

# 区域航路网络容量评估模型

郑煜坤, 王 瑛, 亓 尧, 孙 赞, 李正欣

(空军工程大学装备管理与无人机工程学院, 西安, 710051)

**摘要** 针对区域航路网络容量评估方法单一、主观性强等问题,提出基于有向图理论的动态容量评估模型。充分提取航路网络特征,将多源、汇点复杂航路网络抽象成单源、汇点标准航路网络。引入航路阻抗公式,将管制员因素融入客观容量评估中,并利用 Ford-Fulkerson 算法求解航路网络容量及关键路径。最后以某飞行情报区为例,分析了航路网络的容量特征,得出其关键路径集的瓶颈容量为 354.4 sor/h。仿真结果证明了该模型的有效性和准确性。

**关键词** 区域航路网络;有向图理论;动态容量评估模型;航路阻抗公式

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.04.007

**中图分类号** V37;TP393.07 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)04-0038-05

## Research on Regional Air Route Network Capacity Evaluation Model

ZHENG Yukun, WANG Ying, QI Yao, SUN Yun, LI Zhengxin  
(Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering College,  
Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aim at the rare and strong subjectivity of evaluation method on regional air route network capacity, this paper puts forward a dynamic capacity evaluation model based on directed graph theory. The model fully extracts the characteristics of air route network which can abstract the complex air route network with multi source and sink into standard air route network with single source and sink, introduces the impedance formula of air route to integrate controller factors into objective capacity assessment and uses the algorithm of Ford-Fulkerson to solve the capacity and critical paths of air route network. Finally, this paper takes a flight information area as an example, analyses the capacity characteristic of the air route network and finds out bottleneck capacity of critical paths is 354.4 sor/h, which prove the accuracy and effectiveness of the model.

**Key words:** regional air route network; directed graph theory; dynamic capacity evaluation model; impedance formula of air route

随着我国民航航路网络节点不断拓展,网络结构性矛盾日益突出<sup>[1]</sup>。因此,开展航路网络容量评估研究十分必要。

航路网络容量评估指对单位时间网络内最大飞行架次进行计算,分为宏观容量评估、区域容量评估和微观容量评估<sup>[2]</sup>。其中,宏观容量评估针对全国主干航

**收稿日期:** 2017-07-18

**基金项目:** 国家自然科学基金(61502521)

**作者简介:** 郑煜坤(1993—),男,河南焦作人,硕士生,主要从事交通流量调度与决策分析研究。E-mail:627641956@qq.com

**引用格式:** 郑煜坤,王瑛,亓尧,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. Research on Regional Air Route Network Capacity Evaluation Model[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(4): 38-42.

路网进行,其所需数据量较大,分析过程复杂;区域容量评估针对一定范围内的支线航路网进行,常见有扇区容量评估、终端区容量评估等;微观容量评估针对航段、机场进近段等单一通道进行,评估难度较小<sup>[3]</sup>。

目前,国内外研究主要针对宏观网络容量和航段容量,评估方法多基于管制员工作负荷。文献[4]综合考虑多种因素的影响,建立基于管制员工作负荷的扇区容量评估模型。文献[5]针对某一具体航段,采用增量法获得饱和状态时的运行流量,但该方法评估范围较小。文献[6]提出一种动态区域容量评估技术,并将流量管理与容量评估相结合以提高空域系统运行效率。文献[7]针对不同空域结构分别提出4种容量评估模型并进行比较,提升了评估精确性。文献[8]提出基于网络阻塞流的进近管制区容量评估模型,确保了对终端区容量的准确评估。文献[9]引入公路网络阻抗公式,进一步丰富了航路网络容量评估模型。

为解决区域航路网络评估模型较少、主观性强等问题,本文引入有向图理论和航路阻抗公式,在对客观容量进行评估的同时考虑管制员因素,充分提高评估模型的准确性和有效性。

## 1 航路网络模型构建

### 1.1 模型假设

根据性质不同可将区域内各航段分为过境航段、入境航段、出境航段和境内航段<sup>[10]</sup>。使用有向图理论构建区域航路网络,假设如下:

