

文章编号:1674-8190(2019)05-609-10

基于双重容量识别标准的航空网络关键航段识别方法

李佳威^{1,2}, 刘飞¹, 吴明功^{1,2}, 余敏建¹, 康润喆¹

(1. 空军工程大学 空管领航学院, 西安 710051)

(2. 空军工程大学 国家空管防相撞技术重点实验室, 西安 710051)

摘要: 对航空网络中的关键航段进行有效识别存在传统识别方法单一, 网络性能评价指标不全面等问题, 提出一种基于双重容量识别标准的航空网络关键航段识别方法。通过建立脆弱识别标准和瓶颈识别标准, 从航段容量变化对航空网络综合性能影响的角度对网络中的关键航段进行识别, 并在网络性能评价阶段, 采用一种基于 AHP 的航空网络综合性能评价指标, 使用基于 UE 模型的空中交通流量分配模型, 对该识别方法的有效性进行验证。结果表明: 该方法能够对航空网络中的关键航段进行有效识别。

关键词: 航空网络; 容量识别; 关键航段

中图分类号: V355; TP393

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.05.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Identification Method of Critical Routes in Aviation Network Based on Double Capacity Identification Standard

Li Jiawei^{1,2}, Liu Fei¹, Wu Minggong^{1,2}, Yu Minjian¹, Kang Runzhe¹

(1. College of Air Traffic Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(2. National Key Laboratory of Air Traffic Collision Prevention, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: A method of identifying critical routes in the aviation network based on dual capacity identification standard is used for improving the singleness of the traditional identification method and incomplete evaluation index of network performance. The vulnerability identification and bottleneck identification standards are established to identify the critical routes in the network in the aspect of route capacity change on the overall performance of the aviation network. And a comprehensive network performance evaluation index based on AHP (analytic hierarchy process) is used for improving the evaluation effect of network performance. Finally, the validity of the identification method is verified by constructing an air traffic network traffic distribution model based on UE (user equilibrium) model. The results show that the method can identify the critical routes in the aviation network effectively.

Key words: aviation network; capacity identification; critical route

收稿日期: 2018-10-30; 修回日期: 2019-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(71801221); 陕西省自然科学基金(2018JQ7004)

通信作者: 李佳威, jiaweilee036@gamil.com

引用格式: 李佳威, 刘飞, 吴明功, 等. 基于双重容量识别标准的航空网络关键航段识别方法[J]. 航空工程进展, 2019, 10(5): 609-618.

Li Jiawei, Liu Fei, Wu Minggong, et al. Identification method of critical routes in aviation network based on double capacity identification standard[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(5): 609-618. (in Chinese)

0 引言

2006~2017 年国内航班正常率由 81.48% 下降到 71.67%^[1-3], 暴露出我国航空网络整体运载能力与快速增长的运输量之间的矛盾正逐步凸显。其中部分关键航路、航线所承担的运输量正趋于饱和, 一旦这些关键路径出现意外中断或失效等突发情况, 将对航空网络的整体运行产生巨大影响。因此, 针对关键航路航线识别问题研究, 对于发现我国航空网络中的瓶颈位置, 研究如何降低重要航路航线中断造成的影响以及提高航空网络利用效率具有重要意义。此外, 还可以为军事训练空域的合理规划提供依据, 减轻军航活动对民航关键运输通道的影响^[4-6]。

目前, 航空网络关键航段识别问题的研究主要采用复杂网络分析方法, 使用边介数等指标评价连边重要性或通过评估连边删除后对网络性能变化的影响程度确定连边重要性^[7-9]。但由于直接评价连边重要性的指标较少, 网络关键连边研究通常采取连边删除方法。例如, Zhu Z H 等^[10]提出用流量容量比 V/C 测量交通路径的拥堵程度, 并将拥堵严重的路径识别为关键路径; G. Como 等^[11]研究不同路径运行状态对交通网络鲁棒性的影响并对重要路径进行分析。张纪升等^[12]、李秀美等^[13]基于图论中最短路径理论对公路网中的关键连边进行识别; 高明霞^[14]、左志等^[15]从路段删减对路网通行能力的影响角度对关键路段问题进行了研究。

基于连边删除法思路, 本文从航段对航空网络综合性能影响的角度评价不同航段的重要度。针对航空网络特点, 采用一种基于 AHP 的航空网络综合性能评价指标, 提出基于双重容量识别标准的关键航段识别方法。该识别方法从航段“脆弱性”和“瓶颈性”两方面研究容量变化对航空网络综合性能的影响情况, 并根据影响程度对航空网络中的关键航段进行有效识别。

1 关键航段识别模型构建

航空网络性能评价指标的选择, 须从航段容量对网络结构以及网络性能影响两方面进行综合评价。所以考虑采用以下航段重要度评价指标, 构建

关键航段综合评价体系。

1.1 航空网络性能评价指标

(1) 网络平均拥塞率(Q_N)

$$Q_N = \frac{1}{e} \sum \frac{V_e}{C_e} \quad (1)$$

式中: V_e 为网络中航段 e 的实际交通流量; C_e 为网络中航段 e 的最大交通容量; e 为网络中实际存在连边数量。

该指标能够从航段流量与容量关系的角度, 对航空网络的总体拥塞程度进行评估, 反映出当前网络的运行态势。

(2) 伽马指数(γ)

$$\gamma = \frac{e'}{e'_{\max}} \quad (\gamma \in [0, 1]) \quad (2)$$

$$e'_{\max} = 3(v - 2) \quad (3)$$

式中: e' 为网络中实际存在航段总数; e'_{\max} 为网络中最大可能航段数; v 为网络节点总数。该指标从网络拓扑的角度衡量连边对网络整体结构连通性的影响程度, 该指标值越大, 说明网络中该网络的连通性越好。

