

# 中国民用航空网络的中心化及节点攻击比较

崔博

(南京航空航天大学经济管理学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 以中国民用航空(CAN)网络为研究对象, 应用度、紧密度、点介数和流介数四个指标对CAN进行中心化处理, 判断最合适的处理方法并认定CAN网络的主要节点. 其中, 点介数指标对CAN网络的中心化处理效果最好, 中心化程度达到96.92%. 最后得出结论, 中国航空网络的前五中心节点按顺序分别是北京、上海、广州、乌鲁木齐、昆明. 进一步地, 采用节点攻击的方法进行了验证.

**关键词:** 社会网络; 中国航空网络(CAN); 中心化; 介数

中图分类号:N94 文献标识码:A 文章编号: 1000-5781(2013)01-0001-07

## Centrality of China aviation network and node attack comparison

Cui Bo

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** This paper chooses China aviation network(CAN) as its research objective, applying respectively the four indexes of centrality degree, closeness, betweenness and flow betweenness to the centrality of CAN, thereafter determining the most appropriate treatment and thus identifying the primary nodes of CAN. It has been found that among the four kinds of treatment results, betweenness, up to 96.92% in centrality, is the best index for the centrality of CAN. The finding leads to a conclusion that the top five central nodes of CAN are Beijing, Shanghai, Guangzhou, Urumqi and Kunming in order, which has been further verified by the node attack method.

**Key words:** social network; China aviation network; centrality; betweenness

## 1 引言

在采用网络研究方法对航空网络进行研究的过程中, 人们发现其具有“小世界网络”的相关统计特性<sup>[1-6]</sup>, 但相关研究多集中在航空网络结构的物理统计特征分析以及整体拓扑结构的演变上, 以社会网络方法分析航空网络的相关研究较少. 由于航空网络的节点之间具有明显的差别性, 有关节点间的深入比较分析以及对航空网络进行中心化研究就显得尤为必要. 网络中心化的概念最早可以追溯到19世纪应用统计学的思想<sup>[7]</sup>. 通常情况下, 不同类型的网络需要使用不同的中心化指标进行中心化<sup>[8]</sup>, 并通过参数的结合使用构成多重测试(multiple centrality)<sup>[9]</sup>研究方法. 国内也有学者运用其它的理论和方法研究CAN(China aviation network)的集中程度问题. 例如, 利用位序规模模型衡量航空运输集中度, 以此评价枢纽机场地位的强弱<sup>[10]</sup>; 或基于1995、2000和2003年的航空客运统计数据, 以优势流(dominant flow)方法为主, 辅以距离平

收稿日期: 2011-03-16; 修订日期: 2011-10-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71171111).

方和聚类法,分析中国主要城市在国内客运航空网络中的层级及其变化<sup>[11]</sup>;亦有利用航空流数据,用GIS方法研究中国航空网络机场体系的空间格局等<sup>[12]</sup>.然而,传统的研究方法不能对航空网络空间结构的复杂性特征进行深入识别,不能很好地反映机场间的连接特性、强弱程度等关系,而网络节点的中心化测试,正是判断节点在网络中的重要程度,调整航空布局,优化资源配置的重要手段,尤其对航空网络的安全具有重要意义.本文基于航空网络中节点的本质特征,运用社会网络研究方法,对2008年我国夏秋航班时刻形成的航空网络样本进行实证分析,研究比较了我国航空网络中机场的中心化程度.

## 2 实证数据收集与处理

航空网络依托于机场节点,以节点间的航线构成关联.本文以我国境内定期航班通航城市156个(不含香港、澳门和台湾)作为节点,以2008年夏秋航季客运1 825条往返航线(包含中转航线)为边,即图 $G = (V, E)$ ,节点数 $N = |V| = 156$ ,边数 $M = |E| = 1 825$ .

说明:

- 1) 由于所选取的航线均为往返航线,在后期运算过程中,不考虑航线的方向问题;
- 2) 有些城市虽然拥有两个或两个以上的机场,仍作为一个单位进行数据统计.

对所有节点按照2008年总吞吐量数值(旅客吞吐量与货邮吞吐量换算结果之和)进行编号,以 $i$ 表示. $k_i$ 表示节点的度,其排名以 $R_k$ 表示.其中前20节点的度值如表1所示.在现有数据中CAN网络存在10个孤立节点,节点的平均度是14.6,说明平均每个节点与其它近15个节点存在直接联系.全部节点中有48个节点的度超过均值,占总数的30.77%.

