

基于复杂网络理论的飞行冲突关键点识别

刘飞^{1,2}, 余敏建¹, 李佳威^{1,2}✉, 温祥西^{1,2}, 李双峰¹

(1. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051; 2. 国家空管防相撞技术重点实验室, 西安, 710051)

摘要 针对目前空域内航空器防相撞风险骤增, 飞行安全态势不容乐观的现状, 现有的飞行冲突探测方法难以把握如此复杂的空中冲突态势, 不利于航空管制员对空域的飞行安全态势情况进行准确掌控。提出一种基于复杂网络理论的飞行冲突关键点识别方法。首先基于航空器机载防相撞系统(ACAS)保护区模型构建飞行冲突态势网络模型, 在此基础上, 采用复杂网络理论中的节点度中心性、接近中心性以及 PageRank 指标结合 AHP 方法对空域飞行冲突态势网络中所有节点的冲突等级进行评估, 找出威胁等级较高的关键航空器及关键位置。仿真结果表明, 通过建立飞行冲突态势网络可以合理划分空域内的安全态势等级, 同时根据复杂网络节点重要度评价指标能够对存在严重冲突安全威胁的航空器进行有效识别, 协助航空管制员全面掌握空域内飞行安全态势。

关键词 飞行安全; 冲突识别; 复杂网络; ACAS

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.04.003

中图分类号 V355; X951 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)04-0019-07

An Identification of Flight Conflict Key Nodes Based on Complex Network Theory

LIU Fei^{1,2}, YU Minjian¹, LI Jiawei^{1,2}✉, WEN Xiangxi^{1,2}, LI Shuangfeng¹

(1. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. National Key Laboratory of Air Traffic Collision Prevention, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aimed at the problems that the risk of collision between military and civil aviation in the airspace is increasing sharply, the current flight conflict detection methods are difficult to grasp the overall conflict situation in the airspace, and the controllers fail to make accurate judgment of different conflict situations, a method for identifying flight conflict key nodes based on complex network theory is proposed. Firstly, a flight conflict situation network model is built based on ACAS protected area model. Then the importance of all conflict nodes is evaluated based on the centrality of node degree and closeness, PageRank in complex network theory and AHP method to evaluate nodes' conflict levels. And the key aircraft and locations with high threat levels are found. The simulation results show that the level of security situation in the airspace can be divided reasonably by establishing the flight conflict situation network. Simultaneously, according to the evaluation index of node importance of complex network, aircraft with serious conflict security threats can be effectively identified to assist air traffic controllers to fully grasp the flight safety situation in the airspace.

收稿日期: 2018-12-14

作者简介: 刘飞(1984—), 男, 陕西宝鸡人, 讲师, 主要从事空管运行与安全研究。E-mail: 363410331@qq.com

通信作者: 李佳威(1995—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士生, 主要从事飞行冲突探测与预警研究。E-mail: jiaweilee036@163.com

引用格式: 刘飞, 余敏建, 李佳威, 等. 基于复杂网络理论的飞行冲突关键点识别[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(4): 19-25. LIU Fei, YU Minjian, LI Jiawei, et al. An Identification of Flight Conflict Key Nodes Based on Complex Network Theory[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(4): 19-25.

Key words: flight safety; conflict identification; complex network; ACAS

随着我国航空事业的快速发展,空中交通流量日益增长,航空器之间的空中防相撞研究工作变得愈发紧迫^[1-5]。空域内的飞行安全态势无法得到有效评估,使航空管制人员难以有效把握空域内的冲突态势,进而增加管制人员的冲突调配风险,导致航空器飞行安全隐患加深。

