

doi: 103969/j. issn. 0490-6756. 2016. 01. 013

中国空域国内航班飞行拓扑分析

吴珂, 王俊峰, 罗琴

(四川大学计算机学院, 成都 610065)

摘要: 基于中国空域航班飞行拓扑研究航空自组网将有利于满足未来航班对空中管制、信息共享等方面的需求, 但现有研究未根据中国空域的具体情况对航班飞行拓扑进行分析. 本文通过搜集真实的中国空域国内航班数据, 把中国空域划分为东西部以及飞行情报区, 同时借助NS2仿真, 直观地分析比较中国空域一天以及每小时航班飞行拓扑. 结果表明中国空域国内航班分布有很大差异, 而航班数量与人口和第三产业呈现较高的线性相关性.

关键词: 中国空域; 国内航班; 飞行情报区; 拓扑分析

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2016)01-0073-06

Topology analysis of Chinese airspace domestic flights

WU Ke, WANG Jun-Feng, LUO Qin

(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The research of ad-hoc network based on Chinese airspace flight topology will help to meet the needs of future flights on aspects of air traffic control and information sharing, but the existing studies have not analysis the flight topology according to the specific condition of Chinese airspace. In this paper, the Chinese airspace region is classified as east, west, and flight information region. Combining with the NS2 simulation, the Chinese airspace flight topology is analyzed and compared between days and hours. The results show that the distributions of Chinese domestic flights are diverse from each other in the Chinese airspace. However, the number of the flights shows a relative high linear correlation with the population and the development of the Third Industry.

Key words: Chinese airspace; Domestic flights; Flight information region; Topology analysis

1 引言

航空运输业作为20世纪的新兴行业和交通运输基础产业,其发展和在技术与服务方面所取得的成就使其成为当今最成功的行业之一^[1].我国目前已成为世界第三航空大国^[2,3],航空运输在社会经济发展中占据着重要地位.与此同时,飞机的通信需求也与日俱增,但现阶段的航空通信保障能力不

能满足未来航班对空中管制、信息共享等方面的需求^[4].这使得直接使用机载通信设备在飞机之间进行通信的分布式自组织多跳网络——航空自组网应运而生.航空自组网凭借其在航空领域的优势,吸引了国内外许多研究者以及研究单位对其进行研究,如国内的空军工程大学就对航空自组网的特点以及研究现状进行了详细分析^[5].

而民用航空的运行是沿航线和指定的飞行区

收稿日期: 2015-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(91338107, 91438119); 教育部博士点基金(20130181110095); 江苏省未来网络创新研究院未来网络前瞻性研究项目(BY2013095-3-08)

作者简介: 吴珂(1992—),女,硕士生,研究方向为网络与信息安全. E-mail:wuke_1992@126.com

通讯作者: 王俊峰. E-mail:wangjf@scu.edu.cn

域进行的,航空自组网也主要是以此为基础的.所以研究中国空域航空自组网,就必须基于中国空域航班飞行拓扑. SAKHAEI 等人对美国国土上空的飞机密度值进行了计算,并分析了航空自组网的组网概率^[6];MEDINA 等人以欧洲空域为例,利用实际航班数据研究了高密度空域中航空自组网的网络连通性以及其拓扑特征^[7];石丛军、郑博等人也对中国空域的航班密度进行了分析^[8,9]. 上述研究具有较强的代表性,但是其研究的空域数据有限,也未考虑整个中国空域的具体情况并进行仿真实验,同时也没有对飞行拓扑的外在影响因素进行更深入地分析.

根据我国目前的民航发展来看,机场、航路分布不均,机场大都集中在中国东部大、中城市附近,特别是北上广地区为空中交通最繁忙的航空交通地区^[10]. 所以需要考虑到中国空域的具体情况,对航班飞行拓扑进行更准确的分析. 本文正是根据中国空域的真实国内航班数据,分析国内航班飞行拓扑,具体包括按照东西部和飞行情报区划分中国空域,分析国内航班数量分布,以及分析影响飞行情报区国内航班情况的外在因素. 同时借助 NS2 仿真,模拟 24 小时中国空域国内航班飞行拓扑并对其进行飞机数量和密度的分析.