表1 度值较大的前20节点

Table 1 The top 20 nodes with greater degree															
编号	节点	$k_i$	$R_k$	编号	节点	$k_i$	$R_k$	编号	节点	$k_i$	$R_k$	编号	节点	$k_i$	$R_k$
1	北京	101	1	6	昆明	55	7	11	武汉	44	15	16	青岛	43	18
2	上海	82	2	7	杭州	52	9	12	南京	51	10	17	沈阳	47	13
3	广州	82	2	8	西安	56	6	13	长沙	49	11	18	三亚	29	34
4	深圳	69	4	9	重庆	55	7	14	海口	32	25	19	郑州	47	13
5	成都	59	5	10	厦门	48	12	15	大连	44	15	20	乌鲁木齐	33	23

航空网络中传递的“信息”主要是人和货物.考虑“信息”流动过程,并分析其传递特点,可以得出,适合对航空网络进行中心化处理的指标主要有度、紧密度、点介数和流介数指标四种<sup>[13]</sup>.根据相关定义<sup>[14-18]</sup>,对CAN进行中心化处理.主要考虑各指标中数值较大的节点,以不同颜色和形状区分中心节点和周围点,由此绘制的航空网络节点连接示意图如图1所示.

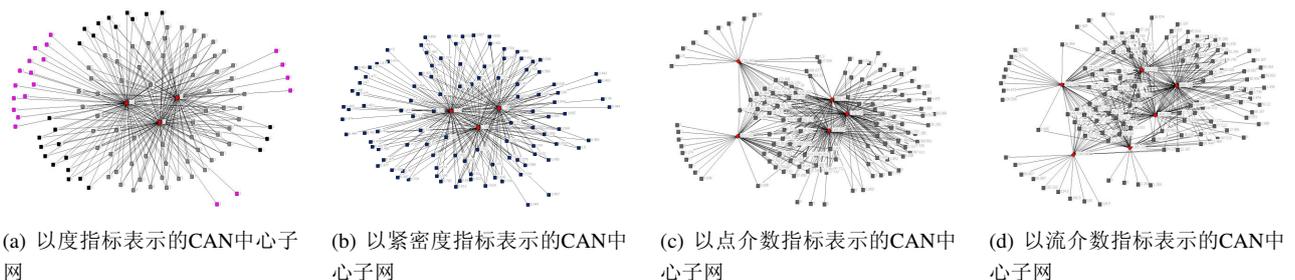


图1 CAN中心子网

Fig. 1 CAN center subnets

通过计算CAN网络节点的度值,发现北京、上海、广州三个节点的度排名较高,与其它节点差距较大.

同样发现, 这三个节点的紧密度排名虽然仍较高, 但与其它节点差距有所缩小. 对比度与紧密度指标的相关数据, 发现其它非中心节点位置的重要性可以由紧密度信息凸显出差别.

计算所有节点的点介数值. CAN网络中节点的介数值较高的有五个, 按照排名依次为北京、乌鲁木齐、广州、上海、昆明. 这五个节点的介数值与其它节点差距很大. 节点1(北京)的介数值最高; 节点20(乌鲁木齐)次之, 节点6(昆明)位居第五位, 但前两项统计指标并未有效将这两节点在网络中的重要性显现出来. 节点2(上海)与节点3(广州)的度与紧密度数值均相等, 在图1(a)、(b)两图中无法进行有效比较, 但节点3的点介数值高于节点2.

流介数指标使得节点的排名发生了明显变化. 较之前的分析, 节点1的位置首次发生了改变; 节点20成为流介数值最高的节点. 值得一提的是, 通过四种指标的处理, 可以发现, 度和紧密度指标的前五节点一致, 点介数指标和流介数指标的前五节点一致. 按照四种网络中心化处理的方法, 得到各节点的指标数据如表2所示. 航空网络节点排序按照指标不同而有所差异, 故需要进一步判断指标的中心化程度以选择最合适的中心化指标, 并进一步判别节点的重要程度.

