Hongyong, Zhao Yifei, Wang Fei, et al. Evaluation of air traffic control sector complexity. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013;13(6):147—153
- 11 Lee K, Feron E, Peitchett A. Describing airspace complexity: airspace response to disturbances. Journal of guidance, control and dynamics, 2009;32(1): 210—222
- 12 Delahaye D, Paimblanc P, Puechmorel S, et al. A new air traffic complexity metric based on dynamical system modelization. The 21st Dig. Avionics Syst. Conference, 2002;1—12
- 13 Boccaletti S, Latora V, Moreno Y. Complex networks:structure and dynamics. Physics Reports, 2006;424(4):175—308
- 14 吕天阳,谢文艳,郑纬民,等.加权复杂网络社团的评价指标及其发现算法分析.物理学报,2012;61(21):21051101—21051110  
LÜ Tianyang, Xie Wenyan, Zheng Weimin, et al. Analysis of community evaluation criterion and discovery algorithm of weighted complex network. Acta Phys Sin, 2012;61(21):21051101—21051110
- 15 梁因,马齐爽,徐萍.基于图论的潜通路分块分析方法.北京航空航天大学学报,2014;40(1):115—119  
Liang Yin, Ma Qishuang, Xu Ping. Sneak circuit partition analysis method based on graph theory. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014;40(1):115—119
- 16 汪小帆,刘亚冰.复杂网络中的社团结构算法综述.电子科技大学学报,2009;38(5):537—543  
Wang Xiaofan, Liu Yabing. Overview of algorithms for detecting community structure in complex networks. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009;38(5):537—543

(下转第300页)

## Study on the Degradation of Reactive Blue 19 Effluent by Integrated Electro-chemical Process

XU Tian-zuo, YU Ze-bin \*

(College of Environmental, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China)

**[Abstract]** Using activated carbon fiber (ACF) cathode Fenton and Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> anode indirect oxidation (DSA) detection (EF-IE) of reactive blue 19 (RB19) dye wastewater degradation was studied, the different reaction conditions on the EF-IE detection processing RB19 dye wastewater degradation to the influence of process dynamics, was examined and the response surface optimization method is used to optimize the operating conditions. Results show that when using ACF + DSA, RB19 degradation effect is best, exact degradation process conforms to the first order reaction kinetics model; Experimental concentrations of Fe<sup>2+</sup> + 0.92 mM is the best condition, concentration of Cl<sup>-</sup> 12.14 mM, current density of 19.38 mA/cm<sup>2</sup>. EI-IE coupling technique is an effective way to deal with RB19, through the study, the response surface model of EI-IE coupling technique is to predict the results of processing RB19.

**[Key words]** C. I. Reactive blue 19      cathode-Fenton      indirect anodic oxidation      ACF      DSA

(上接第 295 页)

## Research on Aircraft Clusters of Air Traffic Network

WANG Hong-yong<sup>1,2</sup>, XU Xiao-hao<sup>2</sup>, WEN Rui-ying<sup>2</sup>

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics<sup>1</sup>, Nanjing 210016, P. R. China;

Tianjin Key Laboratory for Air Traffic Operation Planning and Safety Technology, Civil Aviation University of China<sup>2</sup>, Tianjin 300300, P. R. China)

**[Abstract]** In the current research on air traffic complexity, there is lack of investigation on the character of air traffic flow structure, fail to reflect non-uniform distribution of the aircraft spatial density. The model of aircraft cluster and presented a methodology for identification of aircraft cluster based on depth-first searching algorithm in graph theory were established, which does not require any prior knowledge about the number of the clusters. The performance index consists of the module, cohesive degrees, the sensitivity, which can evaluate the results of aircraft cluster division. The empirical study conducted on the real flight data indicates that the optimal threshold was 60 km. Further research suggest, the average horizontal separation between aircrafts in sector is about 6 times clusters. The size of aircraft clusters are generally small, more than half of the clusters size is less than six. The longest life of aircraft cluster is 9 minutes, more than 57 percent of the cluster's life is 2 minutes.

**[Key words]** air traffic      complex network      community structure      aircraft clusters      traffic complexity