2 中国空域国内航班数据搜集及预处理

由于中国空域内的国际航班数据不完整,不能准确地进行航班飞行拓扑分析,所以本文主要针对国内航班进行飞行拓扑分析. 首先从民航资源网(<http://news.carnoc.com/data/> 访问时间:2014 年 1 月)等网站上,查询到所公布的全国机场客流量信息,对此数据进行统计,得到 2011 年~2013 年全国机场客流量排名. 在中国民航资源网以及相关网站中,重点统计与分析全国机场客流量统计排名前 24 名机场的信息,其他机场由于客流量较小,互联网上没有给出完整的信息,忽略这些机场也不会对整个中国空域国内航班飞行拓扑分析造成本质影响.

搜集 24 个机场的具体国内航班情况(http://jipiao.oklx.com/cn_airfield_schedule.aspx 访问时间:2014 年 1 月). 最终搜集到的航班为各机场 2011 年的计划航班,将其作为数据依据. 同时通过 AIRCN 全球航路查询系统(<http://rte.aircn.org/>

[routefinder/index.php](http://rte.aircn.org/routefinder/index.php) 访问时间:2014 年 4 月)统计各航班具体的航线数据. AIRCN 全球航路查询系统是 AIRCN 模拟飞行网开发的主要用于查询不同机场之间的具体航路信息的网站, AIRCN 模拟飞行网成立于 2006 年,目前是国内最具规模的模拟飞行组织. AIRCN 全球航路查询系统中所有航路均由算法生成,算法所用数据库是根据真实数据而来的,真实性强. 由于整理的航班为 2011 年的计划航班,有的航班航线目前已经取消,在 AIRCN 全球航路查询系统中无法查找,本文则忽略这样的航线,同时忽略这些航线对应的航班. 航班航线的变更属于频繁而正常现象,并且取消的航班在所有国内航班中所占比例很小,忽略这些航班对之后的分析结果产生的影响可以不计.

通过 AIRCN 全球航路查询系统查询每条航线的具体飞行航路,找出整条航线所要经历的中间点,用于之后的 NS2 仿真. 由于有的航线间的中间点过于密集,如每两个导航点之间的经纬度差都不超过 1° ,则省去这样的中间点. 本文选取经度或纬度之差大于 3° 的中间点作为仿真时使用的航路数据.

最后,按照中国飞行情报区划分 24 个机场,同时从国家数据网(<http://data.stats.gov.cn/index> 访问时间:2014 年 7 月)上搜集各个飞行情报区人口、面积、地区生产总值以及第三产值的有关数据,如表 1,用于分析影响飞行情报区国内航班情况的外在因素. 飞行情报区是由国际民航组织(ICAO)所划定,区分各个国家或地区在该区的航管及航空情报服务的责任区. 如上海飞行情报区包括安徽、福建、河南商丘、江苏、江西、上海、浙江以及山东大部分地区. 表 1 中航班数量、人口、面积、地区生产总值、第三产值分别表示整个飞行情报区范围内的人口、面积、地区生产总值和第三产值.

3 中国空域国内航班飞行拓扑分析

3.1 东西部国内航班情况

在中国,东部地区机场多,航线密集,西部地区机场少,航线稀疏,中国空域内的国内航班东西部分布十分不均匀. 所以考虑中国空域的具体情况,先对中国空域进行东西部划分,统计分析东西部的来往国内航班数量,以此说明中国空域东西部国内航班情况.

表 1 中国空域飞行情报区有关数据

Tab. 1 Relevant data in flight information region in Chinese airspace

飞行情报区	航班数量(架)	人口(万人)	面积(万平方公里)	地区生产总值(亿元)	第三产值(亿元)
上海飞行情报区	4887	39715.58	78.76	225643.78	98578.96
广州飞行情报区	3078	22054.00	62.83	101043.64	44745.45
北京飞行情报区	2924	16528.26	83.89	90249.60	43168.89
昆明飞行情报区	2824	19351.17	204.36	59101.28	23404.61
沈阳飞行情报区	1441	12461.85	128.95	60975.47	23145.47
兰州飞行情报区	1214	7615.06	172.15	27478.99	10026.33
武汉飞行情报区	757	2273.58	196.40	8389.14	3141.29
三亚飞行情报区	525	895.00	3.54	3146.46	1518.70
乌鲁木齐飞行情报区	480	2273.58	196.40	8389.14	3141.29

