

基于复杂网络理论的多元混合空管技术保障系统网络特征分析

武喜萍 杨红雨 韩松臣

Analysis on network properties of multivariate mixed air traffic management technical support system based on complex network theory

Wu Xi-Ping Yang Hong-Yu Han Song-Chen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 140203 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.140203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.140203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I14>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

交织型层级复杂网

[Interlacing layered complex networks](#)

物理学报.2014, 63(19): 190201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.190201>

基于有限资源提升网络可生存性的拓扑重构方法

[A topological reconfiguration method for enhancing networks survivability with limited resources](#)

物理学报.2014, 63(17): 170201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.170201>

复杂网络系统拓扑连接优化控制方法

[Control method for complex network topological connection optimization](#)

物理学报.2013, 62(15): 150201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.150201>

基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法

[Key nodes in complex networks identified by multi-attribute decision-making method](#)

物理学报.2013, 62(2): 020204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.020204>

利用节点效率评估复杂网络功能鲁棒性

[Evaluating complex network functional robustness by node efficiency](#)

物理学报.2012, 61(19): 190201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.190201>

# 基于复杂网络理论的多元混合空管技术保障系统 网络特征分析\*

武喜萍 杨红雨 韩松臣†

(四川大学, 视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室, 成都 610064)

(2016年4月7日收到; 2016年4月21日收到修改稿)

为提高空管技术保障系统应对突发事件的能力, 本文以空管技术保障系统导航、通信、监视设备覆盖的航路结构为基础, 构建系统对应的空间网络模型. 提出从灵活性、鲁棒性、高效性三个方面度量空管技术保障系统网络特性, 对北京、上海、广州、昆明、沈阳、兰州飞行情报区的空管技术保障系统网络的平均度、度分布、度-度相关性、聚集系数、平均路径长度、直径等进行分析. 分析结果显示, 各飞行情报区空管技术保障系统的平均聚集系数在0.25—0.39之间, 网络聚集程度偏低; 网络平均路径长度为3.4, 表现出小世界网络特征; 度值 $\geq 3$ 时服从幂律分布, 度-度分布不表现出正相关或负相关. 对网络进行基于度优先的和随机的抗毁性测度, 空管技术保障系统网络抗毁性较差, 网络的可靠性由少数核心节点决定, 应对核心节点进行目标免疫, 提高网络的抗毁性. 这些规律为空管技术保障系统能力提升、新建扩建提供理论依据, 对降低突发事件对空管系统保障能力的影响, 保障空中交通持续安全具有现实意义.

**关键词:** 复杂网络, 空中交通管理, 技术保障, 网络特征

**PACS:** 02.10.Ox, 05.90.+m

**DOI:** 10.7498/aps.65.140203

## 1 引言

空中交通管理是空中交通畅通和安全的重要保障. 空管技术保障系统是支撑空中交通管理实现其既定功能目标的重要基础设施, 它包含通信、导航、监视等多种设备, 具有完成民航地空通信、飞行引导、定位监视多种任务的能力.

近年来, 无论是自然灾害还是人为破坏, 一些突发事件对局部区域的空管技术保障设备造成了较大影响, 使得空管技术保障系统的脆弱性充分暴露. 而一旦该系统中关键设备受到突发事件的冲击而发生故障, 极有可能导致局部空管业务受损甚至航空运输网络出现大面积崩溃, 严重威胁到空中交通安全.

随着空中交通流量和空管技术保障系统网络

化程度的增加, 该系统运行面临内外部风险逐渐增加, 各种突发事件的发生极有可能损害系统中相关设备的运行性能, 单一事件往往容易转化为复杂事件, 甚至影响相关空域内空中交通服务的持续性.

网络化是空管技术保障系统的必然趋势, 但是空管技术保障系统的网络特征的研究较少, 许多学者研究电力传输<sup>[1]</sup>、燃气管道<sup>[2]</sup>、城市交通等<sup>[3,4]</sup>保障系统的网络特性. 由于航空网络是以空管技术保障系统为基础构建的, 此类研究对空管技术保障系统网络特征研究具有借鉴意义. Cheung等<sup>[5]</sup>对美国航空运输网络的网络特性进行了分析. Mehta等<sup>[6]</sup>分析了美国机场网络的特征. Xu和Harriss<sup>[7]</sup>对美国航空网络进行过研究, 揭示了各城市对之间的连接关系. Bagler等<sup>[8]</sup>研究了印度民用机场的加权网络特性. Guida和Maria<sup>[9]</sup>研究了意大利机场网络特性. Pien等<sup>[10]</sup>分析了欧洲航空网络的鲁