- 1) 不存在同高度层航空器互相超越的情况;
- 2) 不考虑支线航路局部飞行冲突;
- 3) 机场终端区飞行情况良好,能够保证航空器正常起降;
- 4) 不同类型航空器在航段各高度层中分配比例固定。

### 1.2 网络构建

以模型假设为基础,结合区域航路网络的具体结构和航段信息,提出标准航路网络构建步骤:

1) 确定评估区域及预估航向。根据需求选择评估区域及预估航向,保留与预估航向夹角在 $45^\circ$ 以内的航段,剔除逆向航段和横向航段。

2) 确定节点、源点和汇点。为了将航路网络表示成规范化网络,可令节点 $V_i$ 为出发城市、中继城市、到达城市或区域边境点,它们能够产生、吸收或传导飞行流量;令 $V_0$ 表示原点,即入境点集合;令 $V_i$ 表汇点,即出境点集合。

3) 确定航段。区域航路网络中航段成分复杂,其中过境航段指起点、终点都不在区域内的航段;入

境航段指起点在区域外,终点在区域内的航段;出境航段指起点在区域内,终点在区域外的航段;境内航段指起点、终点都在区域内的航段。

4) 确定网络层次。可将区域航路网络划分为起始层、中间层和终端层。起始层由过境航段和入境航段组成;中间层由4种航段混合组成;终端层由过境航段和出境航段组成,见图1。

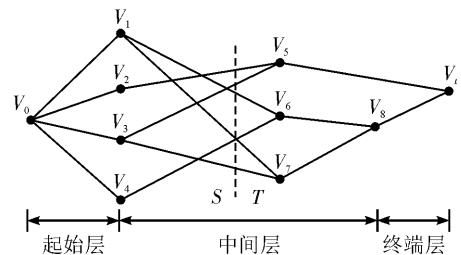


图1 标准航路网络

Fig. 1 Standard air route network

### 1.3 数学描述

为有效分析标准航路网络特征,评估航段容量,进而确定网络容量及限制航路网络流量增长的关键路径,进行如下定义:

1) 航段容量:指单位时间内航段入口点允许通过的通行架次与航段所能容纳的航空器极限数目之和<sup>[11]</sup>:

$$C_{ij} = C_{ijtc} + C_{ijpc} \quad (1)$$

式中:各航段权重设置为 $V_i V_j (C_{ij}, f_{ij})$ , $i$ 为航段起点, $j$ 为航段终点, $C_{ij}$ 为航段容量, $f_{ij}$ 为航段流量; $C_{ijtc}$ 为航段口通行容量; $C_{ijpc}$ 为 $V_i V_j$ 段物理容量,单位为sor/h; $C_{ijtc}$ 、 $C_{ijpc}$ 可表示为:

$$C_{ijtc} = \bar{v}_{ij} / (\bar{d}_{ij} + \Delta d_{ij}) \quad (2)$$

$$C_{ijpc} = \sum_{a=1}^k C_{ija} W_{ija} \quad (3)$$

式中: $\bar{v}_{ij}$ 为航空器均速; $\bar{d}_{ij}$ 为航段平均管制距离; $\Delta d_{ij}$ 为由于人为因素增加的管制距离; $k$ 为航段高度层数; $W_{ija}$ 为第 $a$ 高度层使用率上限; $C_{ija}$ 为第 $a$ 高度层的物理容量,可进一步表示为:

$$C_{ija} = L_{ij} / (\bar{d}_{ij} + \Delta d_{ija}) \quad (4)$$

式中: $L_{ij}$ 为航段长度, $\Delta d_{ija}$ 为第 $a$ 高度层增加的管制距离。

2) 相关管制规则:包括航空器均速和空中管制距离,它们都与航段内航空器类型有关,分别表示为:

$$\bar{v}_{ij} = \sum_{m=1}^{\beta} p_m v_m \quad (5)$$

$$\bar{d}_{ij} = \sum_{m=1}^{\beta} \sum_{n=1}^{\beta} p_m p_n d_{mn} \quad (6)$$