中国地理上,以黑河-腾冲线将中国分为东西部,因此,本文也将黑河-腾冲线作为中国空域东西部的分界线,在此基础上进行统计分析.计算出每个航班的起点机场和终点机场分别位于中国东部还是西部.具体计算方法如下.

$$K = \frac{50.22 - 25.01}{127.53 - 98.51} = 0.8687; \% \text{计算黑河-}$$

腾冲线的斜率 K ;

$B = -60.565637; \% \text{计算出黑河-腾冲线在 } y$
轴(纬度)上的截距 B ;

$$K(n) = \frac{a - B}{b}; \% \text{机场点 } n(a, b) \text{ 与截距 } B \text{ 的}$$

构成的直线斜率 $K(n)$;

If $K(n) > K$

则点 n 属于西部;

If $K(n) < K$

则点 n 属于东部.

根据计算结果分析,在中国空域国内航班中,东部到东部航班数量最多,为 7275 架,占航班总数的 69%,西部到西部航班数量最少,为 601 架,占航班总数的 6%,西部到东部和东部到西部航班数量分别为 1326 架和 1319 架,占航班总数的 13% 和 12%.具体如图 1 所示.

3.2 飞行情报区国内航班情况

根据实施空中交通业务的需要,我国将其所辖空域划成若干飞行情报区,每个飞行情报区之间的航班来往情况差异很大.所以以中国飞行情报区划分中国空域,统计分析各飞行情报区国内航班来往数量,更能说明中国空域国内航班飞行拓扑特征.

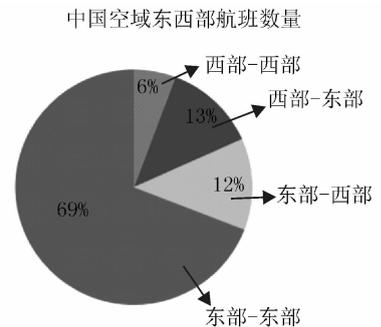


图 1 中国空域东西部航班数量统计饼状图

Fig. 1 East-west flights number in Chinese airspace

按照中国飞行情报区划分 24 个机场,得出所有国内航班的起始飞行情报区,统计出各飞行情报区之间的航班来往情况,如表 2 所示,其中中国香港和中国台湾两个飞行情报区由于航班资料不足,在有关分析中都不进行讨论.在搜集 24 个机场的具体国内航班情况时发现,中国香港和中国台湾两个飞行情报区与其他飞行情报区之间的航班来往很少,所以忽略这两个飞行情报区对整个中国空域国内航班情况的分析结果不会产生本质影响.

从表 2 可以看出,在中国飞行情报区中,上海飞行情报区内的国内航班数量达到 649 架,和其他飞行情报区内的国内航班往来总数量达到 2119 架,是所有飞行情报区中最多的,其次分别是昆明飞行情报区,广州飞行情报区和北京飞行情报区,其他飞行情报区的国内航班数量则相对较少,只有几百架.

表 2 中国空域飞行情报区国内航班来往情况表

Tab. 2 Domestic flights in flight information region in Chinese airspace

飞行情报区	1	2	3	4	5	6	7	8	9	总计(架)	
北京飞行情报区	1	188	230	200	124	24	498	180	40	71	1555
广州飞行情报区	2	230	180	308	77	85	576	84	14	76	1630
昆明飞行情报区	3	198	309	498	85	43	379	77	23	48	1660
兰州飞行情报区	4	123	79	84	174	13	154	29	21	18	695
三亚飞行情报区	5	23	81	43	13	0	70	11	3	16	260
上海飞行情报区	6	502	576	378	152	70	649	273	57	111	2768
沈阳飞行情报区	7	181	83	77	29	11	274	62	7	28	752
乌鲁木齐飞行情报区	8	40	14	24	21	3	57	7	137	6	309
武汉飞行情报区	9	72	76	50	18	16	111	28	6	6	383

3.3 飞行情报区国内航班数影响因素分析

由 3.2 可以看出,中国空域飞行情报区的国内航班来往相差很大,这主要是由航空网络节点的拓扑和几何性质以及社会属性和经济属性所引起的^[11].目前已有很多研究者针对航空网络节点的拓扑和几何性质进行了研究,而基本忽略了外在因素的影响.所以本文主要分析影响各飞行情报区间国内航班来往的外在因素.