表 2 CAN网络部分节点的中心化指标

Table 2 The centering indicator value of part of nodes in CAN

编号	城市	度	编号	城市	紧密度	编号	城市	点介数	编号	城市	流介数
1	北京	0.652	1	北京	0.824	1	北京	4 361.71	20	乌鲁木齐	2 294.05
2	上海	0.529	2	上海	0.749	20	乌鲁木齐	2 781.48	1	北京	1 948.20
3	广州	0.529	3	广州	0.749	3	广州	2 145.69	6	昆明	1 851.81
4	深圳	0.445	4	深圳	0.705	2	上海	2 135.80	2	上海	1 454.24
5	成都	0.381	5	成都	0.674	6	昆明	2 037.42	3	广州	1 391.89
8	西安	0.361	8	西安	0.665	8	西安	1 479.50	8	西安	1 265.23
6	昆明	0.355	9	重庆	0.660	5	成都	1 220.12	5	成都	980.313
	.....			.....			.....			.....	
	.....		6	昆明	0.628		.....			.....	
	.....			.....			.....			.....	
20	乌鲁木齐	0.213	20	乌鲁木齐	0.585	23	天津	172.889	12	南京	142.538

### 3 不同指标下的中心化程度比较

衡量网络中心化程度的高低要依据网络中心化的相关指标. 假定在具有  $n$  个节点的网络  $C_A$  中已经定义了中心化指标, 网络的中心化程度定义如下<sup>[19]</sup>

$$C_A^g = \frac{\sum_{x \in W} (C_A^* - C_A(x))}{(n-1) \max_{x \in W} (C_A^* - C_A(x))}$$

其中  $W$  表示整个网络,  $C_A^* = \max_{x \in W} C_A(x)$  表示所定义的中心度最大节点的中心度值.

可知若各节点的中心度都相同, 即网络没有中心, 则  $C_A^* = 0$ . 若网络中只有一个节点的中心度为 1, 其余节点的中心度为 0, 可得  $C_A^g$  越大, 少数中心节点越突出, 说明网络节点的中心化差异越大, 少数节点的中心化指标高, 因而计算出的中心节点准确率就很高, 中心化程度越高.

将度、紧密度、点介数、流介数四个指标分别带入上式, 得到不同的网络中心化程度

$$C_D^g = \frac{\sum_{x \in W} [n-1 - C_D(x)]}{(n-1)(n-2)}$$

$$C_C^g = \frac{\sum_{x \in W} [n - 1 - C_C(x)]}{(n - 1)(n - 2)/(2n - 3)},$$

$$C_B^g = \frac{\sum_{x \in W} [(n - 1)(n - 2) - 2C_B(x)]}{(n - 1)^2(n - 2)},$$

$$C_{FB}^g = \frac{\sum_{x \in W} [n(n - 1) - 4C_{FB}(x)]}{n(n - 1)^2}.$$

其中,  $C_D(x)$ 、 $C_C(x)$ 、 $C_B(x)$ 、 $C_{FB}(x)$ 分别表示的是网络节点的度、紧密度、点介数和流介数指标值. 相对来说, 度指标更适合衡量局部网络中节点的影响力, 而在全局范围内, 又需要引用紧密度指标, 但这两种指标只适用于静态网络分析. 介数指标更适合进行动态网络的分析<sup>[16]</sup>. 应用上述公式, 分别采用度指标、紧密度指标以及介数指标对CAN网络进行中心化处理后, 得到的CAN网络在不同指标下的中心化程度如表3所示.

表3 不同指标下的CAN网络中心化程度

Table 3 The centrality degree under the different indicators of CAN

指标	度指标 $C_D$	紧密度指标 $C_C$	点介数指标 $C_B$	流介数指标 $C_{FB}$
中心化程度	86.13%	43.61%	96.92%	94.30%

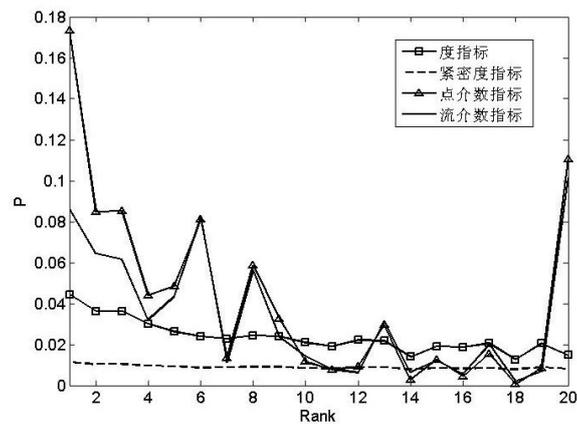


图2 前20节点四指标中心化数据的累积分布

Fig. 2 The cumulative distribution of centralized data under four indicators of the top 20 nodes

显然, 选择不同的中心化指标进行网络处理, 所获得的中心化程度不同. 对于CAN网络, 紧密度指标的中心化程度较低, 说明紧密度指标不适合CAN网络的中心化处理. 同时, 选择CAN网络中排名前20的节点, 分别衡量各节点的指标数值分布情况, 如图2所示. 可以发现, 度指标和紧密度指标对节点的区分度不大, 而点介数指标的分布差异较明显. 相对而言, 通过计算各指标的中心化程度, 并对比前20节点的中心化数据的累积分布, 可得, 对于CAN网络进行中心化处理更适合以点介数指标作为标准.