式中: $p_m (m=1, 2, \dots, \beta)$ 、 $v_m (m=1, 2, \dots, \beta)$ ,分别为各型航空器的比例和速度; $d_{mn} (m, n=1, 2, \dots, \beta)$ 为不同情况下空中管制距离。根据民航总局相关规定,大型机、中型小型机的平均速度分别为900 km/h、

800 km/h 和 750 km/h,其管制规则见表 1<sup>[12]</sup>。

表 1 不同类型航空器管制距离

前机	后机		
	大型机	中型机	小型机
大型机	8	10	12
中型机	6	6	10
小型机	6	6	6

3) 航路阻抗公式:为度量管制员等人为因素对航路客观容量的影响,根据公路网络的阻抗原理引入航路阻抗公式:

$$t_{ija} = t_{ija}^0 [1 + \delta(f_{ija}/C_{ij})^\gamma] \quad (7)$$

式中: $t_{ija}$  为航段阻抗; $t_{ija}^0$  为零流阻抗,表示  $V_i V_j$  段第  $a$  高度层上流量为 0 时一架航空器自由通过所需要的时间; $f_{ija}$  表示  $V_i V_j$  段第  $a$  高度层的流量; $\delta$ 、 $\gamma$  为模型参数,可取  $\delta = 0.5668$ ,  $\gamma = 1.4431$ <sup>[9]</sup>。 $f_{ija}$  可进一步表示为:

$$f_{ija} = f_{ij} \theta_{ija}, f_{ija}^0 = L_{ij} / \bar{v} \quad (8)$$

$$f_{ij} = \sum_{a=1}^k f_{ija}, \sum_{a=1}^k \theta_{ija} = 1 \quad (9)$$

式中: $\theta_{ija}$  为各高度层流量分配比例。由式(5)、式(7)、式(9)可进一步得到航空器平均管制距离:

$$\Delta d_{ija} = \bar{d}_{ij} (t_{ija} - t_{ija}^0) \bar{v} / L_{ij} \quad (10)$$

$$\Delta d_{ij} = \sum_{a=1}^k \theta_{ija} \Delta d_{ija} \quad (11)$$

综上所述,可得融入管制员因素的区域航路网络动态容量评估公式,有效弥补了传统静态评估的缺陷,可表示为:

$$C_{ij} = \bar{v}_{ij} / \left\{ \bar{d}_{ij} + \sum_{a=1}^k [\theta_{ija} \bar{d}_{ij} \delta (f_{ija}/C_{ij})^\gamma] \right\} + \sum_{a=1}^k \{ W_{ija} L_{ij} / [\bar{d}_{ij} + \bar{d}_{ij} \delta (f_{ija}/C_{ij})^\gamma] \} \quad (12)$$

## 2 航路网络模型求解

区域航路网络由许多航段构成,其容量由关键路径集决定,结合上述标准航路网络和航段容量公式,总结出以下模型求解过程。

### 2.1 模型约束

区域航路网络的正常运转需满足航段流量限制条件和网络平衡条件,其表达式如下:

1) 航段流量限制条件:

$$f_{ija} \leq C_{ij} W_a, f_{ij} \leq C_{ij} \quad (13)$$

该式对航段整体流量及不同高度层流量做出限制。

2) 网络平衡条件:

$$\sum_v f(V_i, V_j) - \sum_v f(V_j, V_i) =$$

$$\begin{cases} |f|, & V_i = V_s \\ 0, & V_i \neq v_s, V_t \\ -|f|, & V_i = V_t \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\sum_v f(V_i, V_j)$  指从  $V_i$  点发出的流量之和; $\sum_v f(V_j, V_i)$  指汇入  $V_i$  点的流量之和; $|f|$  指网络的运转流量。