近年来,国内外学者针对如何有效识别航空器之间的冲突问题进行了大量研究。1966年,Reich^[6]首先提出了航空器长方体碰撞模型,为后续其他模型的提出奠定了基础。2002年,清华大学自动化系的陈晨等^[7]在Reich模型的基础上,开创性地提出基于概率的冲突探测算法并用于空中交通指挥监视系统。HAN Dong等^[8]利用支持向量机分类学习来解决空中交通管制中的冲突探测与解脱问题;Krozel等^[9]采用最优控制理论提出了一种针对2架航空器在自由飞行条件下的冲突探测与解脱方法;刘洋等^[10]以低空为研究对象,构建了自由飞行条件下的低空冲突探测方法;刘昕等^[11]考虑到民用航空器在大部分时间内都是在固定高度飞行,应用二维Delaunay剖分方法对自由飞行冲突探测问题进行了研究。高扬等^[12]通过整合考虑加速度的运输飞机轨迹模型和通用飞机随机轨迹模型,建立终端区航空器飞行冲突风险预测模型,预测不同通航活动区设置条件下的飞行冲突风险。韩云祥^[13]等通过航段高度及速度的预设,得到了全飞行剖面各特征参数演化,增强了航迹预测,避免冲突。管祥民等^[14]通过对低空空域复杂环境威胁航空器安全的研究,为飞行器规划出最优的航迹,建立了防止冲突的优化模型。

以上方法的研究对象通常为少量航空器群,与实际空域运行情况存在较大差距。同时,没有从空域整体的飞行冲突态势评估角度进行分析,无法区分不同航空器的飞行安全等级,对航空管制人员的指导作用小。此外,很多方法在进行飞行冲突判断时,需要对空域中所有的航空器进行两两判断,计算过程复杂。

为了有效改善这些问题,本文基于ACAS航空器冲突保护区模型,将航空器之间的冲突关系转换为复杂网络节点与连边的关系,构建空域内飞行冲突态势网络模型,将存在冲突和潜在冲突的航空器群优先挑选并利用复杂网络模型进行关联,实现对空域内飞行安全态势等级的划分。进而,通过该网络模型进一步建立针对飞行冲突态势网络中关键冲突点识别的

综合评价指标体系,对安全威胁等级较高关键冲突点进行识别。本文希望通过该方法对空域的飞行安全态势等级进行有效划分,快速找出空域内冲突威胁等级高的航空器以及冲突位置,为航空管制人员掌握空域飞行安全态势提供协助。

1 飞行冲突态势网络模型构建

飞行冲突态势网络是基于飞行冲突探测技术构建的冲突探测网络模型。目前,国际上普遍采用基于航空器机载防相撞系统(Airborne Collision Avoidance System, ACAS)技术^[15]识别航空器间的冲突及潜在冲突。

1.1 ACAS飞行保护区建模

ACAS技术是一种检测和检索周围飞机,并向可能有侵入风险的飞机发出询问,同时能够在确定存在冲突危险时发出防相撞警告策略的设备。ACAS天线的探测范围通常设置为前方14.816~18.52 km,纵向0.3 km,侧向与后向根据ACAS设备性能通常距离较小。根据该探测距离设置,通常采用椭球保护区模型,建立单一航空器在ACAS系统下的飞行保护区模型。本文判定两架航空器是否存在冲突或潜在冲突的具体规则为:当它们的水平距离小于最低水平间隔标准15 km,且垂直距离小于最低垂直间隔标准0.3 km时,表示它们已经发生冲突,当水平间隔大于15 km而小于30 km,垂直间隔大于0.3 km而小于0.6 km时,表示2架航空器存在潜在冲突。基于此,建立如图1所示的保护区模型。