#### 4 结果的进一步验证

网络的有效性主要体现在节点及边的有效连接上, 网络攻击是造成节点或边失效的主要手段. 为了进一步研究对CAN网络进行中心化处理的指标选择, 采用网络攻击的方法对结果进行验证. 曾有学者对网络节点攻击<sup>[20]</sup>与边攻击<sup>[21]</sup>两种策略进行过研究. 为了重点比较网络节点的差异性, 本文选择节点攻击策略,

包括一次性与循环攻击两种方法. 通过比较网络效率下降幅度, 找出最有效率的攻击方式. 而此种攻击方式下的中心化指标即为最适宜进行CAN网络中心化处理的指标, 按照该指标处理网络得到的主要节点也即为网络的中心化程度较高的节点.

一般来说, 为了保证网络的原始结构不出现较大变动, 同时又能够使得不同类型的攻击方案显现差别, 选择进行攻击的网络节点的数量多在网络全部节点数量的1%左右, 即 $N_{rm}/N = 0.01$  [20]. 但由于CAN网络的节点数量相对较少, 1%的节点选择不能体现出足够的攻击效果, 故选择进行攻击的节点的数量为10个,  $N_{rm}/N = 0.064$ .

根据四种指标和两种节点攻击方法, 生成八种中心化攻击方式.

1) ID、IC、IB、IFB攻击: 采用一次性移除的原则, 首先测试网络中所有节点的指标的中心化值, 然后一次性移去一定数量的同指标最初排序中值大的节点.

2) RD、RC、RB、RFB攻击: 采用循环移除的原则, 首先测试网络中所有节点的度的中心化值, 移去最大度值的节点, 此时拓扑结构已经变化, 然后重新测试, 移去此时指标最大的节点, 依次循环下去.

#### 4.1 基于ID、IC、IB、IFB方式的攻击

针对前文的中心化测试结果, 按照表2所示顺序, 移除相关节点. 攻击后的网络如图3(a、b、c)所示.

在进行基于ID的攻击后, 网络中的无效节点由最初的10个增加到27个, 出现了2条独立链状网络. 在进行基于IC的攻击后, 网络中无效节点的数量为23个, 没有出现独立的链式网络, 说明IC攻击方式能力较弱. 在进行基于IB的攻击后, 网络中的无效节点增加到28个, 网络规模明显缩减, 出现了4条独立链状网络. 可以看出, 基于IB的攻击较基于前两者的攻击更为有效, 按照一次移除的原则, 基于IB的攻击方式所移除的节点与基于IFB的攻击方式所移除的节点一致, 具有相同的移除效果.

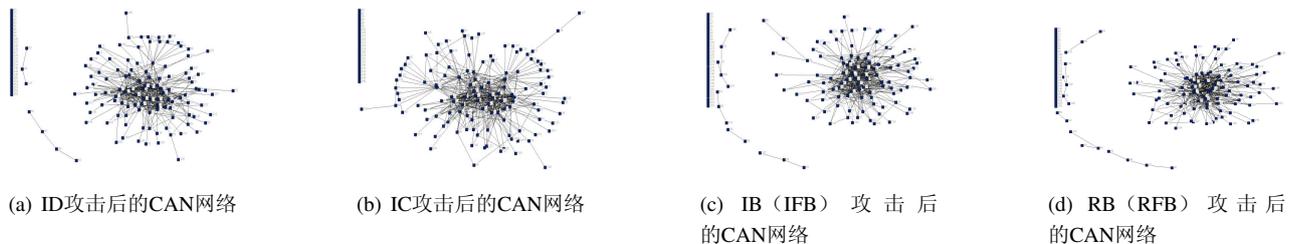


图 3 受攻击后的CAN网络

Fig. 3 CAN after be attacked

#### 4.2 基于RD、RC、RB、RFB方式的攻击

进一步地, 采取基于RD、RC、RB的攻击策略, 进行网络节点的循环移除. 根据循环攻击的原则, 采取循环移除中心化节点的方法依次循环移除网络中十个指标值最大的节点, 其移除顺序如表4所示.