(3) 航空网络运行鲁棒性指标(NRI)

$$c_e^{NRI} = \sum t_e x_e \quad (4)$$

式中: c_e^{NRI} 为当航段 e 发生变化后, 网络鲁棒性指数; t_e 为网络中航段 e 的总阻抗; x_e 为航段 e 的交通流量。

该指标将网络拓扑结构与航班流实际运行路线、运行时间和流量相结合, 能够对航空网络结构和性能两方面的鲁棒性进行全面评估。

1.2 基于 AHP 的航空网络综合性能评价指标构建

为了综合以上三个指标的优缺点, 构建更加全面航空网络评价指标, 本文结合三个指标的侧重点差异, 考虑到航空网络运行特点, 选择 AHP 方法, 构建航空网络性能综合评价指标 S 。该方法计算复杂度低, 系统性强, 能够较好地融合不同评价指标的特点。根据上节对三个指标的分析, 认为在航空网络这三个指标的重要度排序为: $C_e^{NRI} > Q_N > \gamma$ 。

采用 1-9 标度法^[16-17]得到三个指标(CV)的比较结果如表 1 所示。

表 1 各指标比较结果

Table 1 Comparison results of various indexes

CV	数 值		
	C_e^{NRI}	Q	r
C_e^{NRI}	1	3	9
Q	1/3	1	5
r	1/9	1/5	1

可得判断矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 1/3 & 1 & 5 \\ 1/9 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

计算最大特征根 λ_{max} 相应的特征向量 w , 并进行归一化处理, 得到权重向量 W 如式(5)所示。

$$W_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}} \quad (5)$$

根据式(5), 计算权重向量

$$W = [W_1 \ W_2 \ W_3] = [0.671 \ 6 \ 0.265 \ 4 \ 0.062 \ 9]$$

进行一致性检验, 计算最大特征值 λ_{max} 为

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} W_j}{W_i} = 3.029 \ 1$$

一致性指标 CI 为

$$CI = \left(\frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \right) = 0.014 \ 5$$

一致性比重 CR 为

$$CR = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \cdot RI = 0.0251 < 0.1$$

式中: RI 为随机一致性指标, 当 $n = 3$ 时, RI 取 0.58。

因此判断矩阵满足一致性检验, 各指标权重为:

$$W_{C_e^{NRI}} = 0.671 \ 6, W_Q = 0.265 \ 4, W_r = 0.062 \ 9$$

由于数量级的差异, 对各指标采用最大最小归一化法处理得到加权后的航空网络综合评价指标 S 为

$$S = 0.671 \ 6 \times C_e^{NRI} + 0.265 \ 4 \times Q_N + 0.062 \ 9 \times \gamma$$

1.3 路径最优的空中交通流均衡分配模型的关键航段识别方法

本文提出的网络综合性能评价指标中, 除了涉及航段容量, 还必须考虑到航段的实际运行流量,

所以如果要验证本文提出的容量识别方法, 需要将容量变化与流量改变相结合。因此, 我们选择建立空中交通流量分配模型对航空网络中航班流进行模拟。在实际空中交通运行过程中, 航班运行虽然受到管制员的制约, 但管制员也需要按照航空公司事先计算的航线效益安排飞行。航空公司运行的航线, 通常都是按照时间最短、效率最高来设定通行标准, 而且由于本文仅考虑单 OD 机场对之间的通航情况, 所以在模拟航班流时, 为了保证两机场间的航班运行效率, 更适合采用路径最优的分配策略, 能够较好地模拟实际的空中交通网络运行状态并且与本文提出的关键航段指标能够紧密结合^[16-17]。

1.3.1 路径最优的空中交通流均衡模型构建

该模型构建须从基本概念、优化目标、算法求解三个方面分层依次建立。

(1) 航段阻抗 t_e

在航空网络运行过程中, 飞行时间是影响网络运行效能主要的阻抗因素之一, 根据对航空网络中飞行时间 t_e 的研究, 可以将其与航段流量和容量之间的关系表示如下:

$$t_e(x_e) = t_e(0) \left[1 + \alpha \left(\frac{x_e}{C_e} \right)^\beta \right] \quad (6)$$

$$t_e(0) = t_e^1(0) + t_{ij} \quad (7)$$

$$t_{ij} = \mu_i t_i + \mu_j t_j \quad (8)$$

式中: $t_e(0)$ 为航段 e 上的初始阻抗; $t_e^1(0)$ 为航段 e 上平均自由飞行时间; t_{ij} 为航段两端 i, j 节点阻抗, 由于不同航路航线交叉节点处理航班流量能力不同, 以及节点承载航路航线流量的大小不同, 将导致在航段两节点出也存在时间延误等情况; C_e 为航段 e 的最大交通容量, 即单位时间内最大航空器数量; α, β 为待标定参数, 根据航空网络数据分析, 结合路网中阻抗函数参数的选取范围^[18-19], 本实验选取 $\alpha = 1.55, \beta = 2; \mu_i, \mu_j$ 为航段 e 始末两端节点的延误率; t_i, t_j 为航段 e 始末两端节点的延误时间。