外在影响因素中,人口、面积、经济为最直接的外在因素,其余还包括城市间的距离、人流量等,但飞行情报区间的城市距离和人流量不容易界定,影响不如人口、面积、经济因素直接^[11],数据搜集也有一定困难.因此本文只搜集了各个飞行情报区的人口、面积、地区生产总值以及第三产值的有关数据,通过分析数据之间的相关性,研究其对飞行情报区国内航班来往情况所产生的影响,具体数据已在表 1 进行了说明.

考察飞行情报区来往国内航班数量和人口、面积、地区生产总值以及第三产值之间的相关性,用相关系数进行分析.相关关系是一种非确定性的关系,相关系数是研究变量之间线性相关程度的量,用 r 表示,定义如下式.

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_n - \bar{x})^2 \sum (y_n - \bar{y})^2}}, \quad -1 \ll r_{xy} \ll 1 \quad (1)$$

其中 x_n 与 y_n 为变量 x 和 y 的样本, \bar{x} 和 \bar{y} 为变量 x 和 y 在给定样本下的均值. r 为正值时,两变量为正相关; r 为负值时,两变量为负相关;相关系数的绝对值 $|r|$ 越大,两变量间的相关程度越密切.计算飞行情报区来往国内航班数量和人口、面积、地区生产总值以及第三产值之间的相关系数来比较他们之间的相关性,同时也计算出假设检验的 p

值.结果如表 3 所示.

表 3 中国空域飞行情报区国内航班数量与外在影响因素相关性分析表

Tab. 3 Correlation analysis of the number of domestic flights in flight information region in Chinese airspace and externa influence

	航班-人口	航班-面积	航班-地区生产总值	航班-第三产值
相关系数	0.983876596	-0.2286037490	0.946195790	0.945878146
p 值	0.0000	0.5541	0.0001	0.0001

从表 3 可以看出,通过计算,飞行情报区国内航班数量和人口、地区生产总值和第三产值表现出较高的线性相关性,尤其是国内航班数量和人口的线性相关性最为明显.但由于地区生产总值受第三产值影响较大,所以上表所反映出的联系可能不够准确.要想更准确地反映出国内航班数量和地区生产总值之间的内在联系,还需要进行偏相关分析^[12].

偏相关分析是指,在诸多相关的变量中,剔除(控制)了其中的一个或者若干个变量的影响后,两变量之间的线性相关关系.剔除一个变量 z 的影响后,两个变量 x 和 y 之间的偏相关系数是:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} r_{yz}}{\sqrt{1 - r_{xz}^2} \sqrt{1 - r_{yz}^2}} \quad (2)$$

剔除第三产值的影响,计算飞行情报区国内航班数量和地区生成总值之间的偏相关系数和 p 值,结果为: $r = 0.1098$; $p = -0.7958$.说明在进行相关性分析时,飞行情报区国内航班数量和地区生产总值之间呈现出较高的线性相关性主要是受第三产值的影响.

经过对中国空域飞行情报区国内航班数量和人口、面积、经济等外在影响因素进行相关性分析和偏相关性分析,可以发现中国空域飞行情报区的国内航班数量与飞行情报区的人口和第三产值呈

现较高的线性相关性.

4 24 小时国内航班飞行拓扑分析

4.1 NS2 仿真

为了更好的分析中国空域国内航班飞行情况, 本文利用 NS2 对中国空域 24 小时国内航班飞行进行仿真, 得到飞行拓扑, 并对 24 小时中国空域以及东西部各自的国内航班飞机数量和密度进行统计, 分析 24 小时国内航班飞行拓扑.

利用整理好的 24 个机场国内航班数据以及具体航路数据, 在 NS2 中进行仿真. 设定仿真时间为 24 小时, 飞机的飞行高度为 9 km, 仿真一天内所有国内航班的飞行情况. 尽可能地使仿真环境和真实环境接近, 以便基于仿真结果的数据分析更可靠. 经过 NS2 仿真, 得到 24 小时中国空域国内航班飞机具体经纬度位置, 接下来基于仿真结果进行分析.

4.2 24 小时国内航班的飞机数量和密度分析

根据 NS2 仿真结果, 统计出 24 小时中国空域国内航班的飞机数量, 并根据中国空域面积计算出飞机密度. 绘制 24 小时中国空域国内航班飞机数量和密度折线图如图 2 和图 3 所示.