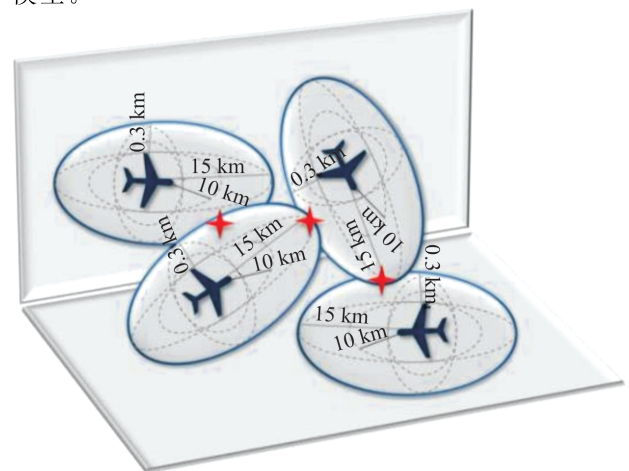


图1 多机ACAS飞行保护区模型

4 架航空器在某空域内活动,每架航空器均使用基于 ACAS 的飞行保护区模型,见图 2。

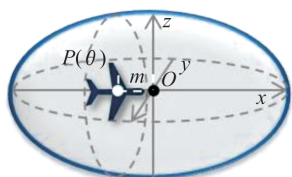


图 2 单机 ACAS 飞行保护区模型

该模型以椭球模型为基础,结合 ACAS 探测距离与探测方式,将航空器中心点 θ 置于椭球后焦点 P ,使航空器获得更大的前置探测距离 15 km,保护区纵向间隔均取 0.3 km。该模型的冲突域为:

$$\frac{(x-x_0-m)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} \leq 1 \quad (1)$$

式(1)中,由于该保护区中心点位于椭球后焦点,所以在设定冲突域方程中,引入偏移量 m 。该模型对进入保护区内部的探测等级也进行了划分,以保护区内 10 km 范围为界限,根据 2 架航空器的侵入距离判断侵入等级,侵入距离越大相应冲突等级越高,此时,ACAS 将做出相应的防相撞警告或对策。

1.2 飞行冲突态势网络构建

通过构建单一航空器 ACAS 飞行保护区模型,将航空器与飞行保护区合二为一,利用复杂网络理论,把空域内的飞行冲突态势抽象为复杂网络:每架航空器(含保护区)视为一个节点,若存在航空器保护区彼此交叠,或航空器本身侵入保护区情况,则构建航空器节点之间的冲突连边。在图 1 所示空域内存在 4 个冲突点,但均为潜在冲突,因为并未出现航空器本身侵入保护区的情况。根据本文对飞行安全态势标准的定义,认为不论是冲突还是潜在冲突均会对空域内的飞行安全造成威胁,所以采用将航空器与保护区视为整体的思想,更加符合安全要求。

基于复杂网络理论和冲突判定标准,抽象出图 1 所示空域内的飞行冲突态势网络模型,如图 3 所示。

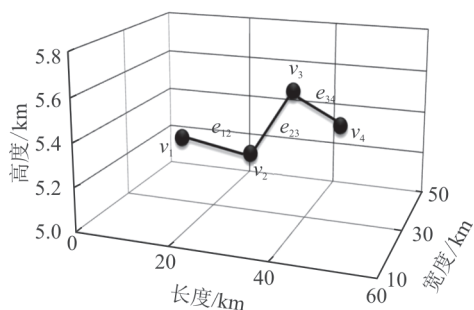


图 3 图 1 场景对应的冲突态势网络

记该飞行冲突态势网络为 $G(V, E)$,其中 V 表示节点集合, $\{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ 表示航空器, E 表示边

集, $\{e_1, e_2, \dots, e_j\}$ 表示 2 架航空器发生冲突而建立的冲突连边。

在 ACAS 飞行保护区模型中,横向间隔和纵向间隔在航空器冲突探测过程中起到关键的判定作用。考虑引入冲突边权 ω_{ij} ,将 2 种间隔对网络的影响体现出来,构建飞行冲突加权网络。当两机发生冲突时,生成冲突连边的边权为 ω_{ij} 。由前面的介绍可知:2 架航空器之间的距离越近,它们之间发生冲突的概率越大。所以,本文设计边权见图 4。其中, d_{La} 表示发生冲突的 2 架航空器之间的水平距离, km; d_{Lo} 表示垂直距离, km。