(2) 目标函数及约束条件

$$\min Z(\bar{x}) = \sum_e \int_0^{x_e} t_e(w) dw \quad (9)$$

$$s. t. \sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad (\forall r, s) \quad (10)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad (\forall r, s, k) \quad (11)$$

$$x_e = \sum_{r,s} \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{e,k}^{rs} \leq C_e \quad (\forall e) \quad (12)$$

其中,根据路径最优目标要求,设置航空网络中各条路径的总阻抗最小为目标函数,即为式(9)所示;式(10)表示机场节点对 (r,s) 之间各条路径交通流之和等于 (r,s) 之间总交通量;式(11)表示机场节点对 (r,s) 之间各条路径上的交通流均大于0;式(12)表示航段最大流量不能超过其最大容量。式(6)~式(12)中的符号说明如表2所示。

表2 公式中各符号说明

Table 2 Description of each symbol in the formula

符 号	含 义
$Z(\bar{x})$	航空网络路径总阻抗
x_e	航段 e 的流量
$t_e(x_e)$	航段 e 的总阻抗函数
f_k^{rs}	点对 (r,s) 间第 k 条路径上的交通流
q_{rs}	点对 (r,s) 间的分布交通量
$\delta_{e,k}^{rs}$	连接关系变量当路径 k 包含航段 e 时,为1;否则为0

(3) 路径最优空中交通流量均衡分配模型求解流程

Step 1 初始化:按照 $t_e^0 = t_e(0), \forall e$ 进行一次全有全无分配^[20-22],得到各个航段的流量初值 $\{x_e^1\}, \forall e$;令 $n=1$ 给定允许误差 $\epsilon > 0$;

Step 2 更新各航段阻抗: $t_e^n = t_e(x_e^n), \forall e$;

Step 3 寻找下一步搜索方向:按照 $\{t_e^n : \forall e\}$ 进行一次全有全无分配,得到一组附加流量 $\{y_e^n : \forall e\}$,计算得到 $\{x_e^n\}$ 与 $\{y_e^n\}$ 的连线即为下一步迭代方向;

Step 4 确定迭代步长:通过求解一维极值问题 $\sum_e (y_e^n - x_e^n) t_e^n [x_e^n + \lambda_e^n (y_e^n - x_e^n)] = 0 (0 \leq \lambda_e^n \leq 1)$, 得到 λ_e^n ;

Step 5 确定新的迭代起点: $x_e^{n+1} = x_e^n + \lambda_e^n (y_e^n - x_e^n), \forall e$;

Step 6 收敛性检验:如果 $\frac{\sqrt{\sum_e (x_e^{n+1} - x_e^n)^2}}{\sum_e x_e^n} < \epsilon$,则停止计算;否则,令 $n = n + 1$,返回 **Step 2**。

1.3.2 关键航段双重识别标准

基于复杂网络的基本理论,结合航空网络具体特性,我们考虑将航空网络中关键路径的识别标准分为同一层次的两大类,分别为脆弱识别标准和瓶颈识别标准。现对这两种识别标准加以具体说明:

(1) 脆弱识别标准

在脆弱性识别标准中,本文考虑在不完全信息条件下对关键航段进行识别。在航空网络日常运行过程中,由于军事训练飞机穿越或军机转场飞行穿越民航航路航线以及突发事件、危险天气、管制设备故障等原因导致航路航线发生临时中断,容量下降的情况时有发生,此时,航空网络整体流量将重新分配,网络性能也将随之改变。根据资料统计进行合理分析,这里设定路径容量减少量 $\Delta_1 C_{ij}$ 如式(13)所示

$$\Delta_1 C_{ij} = \mu C_{ij} \quad (13)$$

式中: μ 为路径容量降低比率。

根据航路航线突发中断情况统计,通常因航路航线内部分高度层无法使用导致路径容量下降,所以本文确定路径容量降低比率 $\mu \in [0.50, 1.00]$ 。

(2) 瓶颈识别标准

在瓶颈识别标准中,文本考虑通过对航段进行容量扩大,研究网络中关键航段的变化情况。这里规定路径容量增加 $\Delta_2 C_{ij}$ 如式(14)所示

$$\Delta_2 C_{ij} = \eta C_{ij} \quad (14)$$

式中: η 为路径容量增加比率。

对于不同航段,可根据航路航线扩容办法,通过增设高度层,缩小飞行间隔,或航线升级航路等途径对不同航段进行扩容,根据一般扩容比例统计可得, $\eta \in [0.25, 0.75]$ 。

1.3.3 关键航段识别流程

关键航段识别流程图如图1所示,本文提出的航空网络关键航段识别方法主要分为三部分,分别为:

(1) 通过增加航空网络中每条航段 e_1 的最大容量,对机场间的交通流量进行重新分配,计算容量增加后网络综合性能指标变化结果,并依据结果大小进行排序。

(2) 通过降低航空网络中每条航段 e_1 的最大容量,对机场间的交通流量进行重新分配,计算容量降低后网络综合性能指标变化结果,并依据结果

大小进行排序。

(3) 综合上述两部分获得的排序结果,对每条航段 e_1 在容量变化后对网络的影响进行评估,找到关键航段。

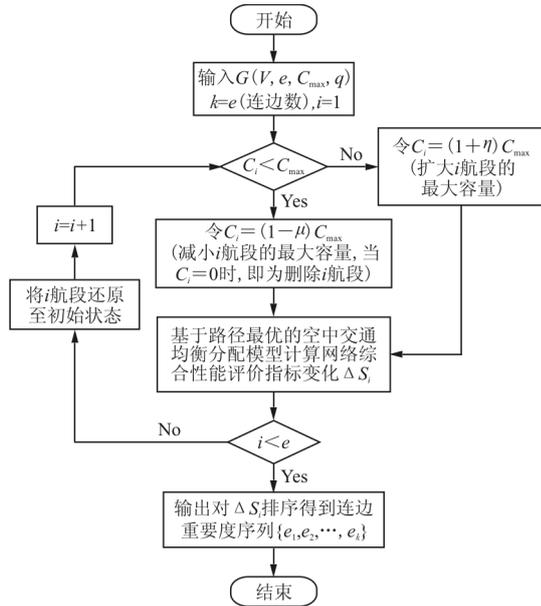


图 1 关键航段识别流程图

Fig. 1 Critical routes identification flow chart

2 仿真分析

模拟区域单 OD 对航空网络如图 2 所示, 1、8 为两座城市的起降机场, 2~7 为导航台点。连边表示飞行航线, 本文考虑双向通行, 所以不设置连边方向。其中, 1、8 两机场间相距约 1 100 km, 在 24 h 时间内, 该 OD 对间的交通运输总量 q 为 130 架次, 航段内飞行平均速度约为 900 km/h。该网络机场 OD 对间的通航路径如表 3 所示。

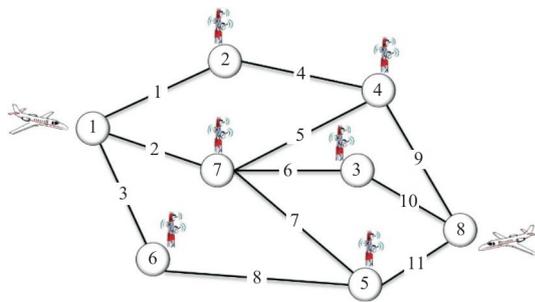


图 2 模拟区域单 OD 对航空网络

Fig. 2 Simulation area single OD pair aviation network

表 3 机场 OD 对间通行路径

Table 3 Airport OD pair passage path

D	O	通行路径
1	1	0
1	8	1-4-9, 2-5-9, 3-8-11, 2-6-10, 2-7-11
8	1	9-4-1, 9-5-2, 11-8-3, 10-6-2, 11-7-2
8	8	0

根据航段实际承载运输量情况及航段端点处的节点状态可以设定各航段的初始阻抗及最大交通容量如表 4 所示。

表 4 各航段初始阻抗

Table 4 Initial impedance of each route

航段	初始阻抗/min	最大容量/架次
1	22	58
2	29	60
3	24	57
4	18	54
5	10	53
6	15	56
7	11	55
8	17	59
9	20	55
10	14	58
11	19	52

在该模拟航空网络中, 该五条路径在理想条件自由飞行状态下的初始时间阻抗分别为 60、59、58、59、60 min。

通过空中交通流量分配模型对该模拟航空网络进行配流可得到 5 条路径的阻抗分别为 111.826 4、112.154 5、112.465 4、112.030 7、111.774 5 min, 满足均衡配流结果要求, 则初始网络性能指标如表 5 所示。

表 5 初始网络性能指标

Table 5 Initial network performance index

网络指标	结果	网络指标	结果
Q_N	0.628 63	c_i^{NRI} / min	62 708.889 5
γ	0.611 1		

基于以上内容, 现从脆弱识别标准与瓶颈识别标准两方面对关键航段进行识别分析。

(1) 脆弱识别标准

在脆弱识别标准的识别流程下, 分别取 μ 为

1.00、0.75、0.50,采用路径最优的空中交通流均衡分配模型计算航段重要度指标,可以得到三组航段序列。

删除航段时航段重要度排序如表 6 所示,设定参数 $\mu=1.00$,即将航段容量减小至零,通过放回方式,依次将 1 至 11 条航段分别删除,计算得到删除对应航段的网络鲁棒性指标 C_e^{NRI} 、网络平均拥塞率 Q_N 及 γ 指标的变化值,进而计算出网络综合性能变化值 ΔS_e 。

C_e^{NRI} 变化值排序如表 6 所示,可以看出:2、9、11 号航段分别位列 1、2、3 位;5、7 号航段分别位列 10、11 位。这说明 2、9、11 号航段在该模拟航空网络中承担着维持网络运行稳定的主要作用。

此外,根据 ΔQ_N 排序结果,排名前三的航段为 2、11、9 号航段,与 C_e^{NRI} 指标排序结果不同,11 与 9 号航段位置对调,根据配流结果,可以发现 11 号航段拥塞率为 0.849 7 略高于 9 号航段拥塞率 0.825 6,所以在网络平均拥塞率指标评价结果上体现为 11 号航段重要度排名高于 9 号。

从指标 $\Delta\gamma$ 排序结果,可以看到,排名前三的航段和排名末位的航段与前两个指标评价结果基本保持一致,因为指标 γ 表示的是删除航段与理论航段的比值,所以删除 2 号航段造成三条路径失效,导致其在该指标下排名第一,9、11 号航段的删除将造成两条路径失效进而并列第二,其他航段同理。通过网络综合性能指标变化值 ΔS_e ,可以看