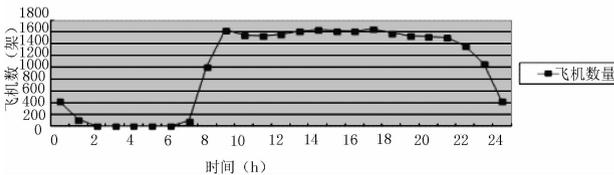


图 2 24 h 中国空域国内航班飞机数量折线图

Fig. 2 Domestic flights number in Chinese airspace within 24 hours

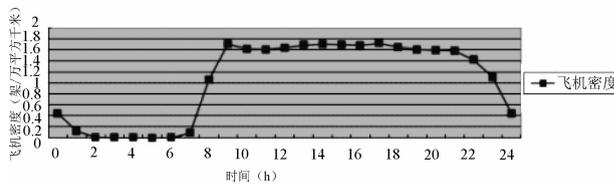


图 3 24 h 中国空域国内航班飞机密度折线图

Fig. 3 Domestic flights density in Chinese airspace within 24 hours

可以看出, 中国空域国内航班飞机数量在白天最多可达 1600 架左右, 密度可达每万平方千米 1.7 架, 夜晚最少的时候中国空域国内航班数量为 0, 白天和夜晚航班相差较明显.

4.3 24 小时东西部国内航班飞机数量和密度分析

通过 3.1 可知将中国空域进行东西部划分, 能更好地分析国内航班的飞行情况. 所以接下来将中

国空域划分为东西部, 进一步分析 24 小时东西部国内航班数量和密度.

同 3.1 一致, 以黑河-腾冲线作为中国空域东西部的分界线, 根据 NS2 仿真结果, 计算每架飞机在记录时刻位于中国空域的东部还是西部, 绘制每小时中国空域国内航班的飞行拓扑图, 同时分别统计 24 小时中国空域东西部国内航班飞机数量. 再根据西部空域的面积大约为中国空域的 57.1%, 东部空域的面积大约为中国空域的 42.9%, 计算飞机密度.

图 4 以 1 时, 8 时, 16 时为例, 展示中国空域国内航班的飞行拓扑情况, 其中分割线为黑河-腾冲线. 同时绘制出 24 小时东西部国内航班飞机数量和密度折线图如图 5 和图 6 所示.