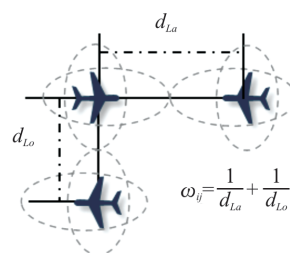


图 4 边权设置

图 3 所示飞行冲突网络可表示为邻接矩阵形式,见式(2)。结合冲突边权后可得到加权邻接矩阵,见式(3),用于后续评估节点综合重要度计算。

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

加权邻接矩阵:

$$Q' = \begin{bmatrix} 0 & 0.39 & 0 & 0 \\ 0.39 & 0 & 0.65 & 0 \\ 0 & 0.65 & 0 & 0.51 \\ 0 & 0 & 0.51 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 关键冲突点识别方法

在飞行冲突态势网络中,少数的航空器扮演着“关键节点”的作用,它们能够对冲突态势的演变产生重要影响。对于空中交通管理活动而言,调配这些关键飞机节点能够快速缓解空中交通拥挤状况,降低飞行安全风险。如何准确找出这些关键冲突点,是本文需要解决的关键问题。

2.1 节点重要度评估指标选择

为了对各个航空器节点在整个冲突态势网络中的地位进行评价,基于复杂网络中的关键节点识别方法^[16-18],选择节点重要度评价指标对冲突态势网络中的关键航空器进行识别。在选择指标时,针对飞行冲突态势网络的特点,主要考虑以下几个因素:

①选择的指标能够反应节点的特性;②选择的指标能够反应节点在网络中的作用;③选择的指标能够反映节点和其他节点之间的关系。基于以上3点,本文选择节点的度、接近中心性和PageRank作为重要度评价指标^[19-20]。

定义1 度中心性

节点*i*相关联的边数与节点*i*可能存在的最大边数的比率。度中心性的表达式为:

$$D_{C_i} = k_i / (N - 1) \quad (4)$$

式中: k_i 表示网络中与节点*i*关联的边数。度中心性定义表明了一个节点与其他节点直接关联的能力,数值越大,在网络中发挥的作用越大。对应于飞行冲突网络,该指标侧重于体现航空器自身的冲突波及范围程度和影响力。

定义2 接近中心性

假设 d_{ij} 表示以节点*i*为起点,以*j*为终点的最短路径中所含边的数量,则节点*i*的接近中心性可以表示为其到网络中其他所有节点距离之和的倒数,接近中心性的表达式为:

$$C_{C_i} = N / \sum_{j=1}^N d_{ij} \quad (5)$$

节点接近中心性的值越大,表明节点居于网络中心位置的程度越大,相应地也就越重要。该指标可以对处于冲突核心地带的航空器进行有效识别。

定义3 PageRank 指标

PageRank的排名方式是通过类似投票表决的方式来实现的,哪个节点获得的得分(权重)比较高,那么该节点的价值就越高,其权值计算表达式为:

$$P_r(A) = P_r(B)/C(B) + P_r(C)/C(C) + \dots \quad (6)$$

式中: $P_r(A)$ 表示节点*A*更新之后的权重值; $P_r(B)$ 、 $P_r(C)$ 代表与节点*A*相连的所有其他节点分配给*A*的权重值; $C(B)$ 、 $C(C)$ 分别表示节点*B*、*C*的出链(即指向其他节点的连边)个数。针对本文所研究的飞行冲突态势网络,该指标能够结合冲突边权对网络的影响程度实现重要冲突点的有效识别。

2.2 基于AHP的节点综合重要度评估

为了综合以上3个节点重要度评价指标的优势特点,同时尽可能降低运算复杂度,本文选择采用AHP分析方法构造冲突点综合重要度评价指标。AHP方法计算复杂度低,剪系统性强,能够较好地展现各指标对整体的影响。

在所选指标中,PageRank指标不仅从网络拓扑结构角度考虑了节点的连通特征,还从实际距离即边权的角度考虑了网络的现实状态,所以本文认为该指标是最能反映节点在网络中的重要程度的,