可以发现, RD攻击效果与ID攻击效果相同, RC的攻击效果与IC攻击效果相同. RD与RC方式攻击后的网络与图3 (a)、(b)一致. RB攻击方式与RFB攻击方式下移除的前十位节点一致, 只是移除的顺序不同, 故攻击后的网络形态也一致. 在进行基于RB的攻击后, 网络中的无效节点亦增加到28个, 出现了5条独立链状网络. 值得注意的是, 在采用RB(RFB)策略循环攻击的过程中, 由于网络结构的变化, 使得网络节点的介数值也发生了明显变化, 甚至出现下一轮移除的节点的介数测试值高于上一轮的结果, 移除的节点及移除的顺序不再简单等同于网络初始结构的介数排列.

## 5 结束语

根据效率测试, 通过采用一次性攻击与循环攻击两种方式攻击CAN网络不同指标下排名前十的主要节点, 获得如表5所示的攻击效果对比.

表4 四指标下的循环中心化测试值

Table 4 Circulation centering test value under four indicators

RD测试			RC测试			RB测试			RFB测试		
循环	移除节点	测试值	循环	移除节点	测试值	循环	移除节点	测试值	循环	移除节点	测试值
1	北京	0.652	1	北京	0.824	1	北京	4361.709	1	乌鲁木齐	2294.046
2	广州	0.536	2	上海	0.748	2	上海	3202.026	2	北京	3145.932
2	上海	0.536	2	广州	0.748	3	广州	3584.988	3	上海	1787.27
4	深圳	0.447	4	深圳	0.7	4	乌鲁木齐	2896.946	4	广州	1814.757
5	成都	0.391	5	成都	0.668	5	昆明	2159.406	5	昆明	1772.308
6	西安	0.367	6	西安	0.658	6	深圳	2171.842	6	西安	1400.416
7	昆明	0.365	7	重庆	0.651	7	西安	2206.013	7	成都	1423.869
7	重庆	0.365	8	杭州	0.641	8	成都	2088.371	8	重庆	1612.1
9	杭州	0.347	8	南京	0.641	9	重庆	2431.215	9	深圳	1222.019
10	南京	0.342	10	长沙	0.629	10	南京	1501.363	10	南京	1006.959

表5 不同指标下的CAN网络中心化程度

Table 5 The centrality degree under different indicators of CAN

	攻击方式	攻击后边数	下降比例	攻击后的效率	下降比例
攻击前的网络边数1825	ID、RD攻击	506	0.723	0.2616	0.4068
	IC、RC攻击	524	71.30%	0.3042	31.03%
攻击前的网络效率0.441	IB、IFB攻击	552	70.00%	0.23	47.86%
	RB、RFB攻击	534	70.80%	0.2262	48.71%

根据表5的攻击效果不难看出,针对CAN网络,尽管介数指标在控制网络的连接边数上并不具最明显的影响力,但是在降低网络效率方面,以介数指标为依据的攻击方式比以度和紧密度指标为依据的攻击方式更加有效.采用RB攻击方式,网络效率下降近一半.如果航空网络中节点出现瘫痪,网络的破坏速度就会大大加快.由表5可知,以上攻击策略的排序为:RB(RFB)>IB(IFB)>RD(ID)>RC(IC).

对于航空网络的节点攻击,在现实中可能是由于自然灾害或其它原因造成,了解不同攻击方式下网络效率的下降程度对于预防突发事件,保障航空网络的正常运行具有重大意义.结合前面的研究结果,可以得出,在以上四个指标的比较中,介数指标尤其是点介数指标是衡量CAN中节点的中心化程度较为合适的指标.而从网络效率的角度分析,根据介数指标的一次计算结果(北京、乌鲁木齐、广州、上海、昆明)进行的一次性攻击(IB)对网络效率的影响不如循环攻击(RB)结果.综上所述,CAN网络的中心节点应是按照介数指标计算结果得出的五个节点:北京、乌鲁木齐、广州、上海、昆明,但其中心性排位应按照循环攻击方法下依次出现的顺序作为最终结果,即北京、上海、广州、乌鲁木齐、昆明.这一结论与我国航空网络的实际情况相符.另一方面,北京、上海、广州均已是国内主要航空公司基地,航线密集.乌鲁木齐和昆明的重要性主要凸显于二者所在的地区,其局部航空网络发展尚有待进一步完善,而这样的发展方向也符合国家对支线航空网络建设发展的规划.随着相关支线航空网络的发展,乌鲁木齐和昆明也将在整个航空网络中能起到更加重要的作用.