出:在 $\mu=1.00$ 条件下,排名前五的关键航段为:2、9、11、1、4。

$\mu=0.75$ 时航段重要度排序如表 7 所示, $\mu=0.75$ 时,针对 1-11 号航段综合评价指标排序情况,通过降低各航段容量,对网络综合性能指标变化值 ΔS_e 进行计算,可以看出:重要度排名前三的航段保持不变,说明容量降低了 75%,这三个航段仍然承担主要的网络流量,其核心地位未发生动摇,但 1 号航段排名从删除法中的第 4 位掉至第 6 位,这说明,当 1 号航段容量降低了 75%时,该航段在运输网络中的承担的流量分配能力下降,即 1 号航段重要度受该航段容量影响较大。

此外,4 号航段重要度排序上升,表明该行段在容量降低情况下,在整体网络中的性能表现有所上升,其在网络中的重要程度随容量降低而上升。

对于 ΔS_e 排名末位的 5、7 号航段,由于本身在网络模型中的重要程度较低,对于容量的改变反应不明显。

$\mu=0.50$ 时航段重要度排序如表 8 所示,在 $\mu=0.50$ 时,从 1-11 号航段重要度排序情况可以明显看到,当容量降低 50%时,重要度排名前三位的航段仍旧保持不变,但明显的区别在于:10、6 号航段重要度上升至 4、5 位,主要原因可以从指标 C_e^{NRI} 及 Q_N 变化值排名发现,当降低航段容量至原先的 1/2 时,6、10 航段在维持网络稳定性及控制拥塞程度发挥出更大的作用。

表 6 删除航段时航段重要度排序($\mu=1.00$)

Table 6 Ranking of routes importance when $\mu=1.00$

航段	C_e^{NRI}/min	$\Delta C_e^{NRI}/\text{min}$	ΔC_e^{NRI} 排序	Q_N	ΔQ_N	ΔQ_N 排序	γ	$\Delta\gamma$	$\Delta\gamma$ 排序	ΔS_e	ΔS_e 排序
1	93 260.888 6	30 551.999 1	2	0.767 4	0.138 74	2	0.500 0	0.111 1	2	0.310 99	2
2	137 260.428 4	74 551.538 9	9	1.166 4	0.537 77	11	0.333 3	0.277 8	9	0.937 00	9
3	92 357.490 9	29 648.601 4	11	0.770 0	0.141 41	9	0.500 0	0.111 1	11	0.304 21	11
4	93 260.888 6	30 551.999 1	1	0.767 3	0.138 67	10	0.500 0	0.111 1	1	0.310 95	1
5	64 531.384 8	1 822.495 3	4	0.691 3	0.062 67	6	0.555 6	0.055 5	3	0.005 25	4
6	82 933.152 3	20 224.262 8	3	0.777 9	0.149 23	3	0.500 0	0.111 1	4	0.222 21	3
7	63 971.136 7	1 262.247 2	8	0.691 1	0.062 46	8	0.555 6	0.055 5	6	0	8
8	92 357.490 9	29 648.601 4	6	0.770 0	0.141 41	1	0.500 0	0.111 1	8	0.304 21	10
9	134 350.682 2	71 641.792 7	10	0.981 0	0.352 39	4	0.388 9	0.222 2	10	0.806 82	6
10	82 933.152 3	20 224.262 8	5	0.777 9	0.149 23	5	0.500 0	0.111 1	5	0.222 21	5
11	131 733.186 3	69 024.296 8	7	0.982 5	0.353 90	7	0.388 9	0.222 2	7	0.783 68	7

表 7 航段重要度排序($\mu=0.75$)

Table 7 Ranking of routes importance when $\mu=0.75$

航段	C_e^{NRI}/min	$\Delta C_e^{NRI}/\text{min}$	ΔC_e^{NRI} 排序	Q_N	ΔQ_N	ΔQ_N 排序	ΔS_e	ΔS_e 排序
1	71 086.126 2	8 377.236 7	2	0.711 1	0.082 50	11	0.423 2	2
2	87 097.553 5	24 388.664 0	9	0.726 34	0.097 7	9	0.914 3	9
3	71 703.020 1	8 994.130 6	11	0.710 10	0.081 5	2	0.437 4	11
4	70 757.360 3	8 048.470 8	3	0.719 15	0.090 5	8	0.437 7	4
5	63 001.433 7	292.544 2	1	0.653 00	0.024 4	4	0.026 9	3
6	65 742.755 7	3 033.866 2	4	0.715 08	0.086 5	10	0.286 0	1
7	63 008.773 4	299.883 9	8	0.643 87	0.015 2	6	0.000 2	8
8	69 467.085 7	6 758.196 2	6	0.719 83	0.091 2	1	0.403 8	6
9	84 875.325 3	22 166.435 8	10	0.730 28	0.101 5	3	0.864 0	10
10	65 086.912 5	2 378.023 0	7	0.716 49	0.087 9	5	0.271 8	5
11	84 282.325 8	21 573.436 3	5	0.734 05	0.105 4	7	0.858 5	7

表 8 航段重要度排序($\mu=0.50$)