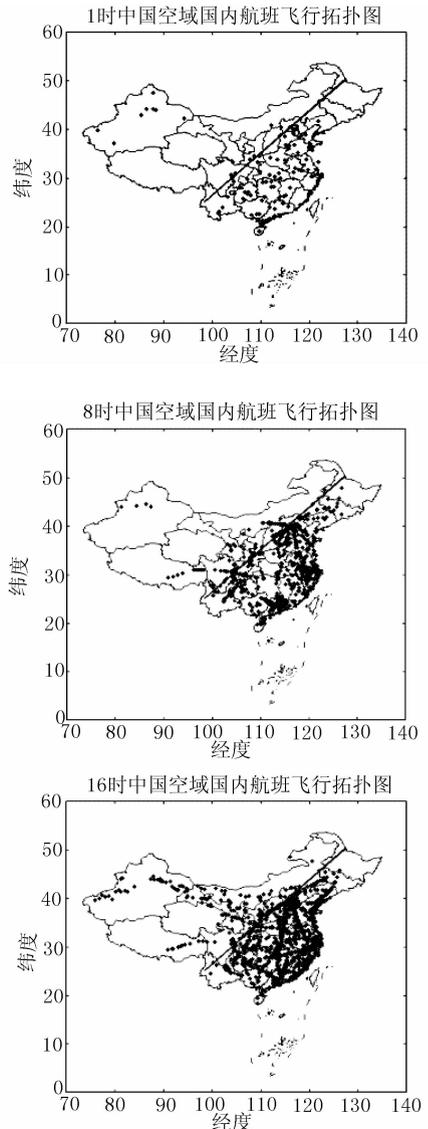


图 4 每天不同时刻中国空域国内航班的飞行拓扑图

Fig. 4 Domestic flights flying topology in Chinese airspace in a day

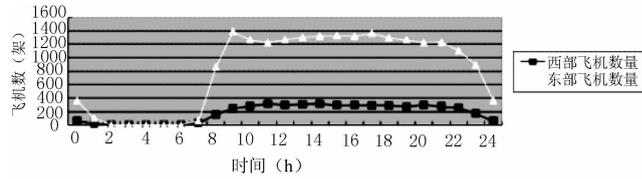


图 5 24h 中国空域东西部国内航班飞机数量折线图

Fig. 5 East-west domestic flights number in Chinese airspace within 24 hours

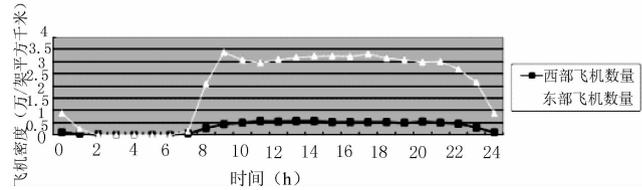


图 6 24h 中国空域东西部国内航班飞机密度折线图

Fig. 6 East-west domestic flights density in Chinese airspace within 24 hours

由图 4~图 6 可知,在中国空域内,东部空域飞机数量最多可达 1300 架左右,密度可达每万平方千米 3.3 架左右,而西部空域飞机数量最多也只有 300 架左右,密度为每万平方千米 0.5 架左右.东部空域飞机最多时能达到西部空域的 6 倍以上.同时,因为东西部夜晚都会出现没有飞机的情况,所以全天东部空域的国内航班数量变化比较剧烈,白天和夜晚相差很大,而西部空域的变化则相对较小.

5 结束语

本文利用真实的中国空域国内航班数据,对国内航班飞行拓扑进行具体分析.首先按照东西部划分中国空域,结果表明东部到东部国内航班数量最多,西部到西部国内航班数量最少,东西部差异很大.同时按照飞行情报区划分中国空域,得出上海飞行情报区内以及和其他飞行情报区间的国内航班来往总数是所有飞行情报区中最多的,其次分别是昆明飞行情报区,广州飞行情报区和北京飞行情报区,其他飞行情报区的来往国内航班数量则相对较少.通过对飞行情报区国内航班数量与人口、面积、经济等外在影响因素的相关性分析和偏相关性分析,发现飞行情报区的国内航班数量与人口和第三产业呈现较高的线性相关性,说明人口与第三产

值在一定程度上对飞行情报区的国内航班数量产生了很大影响.本文还通过 NS2 仿真,模拟 24 小时中国空域国内航班飞行拓扑并对其进行分析,发现全天中国空域的国内航班数量变化比较剧烈,尤其是东部空域的国内航班数量白天和夜晚相差很大,西部空域的 24 小时国内航班数量变化则相对较小.

中国空域国内航班飞行拓扑分析是研究航空自组网的基础,后续工作将主要集中在对航班飞行拓扑更深入的分析,包括分析飞行拓扑参数和更多外在影响因素等,以及对航空自组网的研究,如研究航空自组网的组网概率等.

参考文献:

- [1] 刘宏鲲,周涛.航空网络研究综述[J].自然科学进展,2008,18(6):601.
- [2] 黄海清,薛鹏.国家航空电信网的建设研究[J].计算机工程与设计,2008,29(6):1355.
- [3] 中国民用航空局.2012年民航行业发展统计公报[R].北京:中国民用航空局,2013.
- [4] 罗长远,宋玉龙.固定航线的航空自组网连通性研究[J].通信学报,2014,35(9):147.
- [5] 郑博,张衡阳.航空自组网的现状与发展[J].电信科学,2011,27(5):38.
- [6] Sakhaef E, Jamalipour A. The global in-flight internet[J]. IEEE J Sel Area Comm, 2006, 24(9): 1748.
- [7] Medina D, Hoffmann F, Ayaz S, et al. Topology characterization of high density airspace aeronautical Ad hoc networks [C] // Proceedings of 5th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008.
- [8] 石丛军,任清华.航空自组网节点密度与组网概率分析[J].通信技术,2008,41(5):69.
- [9] 郑博,黄国策.甚高频航空自组网的组网概率及连通性研究[J].西安交通大学学报,2011,45(8):24.
- [10] Granitsas A. Caught in a down draught [J]. FEER, 2002, 21(3): 276.
- [11] 刘宏鲲,张效莉.中国城市航空网络航线连接机制分析[J].中国科学,2009,39(7):935.
- [12] 马庆国.管理统计——数据获取、统计原理 SPSS 工具与应用研究 [M].北京:科学出版社,2002.