\* 国家自然科学基金(批准号: 71573184)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hansongchen@nuaa.edu.cn

棒性. Zhang等<sup>[11]</sup>运用复杂网络理论研究了机场网络,发现尽管中国机场网络拓扑结构保持不变,但网络内部在进行动态的转换. Cai等<sup>[12]</sup>研究发现中国航路网络具有低聚类、大的最短路径长度等网络特征. Wang等<sup>[13,14]</sup>分析了中国机场网络和中国航路网络的网络特征. 曾小舟等<sup>[15-17]</sup>运用复杂网络理论,通过运量距离和加权对国内航空网络结构进行了实证分析,并运用中国航空旅客航班时刻形成的航空网络样本,实证分析了中国航空网络枢纽机场的发展水平. 王姣娥等<sup>[18]</sup>通过对中国航空网络的实证研究,阐述了航空网络空间结构的复杂性. Paleari等<sup>[19]</sup>对中国、欧洲、美国的航空网络进行了对比研究.

空管技术保障系统所含设备的工作原理、性能、组网方式不尽相同,且相互之间存在复杂的业务关联,所以与其他航空网络不同,空管技术保障系统属于一类多元混合、复杂大系统. 该系统具有复杂网络的一般特征和独特的领域特征.

本文将复杂网络的研究方法融入到空管技术保障网络的研究中,提出了空管技术保障系统空间网络模型构建方法,从灵活性、鲁棒性、高效性三个方面度量空管技术保障系统网络特性,分析北京、上海、广州、昆明、沈阳、兰州飞行情报区的空管技术保障系统网络特征,计算网络的平均度、度分布、度-度相关性、聚集系数、平均路径长度、直径等度量指标,进行抗毁性分析,揭示系统的运行规律,提高空管技术保障系统应对突发事件影响、保持业务持续的能力.

## 2 空管技术保障系统空间网络模型构建

空管技术保障设备包含通信、导航、监视设备. 无线电通信设备主要是(very high frequency, VHF)通信台站,用于飞机与地面台站、飞机与飞机之间的双向语音和数据通信联络. 由于频率很高,地面波衰减很快,通信距离限制在视距以内,作用范围一般在200 km以内. 导航设备主要有甚高频全向信标台(VHF omni-directional range, VOR)、测距机(distance measuring equipment, DME)以及无方向性信标台(non-directional beacon, NDB),用于引导飞机进行起飞、降落,并保证飞机沿航线正确飞行. 监视设备主要有空管一次

雷达(primary surveillance radar, PSR)、二次雷达(secondary surveillance radar, SSR)、广播式自动相关监视设备(automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)等,用于对空中飞机的飞行状况进行监控和跟踪. 这些空管设备数量巨大,技术保障网络中嵌套通信设备网络、导航设备网络和监视设备网络,设备相互之间存在着复杂的关联关系,空管技术保障网络具备超网络特征<sup>[20,21]</sup>.

将空管技术保障的超网络模型定义为一个三元组 $\Gamma = (S, S', \Delta)$ . 其中, $S$ 是结构超图, $S = (X, E, H)$ ,满足条件:

$$\begin{aligned} X &= \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \\ E &= \{(x_i, x_j)\} (i, j \in n), \\ H &= \{H_1, H_2, \dots, H_m\}, \\ H_i &\neq \emptyset (i = 1, 2, \dots, m), \\ \bigcup_{i=1}^m H_i &= X, \end{aligned}$$

其中 $X$ 为有限节点集, $E$ 为节点之间的边集, $H$ 是 $S$ 的超边集, $H_i \neq \emptyset$ 和 $\bigcup_{i=1}^m H_i = X$ 是超图的定义约束.

$S'$ 是 $\Gamma$ 的属性超图, $S' = (T, H')$ ,满足条件:

$$\begin{aligned} T &= \{t_1, t_2, \dots, t_{n'}\}, \\ H' &= \{H'_1, H'_2, \dots, H'_{m'}\}, \\ H'_i &\neq \emptyset (i = 1, 2, \dots, m'), \\ \bigcup_{i=1}^m H'_i &= T, \end{aligned}$$

其中, $T$ 是有限节点集,同时也是 $\Gamma$ 的属性节点, $H'$ 是 $S'$ 的超边集, $H'_i \neq \emptyset$ 和 $\bigcup_{i=1}^m H'_i = T$ 是超图的定义约束.

$\Delta$ 是属性关联,是从结构超图中的元素到属性超图中的元素的关联,记为: $M \rightarrow N$ , $M = X \cup E \cup H$ , $N = T \cup H'$ .