Table 8 Ranking of routes importance when $\mu=0.50$

航段	C_e^{NRI}/min	$\Delta C_e^{NRI}/\text{min}$	ΔC_e^{NRI} 排序	Q_N	ΔQ_N	ΔQ_N 排序	ΔS_e	ΔS_e 排序
1	64 417.241 0	1 708.351 5	2	0.672 8	0.044 2	11	0.344 1	2
2	70 731.148 8	8 022.259 3	9	0.680 7	0.052 0	9	0.920 7	9
3	64 593.173 1	1 884.283 6	11	0.673 3	0.0446	2	0.361 5	11
4	64 300.702 0	1 591.812 5	10	0.676 7	0.0481	6	0.355 5	10
5	62 785.809 1	76.919 6	6	0.638 3	0.009 7	4	0.019 0	6
6	60 527.364 0	2 181.525 5	3	0.676 9	0.048 2	10	0.406 1	3
7	62 797.855 0	88.965 5	1	0.634 8	0.006 2	8	0.001 0	4
8	63 589.317 3	880.427 8	4	0.675 9	0.047 3	3	0.290 9	1
9	69 392.430 6	6 683.541 1	8	0.681 3	0.052 7	1	0.810 9	8
10	60 394.286 6	2 314.602 9	7	0.676 6	0.047 9	5	0.415 8	5
11	68 824.459 9	6 115.570 4	5	0.683 7	0.055 1	7	0.775 8	7

上述三种情形,主要基于航段脆弱性,对模拟航空网络中的各个航段重要程度进行定量评估,通过对比可以发现,在脆弱识别标准下,2、9、11 始终位列重要度排序的前三位,说明容量降低对于该三条航段在网络中的核心地位几乎不产生影响。此外,对于排名末位的 5、7 号航段同样可以看出,从删除到降低容量,对该两个航段的重要度影响微乎其微。

(2) 瓶颈识别标准

在瓶颈识别标准的识别流程下,分别取 $\eta =$

0.25、0.50、0.75,对航段容量进行比例增加,得到三组重要度排序,如表 9~表 11 所示。

其中从 11 条航段的指标排序情况可以看出,当航段容量增加时,对网络整体性能的影响,与脆弱识别标准结果有较大不同。重要度排名前两位的航段发生变化,分别为 6、10 号航段,并且 C_e^{NRI} 指标变化量排名前两位的是 6、10 号航段,同时 3 号航段的重要度排名也超越了 9、11 号航段,1 号航段在容量增幅为 75%时,重要度排名上升至第三位。

表 9 航段重要度排序($\eta=0.25$)Table 9 Ranking of routes importance when $\eta=0.25$

航段	C_e^{NRI}/min	$\Delta C_e^{NRI}/\text{min}$	ΔC_e^{NRI} 排序	Q_N	ΔQ_N	ΔQ_N 排序	ΔS_e	ΔS_e 排序
1	63 366.318 2	657.428 7	6	0.615 10	0.013 5	2	0.419 7	6
2	61 439.608 2	1 269.281 3	10	0.611 28	0.017 4	9	0.688 7	10
3	63 709.568 3	1 000.678 8	2	0.614 83	0.013 8	11	0.539 6	2
4	63 298.201 5	589.312 0	3	0.614 11	0.014 5	6	0.413 2	3
5	62 698.805 1	10.084 4	11	0.626 58	0.002 1	4	0.011 8	11
6	64 716.719 5	2 007.830 0	1	0.613 93	0.014 7	10	0.893 1	9
7	62 697.703 0	11.186 5	8	0.627 29	0.001 3	3	0.000 2	1
8	63 351.879 1	642.989 6	9	0.615 29	0.013 3	1	0.411 7	4
9	62 109.830 1	599.059 4	4	0.611 77	0.016 9	8	0.455 3	8
10	64 440.445 1	1 731.555 6	7	0.614 23	0.014 4	5	0.795 2	5
11	62 019.176 3	689.713 2	5	0.611 74	0.016 9	7	0.486 3	7

表 10 航段重要度排序($\eta=0.50$)Table 10 Ranking of routes importance when $\eta=0.50$

航段	C_e^{NRI}/min	$\Delta C_e^{NRI}/\text{min}$	ΔC_e^{NRI} 排序	Q_N	ΔQ_N	ΔQ_N 排序	ΔS_e	ΔS_e 排序
1	64 074.709 0	1 365.819 5	6	0.605 7	0.022 9	2	0.427 3	6
2	61 693.250 1	1 015.639 4	10	0.596 8	0.031 8	11	0.444 4	10
3	64 251.961 7	1 543.072 2	3	0.604 2	0.024 5	9	0.472 7	3
4	63 985.779 3	1 276.889 8	1	0.604 1	0.024 5	6	0.425 4	2
5	62 692.847 7	16.041 8	4	0.625 1	0.003 5	3	0.011 7	1
6	66 474.639 5	3 765.750 0	8	0.603 0	0.025 7	4	0.881 6	4
7	62 691.572 3	17.317 2	2	0.626 4	0.002 2	10	0.000 2	8
8	63 780.962 0	1 072.072 5	9	0.605 8	0.022 8	1	0.373 5	9
9	62 389.020 6	319.868 9	11	0.598 4	0.030 3	8	0.305 9	11
10	65 801.660 2	3 092.770 7	7	0.604 4	0.024 3	5	0.748 6	5
11	62 740.562 4	31.672 9	5	0.597 8	0.030 9	7	0.259 7	7

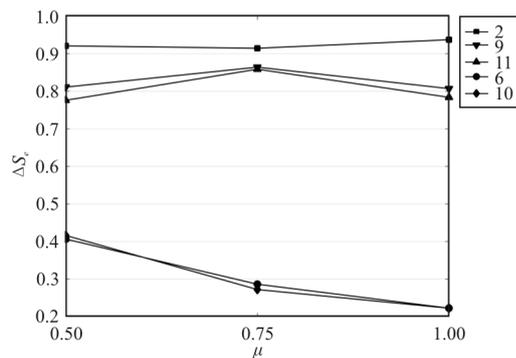
表 11 航段重要度排序($\eta=0.75$)Table 11 Ranking of routes importance when $\eta=0.75$