其次是节点的度中心性,最后为接近中心性。因此,对以上3个指标采用1~9标度法,得到各指标的比较结果,见表1。

表1 各指标比较结果

C_V	P_{R_i}	D_{C_i}	C_{C_i}
P_{R_i}	1	3	5
D_{C_i}	1/3	1	3
C_{C_i}	1/5	1/3	1

由此可得判断矩阵*A*:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

计算最大特征根 λ_{\max} 相应的特征向量*ω*,并进行归一化处理,得到权重向量*W*:

$$W_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}} \quad (7)$$

由式(7),计算权重向量:

$$W = [W_1 \quad W_2 \quad W_3] = [0.637 \quad 0 \quad 0.258 \quad 3$$

0.104 \quad 7]

进行一致性检验,计算最大特征值 λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} W_j}{W_i} = 3.038 \quad 5 \quad (8)$$

一致性指标*C*₁为:

$$C_1 = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{n - 1} = 0.019 \quad 2 \quad (9)$$

一致性比重*C*_R为:

$$C_R = \frac{(\lambda_{\max} - n) / (n - 1)}{R_1} = 0.037 \quad 0 < 0.1 \quad (10)$$

式中: R_1 为随机一致性指标,当*n*=3时, R_1 取0.58。由此判定满足一致性检验。

此外,为消除所选3个指标之间的数量级差异,选取最大最小归一化法进行处理:

$$D_{C_i} = \frac{D_C(v_i) - \min D_C(v)}{\max D_C(v) - \min D_C(v)} \quad (11)$$

剩余2个指标采取相同方法进行归一化处理。

最终得到节点综合重要度评价结果*P*_{*i*}:

$$P_i = 0.637 \quad 0 P_{r_i} + 0.258 \quad 3 D_{C_i} + 0.104 \quad 7 C_{C_i}$$

3 关键冲突点识别流程

基于前两节内容,可以对空域内的飞行冲突态势实现初步把握。通过运用节点综合重要度评价指标*P*_{*i*}可以进一步实现对飞行安全威胁等级更高的关键冲突点识别。具体识别流程见图5。

飞行冲突态势网络关键冲突点识别主要包含 3 部分,分别为:数据获取、飞行冲突网络构建、关键冲突点识别。

1)数据获取:采集当前空域内中所有航空器的实时飞行参数,包括飞行速度、空间坐标位置等。

2)飞行冲突态势网络构建:利用获取的航空器飞行数据,基于每架航空器的 ACAS 保护区判定冲突情况,确定节点间的连接关系和边权,构建冲突态势网络。

3)关键冲突点识别:通过利用基于度中心性、接近中心性和 PageRank 构建的节点综合重要度评价指标 P_i 对飞行冲突态势网络中的节点进行重要度评估,最终确定关键冲突点。

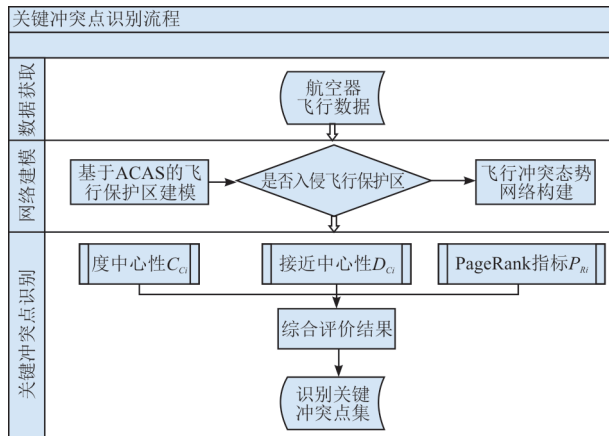


图 5 关键冲突点识别流程图

4 仿真分析

由于实际飞行数据通常为保密资料,难以获取。所以本文选择采用 Matlab 在三维空间中随机产生适量点集,模拟某空域内航空器运行状态。设置模拟空域范围的长、宽分别为 400 km,高度为 1.5 km。每个节点表示 1 架航空器,为每架航空器随机设置飞行方向,结合节点三维坐标,可建立 ACAS 飞行保护区。模拟空域见图 6。