### 2.2 容量评估方法

区域航路网络中满足相应约束条件的最大运转流量,称为航路网络容量,即网络最大流。其常用评估方法为最大流最小割定理<sup>[13]</sup>。

在网络  $G(V, E)$  中,设  $E' \in E$ ,若删去  $E'$  导致网络  $G$  不连通,则称  $E'$  为  $G$  的割, $E'$  将  $G$  的顶点集  $V$  划分为  $S$  和  $T$ ,则可将割记为  $(S, T)$ ,如图 1 所示。其容量满足如下关系:

$$C(S, T) = \sum C(V_i, V_j) \quad (15)$$

式中: $V_i \in S, V_j \in T, (V_i, V_j) \in E$ 。在割  $(S, T)$  中,具有最小容量的割称为最小割,最大流最小割定理可以表述为:

$$\max F_G(V, E) = \min \sum C(V_i, V_j) \quad (16)$$

$$V_i \in S, V_j \in T, (V_i, V_j) \in E$$

因此,区域航路网络容量可以通过网络的最小割进行求解。

### 2.3 求解算法

求解网络最大流可采用 Ford-Fulkerson 算法<sup>[14]</sup>,其基本思想为:在网络中任选一点进行标号,之后根据该点寻找增广链并进行增广调整,从而获得流量更大的可行流。按照固定标号规律持续进行上述过程,直到网络中不存在增广链为止,则可得到网络的最小割和最大流。算法的具体步骤为:

**Step 1** 将容量网络各边标号设置为  $(C_{ij}, f_{ij})$ 。

**Step 2** 将源点  $V_0$  设置为  $V_0(0, +\infty)$ 。

**Step 3** 从  $V_0$  出发寻找相邻未标号且可标号点  $V_i$ ,设置标号  $V_i(V_j, d)$ ,其中  $V_j$  代表标号来源点, $d$  代表调整量。

**Step 4** 从  $V_i$  出发继续寻找未标号且可标号点并进行标号,当汇点  $V_t$  标号完毕或标号过程无法继续时,执行 **Step 5**。

**Step 5** 若标号完毕,则采用追溯法确定可行流,进入增广调整阶段,执行 **Step 6**;若标号过程无法继续,则容量网络饱和,得到最小割和最大流,算法结束。

**Step 6** 根据可行流中各点  $d$  对各边  $f$  进行调整。

**Step 7** 取消各点标号,保留各边标号,执行 **Step 2**。

## 3 实例分析

以某飞行情报区为例进行分析,评估方向为由

北至南向,剔除区域内的横向航段和逆向航段,其简化的航路网络示意图 2。

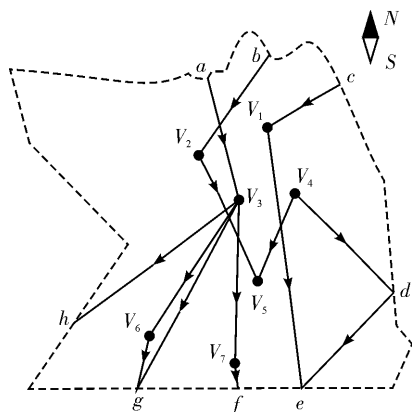


图 2 区域航路简化图

Fig. 2 Simplified diagram of regional air route

图中,虚线表示区域边境,实线表示航路,字母表示边境点或机场点,箭头指向为航空器运行方向。则该情报区的标准航路网络示意图,见图 3。

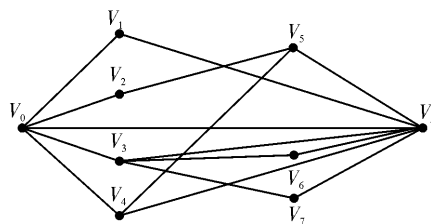


图 3 某情报区区域标准航路网络

Fig. 3 Regional standard air route network

收集该飞行情报区上年度航段信息数据,见表 2。

根据式(14)得到各航段动态容量,其结果见表 3。然后根据式(13)对各航段流量是否超出标准进行判断,得到容流对比图,见图 4。

表 2 区域航段数据表

Tab. 2 Regional air route data sheet

航段	$\bar{d}_{ij}$ /km	$L_{ij}$ /km	$f_{ij}$ /(sor · h <sup>-1</sup> )	$\bar{v}_{ij}$ /(km · h <sup>-1</sup> )	$\theta_{ija}$			$W_{ija}$			$p_i$		
					上	中	下	上	中	下	大	中	小
cV <sub>1</sub>	7.78	114.73	95.7	816.0	0.30	0.30	0.40	0.60	0.70	0.65	0.33	0.33	0.34
bV <sub>2</sub>	7.93	166.42	94.6	826.0	0.40	0.40	0.20	0.65	0.70	0.60	0.42	0.26	0.32
aV <sub>3</sub>	7.65	180.39	87.8	830.0	0.30	0.40	0.30	0.55	0.60	0.70	0.38	0.46	0.16
V <sub>1</sub> e	7.82	365.93	120.4	817.0	0.35	0.35	0.30	0.60	0.75	0.80	0.35	0.29	0.36
V <sub>2</sub> V <sub>5</sub>	7.99	192.94	92.7	821.5	0.45	0.30	0.25	0.65	0.70	0.60	0.35	0.23	0.43
de	7.91	181.25	100.4	831.0	0.45	0.30	0.25	0.70	0.65	0.75	0.44	0.30	0.26
V <sub>3</sub> h	7.64	281.25	120.6	813.0	0.40	0.30	0.30	0.75	0.60	0.65	0.28	0.42	0.30
V <sub>3</sub> V <sub>6</sub>	8.02	220.17	92.3	840.0	0.25	0.50	0.25	0.60	0.60	0.55	0.52	0.24	0.24
V <sub>3</sub> V <sub>7</sub>	7.70	225.06	106.7	808.5	0.35	0.35	0.30	0.55	0.60	0.65	0.28	0.33	0.39
V <sub>4</sub> V <sub>5</sub>	7.82	134.63	79.5	813.0	0.35	0.25	0.40	0.65	0.70	0.75	0.34	0.24	0.42
V <sub>4</sub> d	6.54	194.45	94.5	755.5	0.50	0.30	0.20	0.80	0.65	0.50	0.48	0.17	0.25
V <sub>6</sub> g	7.77	76.03	65.3	816.5	0.45	0.25	0.30	0.75	0.70	0.65	0.33	0.34	0.33
V <sub>7</sub> f	7.72	35.20	61.5	806.5	0.45	0.45	0.30	0.65	0.75	0.55	0.29	0.26	0.45

表 3 航段动态容量

Tab. 3 Dynamic capacity of legs

航段	cV <sub>1</sub>	bV <sub>2</sub>	aV <sub>3</sub>	V <sub>1</sub> e	V <sub>2</sub> V <sub>5</sub>	de	V <sub>3</sub> h	V <sub>3</sub> V <sub>6</sub>	V <sub>3</sub> V <sub>7</sub>	V <sub>4</sub> V <sub>5</sub>	V <sub>4</sub> d	V <sub>6</sub> g	V <sub>7</sub> f
容量	103.1	114.4	127.6	172.1	123.4	123.7	143.2	122.6	125.7	117.7	143.2	105.4	95.4

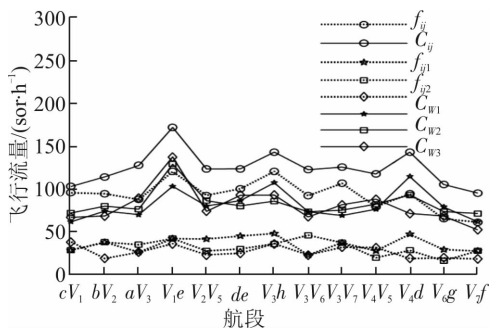


图 4 容流对比图

Fig. 4 Collation map of capacity and flow

由图可知,各航段流量及各高度层流量均在许可范围内,满足航段流量限制条件。同时,航路网络平衡指一定时间范围内的动态平衡,即各机场航空器不会无故增加或减少<sup>[15]</sup>,结合统计区间可知该区域航路网络符合网络平衡条件。根据表 3 分析网络中的割集和容量特征情况,可得表 4。

利用 Ford-Fulkerson 算法分析上述航路网络,得到限制其容量的关键路径集为 {cV<sub>1</sub>, aV<sub>3</sub>, de}, 容量为 354.4 sor/h。由表 4 可知 {V<sub>4</sub>d, V<sub>1</sub>e, de, V<sub>3</sub>h, V<sub>3</sub>V<sub>6</sub>, V<sub>3</sub>, V<sub>7</sub>} 的负荷情况同样较重,在容量拓展时