航段	C_e^{NRI}/min	$\Delta C_e^{NRI}/\text{min}$	ΔC_e^{NRI} 排序	Q_N	ΔQ_N	ΔQ_N 排序	ΔS_e	ΔS_e 排序
1	64 691.328 9	1 982.439 4	6	0.598 10	0.030 5	2	0.441 7	6
2	63 082.160 1	373.270 6	10	0.584 59	0.044 0	11	0.312 9	10
3	64 486.641 1	1 777.751 6	1	0.596 97	0.031 7	9	0.421 5	1
4	64 430.081 2	1 721.191 7	3	0.596 12	0.032 5	6	0.419 4	3
5	62 689.510 8	19.378 7	4	0.624 12	0.004 5	4	0.010 8	4
6	67 734.837 6	5 025.948 1	8	0.594 74	0.033 9	3	0.871 6	8
7	62 688.074 3	20.815 2	11	0.625 80	0.002 8	10	0.000 2	11
8	64 089.741 3	1 380.851 8	2	0.599 20	0.029 4	1	0.353 9	2
9	62 992.926 6	284.037 1	9	0.588 45	0.040 2	8	0.276 0	9
10	66 753.871 6	4 044.982 1	7	0.596 97	0.031 7	5	0.725 7	5
11	63 435.016 8	726.127 3	5	0.586 69	0.041 9	7	0.346 7	7

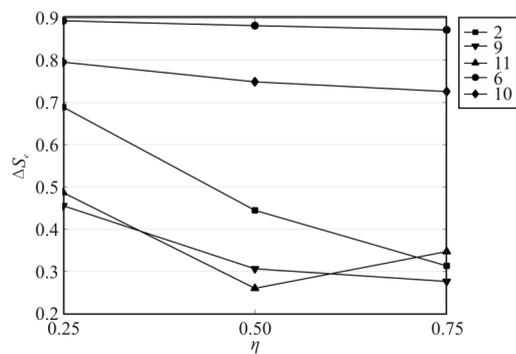
航段重要度排序变化的主要原因在于,在原有网络初始条件下,6、10、3、1 号航段容量限制作用明显,现将航段容量增加,经配流得到 6、10、3、1 号航段的网络流量分配比重增大,对网络稳定性的贡献率上升,同时帮助降低网络平均拥塞率的作用显著增强,所以该航段重要度上升。

此外,2、9、11 号航段作为脆弱性标准评价的关键航段,由于自身初始优势较大,所以在容量减小时,仍在网络中发挥关键作用,但在瓶颈识别标准中,这些航段的传统优势逐渐丧失,表现出瓶颈属性,重要度排名下降明显。反而一些初始条件不具优势的航段在容量增加的过程中,在网络中的影响力和贡献率不断提升,致使重要度排名发生变化。通过将两种识别标准中 6 种情况进行统计,可以看到网络中关键航段的变化情况。

两种识别标准下航段重要度变化如图 3 所示。



(a) 脆弱识别标准下航段重要度变化



(b) 瓶颈识别标准下航段重要度变化

图 3 两种识别标准下航段重要度变化

Fig. 3 Changes of importance of routes under two identification standards

在图 3(a)中,在航段容量降低的条件下,2、9、11 号航段综合重要度较高,6、10 号航段综合重要度较低,说明 2、9、11 号航段在容量降低时,对航空

网络运行性能影响较大。在图 3(b)中,6 和 10 号航段的综合重要度明显较高,2、9、11 号航段综合重要度降低,说明当容量增加后,6 和 10 号航段在航空网络中发挥的作用逐渐超越 2、9、11 号航段。这些航段可被视为航空网络中的潜在关键航段。潜在关键航段在正常运行情况下作用并不突出,但若对其容量进行调整,潜在关键航段可以转化为关键航段,从而影响整个网络运行性能。

3 结 论

(1) 在脆弱识别标准下,随着容量的减少,2、9、11 号航段综合重要度较高,6、10 号航段综合重要度较低,说明 2、9、11 号航段对航空网络运行性能影响较大。

(2) 在瓶颈识别标准下,随着容量的增加,6 和 10 号航段的综合重要度明显较高,2、9、11 号航段综合重要度降低,说明 6 和 10 号航段对航空网络运行性能影响较大。

容量变化会对航段在航空网络中重要度产生影响,一些潜在关键航段在突破容量瓶颈时可以实现重要性的提升。

参考文献

[1] 董念清. 中国航班延误的现状、原因及治理路径[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2013, 26(6): 25-32.
Dong Nianqing. Current situation, causes and governance path of flight delays in China[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2013, 26(6): 25-32. (in Chinese)

[2] 张莉, 姚津津. 高铁对民航业发展影响的实证分析[J]. 综合运输, 2016, 38(12): 32-36.
Zhang Li, Yao Jinjin. Empirical analysis of the impact of high-speed rail on the development of civil aviation industry [J]. China Transportation Review, 2016, 38(12): 32-36. (in Chinese)

[3] 赵桂红, 邓珺怡, 郑兴. 中国民航国际航空运输发展现状及政策建议[J]. 中国交通观察, 2016, 38(12): 23-26.
Zhao Guihong, Deng Junyi, Zheng Xing. Current situation and policy suggestions of international air transport development in China's civil aviation[J]. China Transportation Review, 2016, 38(12): 23-26. (in Chinese)

[4] Mou J, Liu C, Chen S, et al. Temporal characteristics of the Chinese aviation network and their effects on the spread of infectious diseases[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1275-1288.