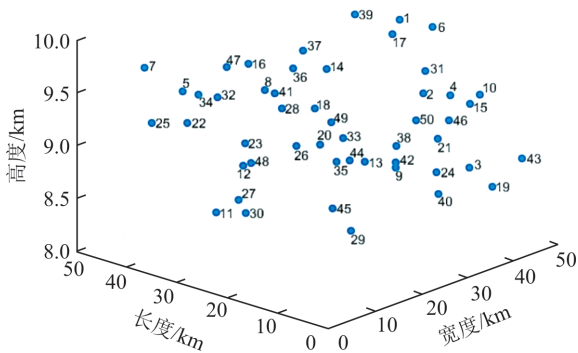


图 6 模拟训练空域空情状态

通过模拟出的空域内航空器的位置坐标及飞行状态,基于航空器 ACAS 飞行保护区模型判定冲突后,可以构建出该空域内的飞行冲突态势网络模型图 7。

在构建的空域飞行冲突态势网络基础上,分别采用度中心性、接近中心性和 PageRank 进行节点重要度分析,最终通过 AHP 方法,获得所有节点的最综合重要度评价 P_i ,具体结果见表 2。

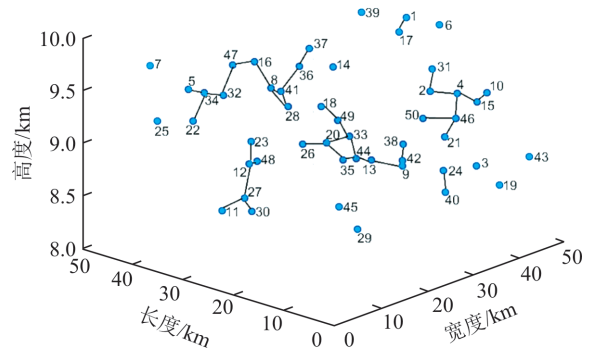


图 7 飞行冲突网络构建

表 2 冲突点重要度评价

航空器编号	度中心性	接近中心性	PageRank	P_i
A1	-	-	-	-
A2	0.285 7	0.440 1	0.142 1	0.310 5
A3	-	-	-	-
A4	0.428 6	0.994 0	0.197 7	0.550 5
A5	0.100 0	0.084 4	0.056 1	0.091 3
A6	-	-	-	-
A7	-	-	-	-
A8	0.300 0	0.917 2	0.140 2	0.442 6
A9	0.200 0	0.491 0	0.095 0	0.264 2
A10	0.142 3	0.000 1	0.079 1	0.099 0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
A20	0.300 0	0.589 3	0.127 0	0.356 6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表 2 列出了空域内所有冲突点的度中心性、接近中心性和 PageRank 指标评价结果,可以和 PageRank 评价结果相较其他 2 种指标评价结果更加稳定,反映出该指标在飞行冲突态势网络中具有较好的评估效果。但该指标也缺乏对于节点中心性方面的考量。所以还需根据提出的综合评价指标 P_i 对关键冲突点进行最终判断。本文选择将 P_i 排名 10 位的冲突点识别为关键冲突点,这些关键冲突点在空域内的飞行安全威胁程度较高,相比其他节点更易发生空中危险行为。此外,如果可以将这些关键航空器进行合理调配,能够发挥快速降低局部安全等级的作用。10 个关键冲突点识别结果见图 8。