基于结构层和属性层相统一的空管技术保障系统超网络模型如图1所示.

$C, N, S$ 分别表示通信子网、导航子网、监视子网.  $C_1, C_2, C_3$ 表示通信节点,  $N_1, N_2, N_3$ 表示导航节点,  $S_1, S_2$ 表示监视节点.  $t_1, t_2, \dots, t_{11}$ 表示属性,  $h_1, h_2, h_3$ 是属性的集合,实线表示边,  $f_1, f_2, \dots, f_8$ 是映射.

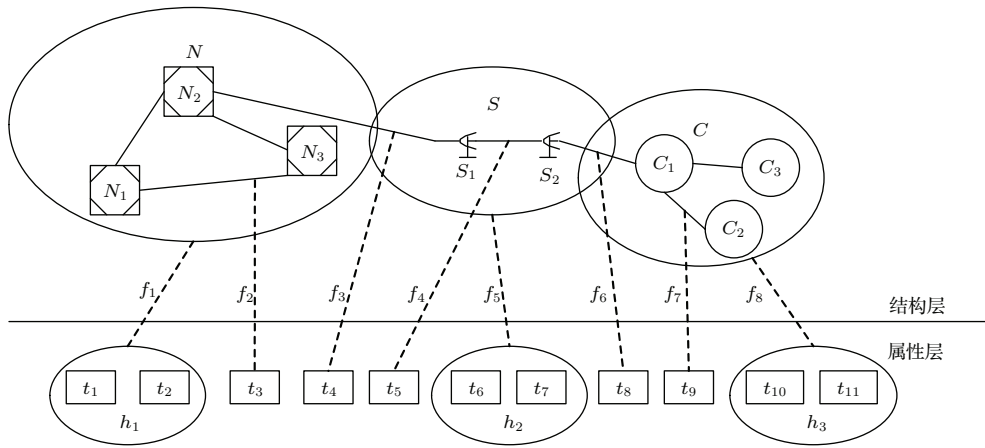


图1 空管技术保障系统超网络模型

Fig. 1. Super network model of air traffic management technology support system.

空管技术保障系统空间网络模型构建步骤, 包括以下5步:

1) 考虑空管技术保障系统中通信、导航、监视设备工作特性、实际作用范围等因素, 确定对系统网络进行抽象简化的原则;

2) 依据确定的简化原则, 明确空管技术保障系统中的通信设备节点集合 (主要是甚高频 VHF 通信台站)、导航设备节点集合 (主要是 VOR/DME 台站、NDB 台站、仪表着陆系统)、监视设备节点集合 (主要是一次雷达、二次雷达站);

3) 以导航设备节点及此类节点之间的边构建空管技术保障系统基础网络, 然后加入监视设备节点、通信设备节点, 并根据后增节点的航路覆盖范围增减基础网络的边, 得到空管技术保障系统网络对应的无权、无向的稀疏连通图;

4) 结合空管技术保障系统对应的物理特性和地理空间特性对图中的边和节点分别赋予权重, 得到空管技术保障系统网络对应的加权图;

5) 分析网络中三类空管设备之间的业务依赖关系, 建立各种网络对应的关联指标, 包括静态关联指标和动态关联指标.

空管设备之间的业务依赖关系包括如下几点:

1) 通信、导航、监视设备均有一定的覆盖范围;  
2) 在实施雷达管制的区域, 至少实现两重以上雷达信号覆盖, 雷达设备失效后, 雷达管制转为程序管制, 管制服务降低;

3) 甚高频全向信标台 VOR 精度高于无方向性信标台 NDB;

4) 导航设备失效后选用备份或事先确定的导航设备.

### 3 空管技术保障系统网络特性度量

从灵活性、鲁棒性、高效性三个方面度量空管技术保障系统网络特性. 各特性的度量指标如表 1 所示.

表1 空管技术保障系统网络特性度量指标

Table 1. The measure index of air traffic management technical support system network.

特征	度量指标	物理含义
灵活性	度及度分布	不同的分布函数反映了系统节点的重要程度
灵活性	点权	赋权网络中节点的重要程度
灵活性	系统结构聚集系数	反映系统结构集团化程度
鲁棒性	系统结构抗毁度	系统单元及其关系遭受攻击条件下, 系统效能保持情况
鲁棒性	系统结构介数分布	单元点介数服从的分布规律
高效性	平均最短路径长度	反映系统的效率
高效性	网络直径	反映系统结构整体连通性和效能

#### 1) 度及度分布

以空管技术保障系统中的设备为网络节点, 节点度是与该节点连接的边的数量, 节点  $i$  的度记为

$$k_i = \sum_j a_{ij}, \quad (1)$$

$a_{ij}$  是节点  $i$  与节点  $j$  之间连接的边的数目.