[5] Saadi T K, Ahmed H R, Akram A A. Increase the aviation efficiency of UAVs using artificial neural networks[EB/

- OL]. [2018-10-30]. https://www.researchgate.net/publication/322135371_Increase_the_aviation_efficiency_of_UA-Vs_using_artificial_neural_networks.
- [6] Zhou Y, Wang J. Critical link analysis for urban transportation systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(2): 402-415.
- [7] 王兴隆, 潘维煌, 赵末. 航空相依网络的鲁棒性与拥堵性分析[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 110-115.
Wang Xinglong, Pan Weihuang, Zhao Mo. Robustness and congestion analysis of aviation dependent networks[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2): 110-115. (in Chinese)
- [8] 陈航宇, 李慧嘉. 中国航空复杂网络的结构特征与应用分析[J]. 计算机科学, 2019, 46(1): 300-304.
Chen Hangyu, Li Huijia. Structural characteristics and application analysis of China Aviation complex network[J]. Computer Science, 2019, 46(1): 300-304. (in Chinese)
- [9] 王航臣. 基于级联失效的航路网络中关键航路识别算法[J]. 航空计算技术, 2017, 21(6): 32-35.
Wang Hangchen. Key route identification algorithm in route network based on cascade failure[J]. Aviation Computing Technology, 2017, 21(6): 32-35. (in Chinese)
- [10] Zhu Z H, Zheng J F, Gao Z Y, et al. Properties of volume-capacity ratio in congested complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 400(4): 200-206.
- [11] Como G, Lovisari E, Savla K. Convexity and robustness of dynamic traffic assignment and freeway network control [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 91(9): 446-465.
- [12] 张纪升, 贾利民, 牛树云, 等. 基于 K-短路径的路网关键路段集合的辨识与分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(3): 122-129.
Zhang Jisheng, Jia Limin, Niu Shuyun, et al. Identification and analysis of key road network sections based on K-short route[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2015, 35(3): 122-129. (in Chinese)
- [13] 李秀美, 陈华友. 不确定信息下模糊网络最短路径关键边问题[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(1): 36-39.
Li Xiumei, Chen Huayou. Critical edge problem of fuzzy network shortest path under uncertain information [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(1): 36-39. (in Chinese)
- [14] 高明霞. 道路交通网络最短路径关键转向研究[J]. 公路, 2018, 63(9): 199-202.
Gao Mingxia. Research on the shortest path critical turn of road traffic network[J]. Highway, 2018, 63(9): 199-202. (in Chinese)
- [15] 左志, 王涛, 潘晓锋. 基于路网可靠性的关键点段辨识: 以乌鲁木齐为例[J]. 交通运输研究, 2015, 1(5): 18-24.
Zuo Zhi, Wang Tao, Pan Xiaofeng. Key point segment identification based on road network reliability: taking Urumqi City as an example [J]. Transportation Research, 2015, 1(5): 18-24. (in Chinese)
- [16] Deng X, Yong D. D-AHP method with different credibility of information[J]. Soft Computing, 2017(7): 1-9.
- [17] Pelorus, Karahalios H. The application of the AHP-TOPSIS for evaluating ballast water treatment systems by ship operators[J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2017, 52(Part A): 172-184.
- [18] 王树盛, 黄卫, 陆振波. 路阻函数关系式推导及其拟合分析研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(4): 107-110.
Wang Shusheng, Huang Wei, Lu Zhenbo. Derivation of road resistance function and its fitting analysis[J]. Road Traffic Science and Technology, 2006, 23(4): 107-110. (in Chinese)
- [19] 郑煜坤, 王瑛, 元尧, 等. 区域航路网络容量评估模型[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(4): 38-42.
Zheng Yukun, Wang Ying, Qi Yao, et al. Regional route network capacity evaluation model[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2018, 19(4): 38-42. (in Chinese)
- [20] 孙洪运. 双运量约束下的 OD 分布与随机用户均衡交通分配组合模型[J]. 物流科技, 2010, 33(8): 25-28.
Sun Hongyun. Combination model of OD distribution and stochastic user equilibrium traffic allocation under double traffic constraints[J]. Logistics Technology, 2010, 33(8): 25-28. (in Chinese)
- [21] Li C Y, Huang H J. User equilibrium of a single-entry traffic corridor with continuous scheduling preference [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 108: 21-38.
- [22] Li Q, Liao F, Timmermans H J P, et al. Incorporating free-floating car-sharing into an activity-based dynamic user equilibrium model: A demand-side model[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 107: 102-123.

作者简介:

李佳威(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空网络、空管运行与管理。

刘飞(1986—),男,硕士,讲师。主要研究方向:管制指挥安全与空域规划。

吴明功(1966—),男,硕士,教授,硕导。主要研究方向:空管运行与安全及空域管理。

余敏建(1963—),男,硕士,教授,硕导。主要研究方向:空态势评估及空战模拟仿真。

康润喆(1996—),男,本科生。主要研究方向:空管运行与安全及空域管理相关领域研究。

(编辑:丛艳娟)