#### 参考文献:

- [1] Guimera R, Amaral L A N. Modeling the world-wide airport network[J]. The European Physical Journal B, 2004, 38(2): 381-385.
- [2] Guimera R, Mossa S, Turtchi A, et al. The worldwide air transportation network: Anomalous centrality, community structure, and cities' global roles[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(22): 7794-7799.
- [3] Barrat A, Barthélemy M, Pastor-Satorras R, et al. The architecture of complex weighted networks[J]. Proceedings of the National

- Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(11): 3747–3752.
- [4] Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A. The effects of spatial constraints on the evolution of weighted complex networks[J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2005, 2005(5): 05003.
- [5] Colizza V, Barrat A, Barthélemy M, et al. The role of the airline transportation network in the prediction and predictability of global epidemics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(7): 2015–2020.
- [6] Li W, Cai X. Statistical analysis of airport network of China[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(4): 6106–6112.
- [7] Jordan C. Sur les assemblages des lignes[J]. *Journal Für Die Reine Und Angewandte Mathematik*, 2009, 1869(70): 185–190.
- [8] Gaertler M, Wagner D. Algorithms for representing network centrality, groups and density and clustered graph representation [J]. *Coevolution and Self-Organization in Dynamical Networks*, 2001, 3(1): 1–7.
- [9] Porta S, Crucitti P, Latora V. The network analysis of urban streets: A dual approach [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2006, 369(2): 853–866.
- [10] 王法辉, 金凤君, 曾 光. 中国航空客运网络的空间演化模式研究[J]. *地理科学*, 2003, 23(5): 519–525.  
Wang Fahui, Jin Fengjun, Zeng Guang. Geographic patterns of air passenger transport in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23 (5): 519–525. (in Chinese)
- [11] 宋 伟, 李秀伟, 修春亮. 基于航空客流的中国城市层级结构分析[J]. *地理研究*, 2008, 27(4): 917–926.  
Song Wei, Li Xiuwei, Xiu Chunliang. Patterns of spatial interaction and hierarchical structure of Chinese cities based on intercity air passenger flows[J]. *Geographical Research*, 2008, 27(4): 917–926. (in Chinese)
- [12] 王姣娥, 金凤君, 孙 炜等. 中国机场体系的空间格局及其服务水平[J]. *地理学报*, 2006, 61(8): 829–838.  
Wang Jiao'e, Jin Fengjun, Sun Wei, et al., Research on spatial distribution and service level of Chinese airport system[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(8): 829–838. (in Chinese)
- [13] Costenbader E, Valente T W. The stability of centrality measures when networks are sampled[J]. *Social Network*, 2003, 25(4):238–307.
- [14] Wasserman S, Faust K. *Social Network Analysis: Methods and Applications*[M]. New York: Cambridge University Press, 1994: 65–94.
- [15] Friedkin N E. Theoretical foundations for centrality measures[J]. *American Journal of Sociology*, 1991, 96(6): 1478–1504.
- [16] Freeman L C. A set of measures of centrality based upon betweenness[J]. *Sociometry*, 1977, 40(1): 35–41.
- [17] Newman M E J. A measure of betweenness centrality based on random walks[J]. *Social Networks*, 2005, 27(1): 39–54.
- [18] Freeman L C, Borgatti S P, White D R. Centrality in valued graphs: A measure of betweenness based on network flow[J]. *Networks*, 1991, 13(2): 141–154.
- [19] Freeman L C. Centrality in social networks[J]. *Social Networks*, 1979, 1(1): 215–239.
- [20] Holme P, Kim B J, Yoon C N, et al. Attack vulnerability of complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 65(2): 21–34.
- [21] 王建伟, 荣莉莉. 面向相继故障的复杂网络上边袭击策略研究[J]. *系统工程学报*, 2011, 26(1): 1–8.  
Wang Jianwei, Rong Lili. Study of cascading failure-oriented attack on the edges of complex networks[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2011, 26(1): 1–8. (in Chinese)

### 作者简介:

崔 博 (1980—), 女, 辽宁铁岭人, 博士, 讲师, 研究方向: 航空网络, E-mail: qingshuicb@nuaa.edu.cn.