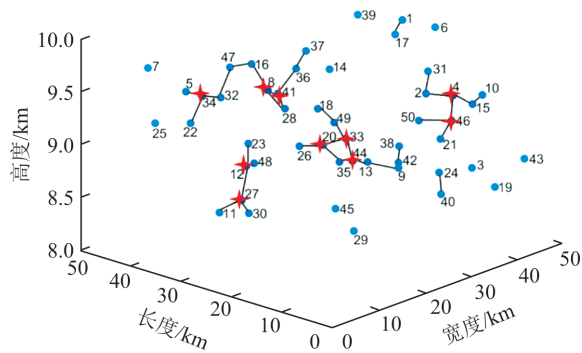


图8 关键冲突点识别结果

从图8中可以看到,在空域内不同的飞行冲突态势网络中存在4、8、12、20、27、33、34、41、44、46共10个冲突态势等级较高的关键冲突点。其中33号节点的综合评价 P_{33} 为0.8925,是所有节点评估结果中最高的。从图中可以看到它的周围存在3个重要冲突位置,并且与之相邻的航空器数目有4架。此外,33号航空器所处局部冲突态势最为复杂,航空器密度大,需要重点关注。这些关键冲突点往往位于飞行冲突态势网络的核心部位,同时与多架飞机之间存在冲突。所以,需要航空管制人员进行重点关注和优先处置。此外,本文通过飞行冲突态势网络的构建,有效避免了对空域内所有航空器进行两两之间重复的冲突判定,降低了在航空器数目较多的复杂空域条件下,航空管制员进行空域安全态势判定的复杂程度。特别是对关键冲突点的识别,可以为管制员提供高价值的航空器安全态势信息,协助管制员针对威胁等级不同的情况,做出合理调配方案。

5 结论

本文首先基于ACAS保护区模型,对空域内存在冲突和潜在冲突的航空器进行组网,构建空域冲突态势网络模型。进而基于复杂网络关键节点识别方法,采用AHP方法融合度中心性、接近中心性和PageRank3种节点重要度评价指标构建节点综合重要度评价指标,找出了模拟空域态势网络中的关键冲突点,实现了对空域内的不同航空器飞行安全等级的划分。经实验结果发现,安全威胁等级越高的节点周围均存在多个额外冲突点,并且该节点通常位于局部飞行冲突态势网络结构的中心位置,具有明显的中心属性。此外,核心冲突航空器的位置变化将对局部冲突态势网络产生较大影响。合理利用该特征,可以实现飞行冲突的快速消解。本文提出的空域飞行冲突关键点识别方法可以向航空管制人员提供空域内的冲突态势情况,优化他们的注意

力分配,为快速、高效地制定富有针对性的冲突解脱方案,保证飞行安全提供协助。

参考文献(References):

- [1] 张智宏. 塔台管制如何做好军民航防相撞工作[J]. 民航管理, 2017(7):91-93.
ZHANG Z H. Tower Control How to Do a Good Job in Civil-Military Anti-Collision Work [J]. The Civil Aviation Administration, 2017(7): 91-93. (in Chinese)
- [2] 项恒, 张炎. 交叉航路飞行航空器冲突风险分析方法[J]. 科技风, 2018(31):250,253.
XIANG H, ZHANG Y. Method of Aircraft Conflict Risk Analysis in Cross Air Route Flight[J]. Technology Wind, 2018(31):250,253. (in Chinese)
- [3] 王世锦. 繁忙终端空域飞行冲突风险[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(4):538-543.
WANG S J. Flight Conflict Risk in Busy Terminal Airspace[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(4):538-543. (in Chinese)
- [4] DING S B, GU Q Q, LIU J Y. Flight Safety System Evaluation and Optimal Linear Prediction[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 36(2):205-213.
- [5] WANG C. Analysis on Potential Conflict Frequency of Intersected Air Routes in Terminal Airspace Design [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 31(5):580-588.
- [6] REICH P G. Analysis of Long-Range Air Traffic System: Separation Standards I II III[J]. Journal of the Institute of Navigation, 1966, 19(1):88-98.
- [7] 陈晨, 崔德光. 空中交通管制中改进型冲突探测算法研究与应用[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(19):250-253.
CHEN C, CUI D G. Research and Application of Improved Conflict Detection Algorithm in Air Traffic Control[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(19):250-253. (in Chinese)
- [8] 韩冬, 张学军, 聂尊礼, 等. 一种基于SVM的低空飞行冲突探测算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(3):576-582.
HAN D, ZHANG X J, NIE Z L, et al. A Conflict Detection Algorithm for Low-Altitude Flights Based on SVM, Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 44(3):576-582. (in Chinese)
- [9] KROZEL J, PETERS M. Conflict Detection and Resolution for Free Flight[J]. Air Traffic Control Quarterly, 1997, 33(9):181-212.
- [10] 刘洋, 向锦武, 罗漳平, 等. 低空自由飞行短期冲突探测算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(9):