网络中节点的度分布情况用分布函数  $p(k)$ , 表示网络中度为  $k$  的节点在整个网络中所占的比例. 结合空管技术保障系统对应的物理特性和飞行流

量对图中的边和节点分别赋予权重, 得到空管技术保障系统网络对应的加权图.

度-度相关性是网络的一个重要的度量指标.

$$k_{nn,i} = \frac{1}{k_i} \left[ \sum_j a_{ij} k_j \right], \quad (2)$$

$k_i$  为节点  $v_i$  的度值,  $a_{ij}$  为邻接矩阵元素, 若节点  $v_i$  和  $v_j$  有边相连则  $a_{ij} = 1$ , 否则  $a_{ij} = 0$ , 所有度值为  $k$  的节点的最近邻平均度值的平均值  $k_{nn}(k)$  为

$$k_{nn}(k) = \frac{1}{[N \cdot P(k)]} \sum_{i|k_i=k} k_{nn,i}, \quad (3)$$

$N$  为节点总数,  $P(k)$  为度分布函数. 如果  $k_{nn}(k)$  是随着  $k$  上升的增函数, 则度值大的节点倾向于和度值大的节点连接, 网络具有正相关特性, 是同配网络, 反之网络具有负相关特性, 是异配网络.

#### 2) 点权

节点  $i$  的点权是与它关联的边权之和, 是无权网络中节点度的自然推广.

$$S_i = \sum_j w_{ij}, \quad (4)$$

$w_{ij}$  是节点  $i$  与节点  $j$  的边的权重.

#### 3) 系统结构聚集系数

系统结构聚集系数反映了系统结构集团化程度, 系统结构聚集系数越大, 系统节点之间的联系越紧密. 通过聚集系数可以有效反映系统结构单元之间自组织、自同步与动态组合等特征, 是反映系统结构灵活性的重要指标.

节点  $i$  的聚集系数为

$$C_i = \frac{2E_i}{n(n-1)}, \quad (5)$$

$n$  为节点  $i$  的邻接节点,  $E_i$  为  $n$  个节点之间实际相连的边数.

整个系统的聚集系数为

$$C = \frac{1}{n} \sum_{\forall v_i \in V} C_i, \quad (6)$$

$C$  值越大, 整个网络中节点形成短距离联系的程度越大.

#### 4) 系统结构抗毁性

系统结构抗毁度是描述系统结构中的节点及其关系发生失效或遭受攻击条件下, 系统结构保持连通的能力. 系统结构抗毁度越大, 表示系统连接程度越好, 即鲁棒性越好.

使用网络的整体效能  $E$  作为度量抗毁性的指标

$$E = \frac{1}{C_N^2} \sum_{1 \leq i < j \leq N} 1/d_{ij}, \quad (7)$$

$d_{ij}$  是节点  $v_i$  和  $v_j$  之间的距离,  $N$  是网络中的节点数.

节点  $v_i$  删除后, 网络的效率减少量为

$$C_E(v_i) = \frac{E - E_i}{E}, \quad (8)$$

空管技术保障系统的抗毁性是当系统的设备被攻击时, 该网络抗击破坏的能力. 度值反映了系统设备在网络中的重要程度, 基于度优先的去点攻击, 依次攻击系统中度值最大的节点, 观察网络整体效能的变化, 与随机攻击的情况下网络整体效能进行对比, 度量网络的鲁棒性.

#### 5) 系统结构介数分布

系统节点介数是指系统结构中所有最短路径中经过该系统节点的数量比例, 反映了该系统节点在整个系统结构中的作用和影响力, 是系统结构鲁棒性的一个重要度量指标.

网络中不相邻的节点  $v_j$  和  $v_l$  之间的最短路径会途径某些节点, 如果某个节点  $v_i$  被其他许多最短路径经过, 则该节点在网络中很重要. 节点的介数为

$$B_i = \sum_{\substack{1 \leq j \leq l \leq N \\ j \neq i \neq l}} [n_{jl}(i)/n_{jl}], \quad (9)$$

$n_{jl}$  为节点  $v_j$  和  $v_l$  之间的最短路径条数,  $n_{jl}(i)$  为节点  $v_j$  和  $v_l$  之间的最短路径经过节点  $v_i$  的条数,  $N$  为网络中节点总数.