应优先考虑这些航段。

表 4 容量特征分析表

Tab. 4 Analysis table of capacity characteristic

割集	$\sum f_{ij}$ /( $\text{sor} \cdot \text{h}^{-1}$ )	$\sum C_{ij}$ /( $\text{sor} \cdot \text{h}^{-1}$ )	$f_{ij}/C_{ij}$
$cV_1, aV_3, de$	283.9	354.4	0.80
$V_1e, aV_3, de$	308.6	423.4	0.73
$V_4d, V_1e, de, V_3h, V_6g, V_7f$	562.7	783.0	0.72
$V_4d, V_1e, de, V_3h, V_3V_6, V_3V_7$	634.9	830.5	0.76

## 4 结语

本文针对现有容量评估模型方法单一、主观性强的不足,结合有向图理论提出了区域航路网络动态容量评估模型,并以某飞行情报区为例验证了该模型的有效性。与传统模型相比,该模型引入航路阻抗公式,将管制员因素融入客观容量评估中,建立了动态容量评估方法。今后,会就提升其对大规模复杂航路网络的适用性作进一步研究。

## 参考文献(References):

- [1] CAI K Q, ZHANG J, DU W B, et al. Analysis of the Chinese Air Route Network as a Complex Network [J]. Chinese Physics B, 2012, 21(2): 596-602.
- [2] 张明月. 区域导航环境下空域容量评估技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.  
ZHANG M Y. Research on Capacity Evaluation in RNAV Operations[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [3] 孟祥伟, 韩宝华, 王宏远, 等. 近距平行跑道最大容量模型[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(4): 7-12.  
MENG X W, HAN B H, WANG H Y, et al. Research on Ultimate Capacity of Two Close-Spaced Parallel Runways [J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2016, 17(4): 7-12. (in Chinese)
- [4] 徐蕾. 扇区容量评估技术的进一步研究[D]南京:南京航空航天大学, 2012.  
XU L. Further Research on Evaluation of Sector Capacity Technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [5] 许扬. 航路容量评估技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.  
XU Y. Research on Air Route Capacity Assessment Technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aero-

- nautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [6] KLEIN A, RODGERS M, LEIDEN K. Simplified Dynamic Density: A Metric for Dynamic Airspace Configuration and NextGen Analysis [C]//Digital Avionics Systems Conference, 2009.
- [7] JPB C, SOLAK S, REN L, et al. Determining Stochastic Airspace Capacity for Air Traffic Flow Management [J]. Transportation Science, 2013, 47(4): 542-559.
- [8] 李印凤. 复杂机场终端区空域资源配置关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.  
LI Y F. Research on Key Techniques of Complex Airport Terminal Airspace Resources Allocation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [9] 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 S S, HUANG W, LU Z B. Deduction of Link Performance and Its Regression Analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(4): 107-110. (in Chinese)
- [10] LERDAN O, SALLAN J, SIMO P. Study of the Topology and Robustness of Airline Route Networks from the Complex Network Approach: A Survey and Research Agenda [J]. Journal of Transport Geography, 2014, 37: 112-120.
- [11] ZHOU C, ZHANG X J, CAI K Q, et al. Comprehensive Learning Multi-Objective Particle Swarm Optimizer for Crossing Waypoints Location in Air Route Network [J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(3): 533-538.
- [12] 中国民航总局. 中国民用航空空中交通管理规则[Z]. 北京:中国民航总局, 1999.  
Civil Aviation Administration of China. Air Traffic Management Rules of Civil Aviation in China [Z]. Beijing: CAAC, 1999. (in Chinese)
- [13] 严子恒. 最小割最大流算法的研究与应用[D]. 南京:南京邮电大学, 2016.  
YAN Z H. Research and Application for the Problem of Minimum Cut/Maximum Flow Algorithms [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)
- [14] LAUBE U, NEBEL M. Maximum Likelihood Analysis of the Ford-Fulkerson Method on Special Graphs [J]. Algorithmica, 2016, 74(4): 1224-1266.
- [15] HUBER H. Network Structure, Capacity Growth and Route Hierarchies: The Case of China's Air Traffic System Revisited [J]. International Journal of Management and Network Economics, 2015, 3(1): 39-56.

(编辑: 徐敏)