- 1873-1881.
- LIU Y, XIANG J W, LUO Z P, et al. Short-Term Collision Detection Algorithm for Free Flying in Low-Altitude Airspace [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics*, 2017, 43(9):1873-1881. (in Chinese)
- [11] 刘鑫, 杨霄鹏, 田士佳, 等. ADS-B 信息的球状模型飞行冲突探测算法[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(6): 126-129, 137.
- LIU X, YANG X P, TIAN S J, et al. Flight Collision Detection Algorithm Based on ADS-B Information Spherical Model [J]. *Transducer & Microsystem Technologies*, 2017, 12(6):1-15. (in Chinese)
- [12] 高扬, 王向章, 郑涤滨. 机场终端区航空器飞行冲突风险预测方法研究[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(1):157-162.
- GAO Y, WANG X Z, ZHENG D B. Research on Method for Predicting Risk of Aircraft Flight Conflict in Airport Terminal [J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(1):157-162. (in Chinese)
- [13] 韩云祥, 汤新民, 韩松臣, 等. 基于微分 Petri 网的民航航迹演化通用模型构建[J]. *南京航空航天大学学报*, 2014, 46(2):322-328.
- HAN Y X, TANG X M, HAN S C, et al. Construction of Civil Aircraft Trajectory Evolution General Model Based on Differential Petri-Net [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 46(2):322-328. (in Chinese)
- [14] 管祥民, 吕人力. 基于协同进化的复杂低空下多飞行器协同航迹规划方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2017, 49(S1):89-95.
- GUAN X M, LYU R L. Complex Low-Altitude Airspace Multi-aircraft Cooperation Path Planning Method Based on Cooperative Coevolutionary [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2017, 49(S1):89-95. (in Chinese)
- [15] 高平, 曹杨华, 马晋, 等. 机载防撞系统现场诊断软件的架构设计[J]. *航空电子技术*, 2013, 44(3): 16-20.
- GAO P, CAO Y H, MA J, et al. Software Architecture Design for Field Diagnostic Program of Airborne Collision Avoidance System [J]. *Avionics Technology*, 2013, 44(3): 16-20. (in Chinese)
- [16] 程光权, 陆永中, 张明星, 等. 复杂网络节点重要度评估及网络脆弱性分析[J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(1):120-127.
- CHENG G Q, LU Y Z, ZHANG M X, et al. Node Importance Evaluation and Network Vulnerability Analysis on Complex Network [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(1):120-127. (in Chinese)
- [17] RABIEIAN R, ABEDI M, GHEISARI Y. Central Nodes in Protein Interaction Networks Drive Critical Functions in Transforming Growth Factor Beta-1 Stimulated Kidney Cells [J]. *Cell Journal*, 2017, 18(4): 514-531.
- [18] ZOU Q Y, TAO W, YUN Q. Key Point Recognition Method of Bacterial Image in Water Based on Complex Network [C]// Proc of 2nd International Conference on Automatic Control and Information Engineering (ICA-CIE 2017). Atlantis Press, 2017.
- [19] JIANG Z Y, ZENG Y, LIU Z H, et al. Identifying Critical Nodes' Group in Complex Networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 12(45):121-132.
- [20] BIAN T, HU J, DENG Y. Identifying Influential Nodes in Complex Networks Based on AHP [J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2012, 391(4):1777-1787.

(编辑: 姚树峰)