边的介数为

$$\tilde{B}_{ij} = \sum_{\substack{1 \leq l \leq m \leq N \\ (l,m) \neq (i,j)}} [N_{lm}(e_{ij})/N_{lm}], \quad (10)$$

$N_{lm}$  为节点  $v_l$  和  $v_m$  之间的最短路径条数,  $N_{lm}(e_{ij})$  为节点  $v_l$  和  $v_m$  之间的最短路径经过边  $e_{ij}$  的条数.

#### 6) 平均最短路径长度

网络的平均最短路径为任意两个节点之间距离的平均值, 反映了网络的效率. 平均路径长度大, 设备布局分散, 平均路径长度小, 设备布局紧密.

$$L = \frac{1}{C_N^2} \sum_{1 \leq i < j \leq N} d_{ij}, \quad (11)$$

式中,  $d_{ij}$  是节点  $v_i$  和  $v_j$  之间的距离,  $N$  是网络中的节点数.

7) 网络直径

网络中任意两个节点之间距离的最大值称为网络直径, 可以反映网络整体连通性能和效能.

$$D = \max_{1 \leq i < j \leq N} d_{ij}, \quad (12)$$

式中,  $d_{ij}$  是节点  $v_i$  和  $v_j$  之间的距离.

4 实例分析

使用北京、上海、广州、昆明、沈阳、兰州飞行情报区 (flight information region, FIR) 的空管技术保障系统数据分别构建相应飞行情报区空管技术保障网络, 并对网络特性进行分析. 北京情报区空管技术保障系统网络结构图如图 2 所示, 图中数字表示的节点是 VOR 导航台, 字母表示的节点是 NDB 导航台, 节点之间的航线构成网络的边.

北京、上海、广州、昆明、沈阳、兰州飞行情报区空管技术保障系统网络特性如表 2 所示.

网络的节点数即该网络内空管技术保障设备数量, 节点度是指在该飞行情报区内与该节点直接连接的其他节点的数量, 由于各飞行情报区内设备数量不同, 不能直接比较网络的节点度, 所以使用网络平均度来比较各飞行情报区的网络特征, 各飞行情报区的平均度为 3.38, 说明平均每个空管技术保障设备与 3.38 个设备连接.

聚集系数反映网络的聚集程度, 是度量网络灵活性的重要指标, 聚集系数  $0 \leq C \leq 1$ . 各飞行情报区空管技术保障系统的平均聚集系数在 0.25—0.39 之间, 聚集系数偏小, 网络聚集程度偏低.

网络的平均最短路径长度是所有节点两两间

最短路径的平均值, 是度量网络高效性的一个重要指标. 构造网络的邻接矩阵, 应用 Floyd 算法求出任意节点之间的最短距离. 各飞行情报区的平均路径长度在 3.16—5.05 之间, 网络平均路径长度为 3.4, 即两个设备之间平均需要经过 3 个节点即可到达. 网络表现出小世界网络特征.

另一个度量网络高效性的指标网络直径表示网络中所有最短路径中的最大值, 是网络中的一种极限情况. 上海飞行情报区空管技术保障系统网络直径为 13, 是最大值.

对北京、上海、广州、昆明、沈阳、兰州飞行情报区空管技术保障系统网络进行度分布特征分析, 各飞行情报区空管技术保障系统度分布在双对数坐标下的分布如图 3 所示. 空管技术保障系统度值  $\geq 3$  时符合幂律分布, 具有无标度的

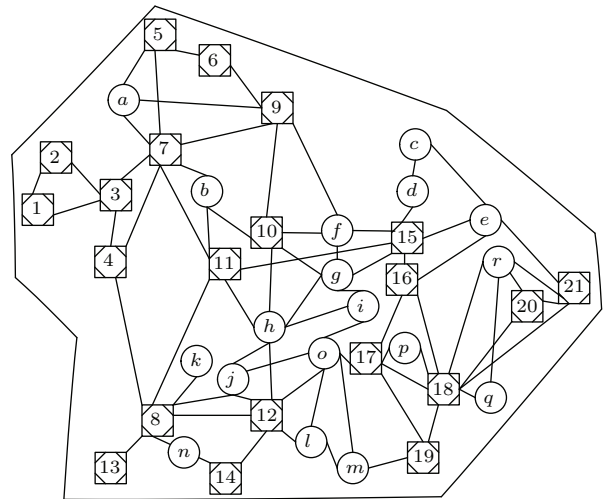


图 2 北京飞行情报区空管技术保障网络  
Fig. 2. Beijing FIR air traffic management technical support network.

表 2 空管技术保障系统网络特性  
Table 2. The network properties of air traffic management technical support system.

区域	节点数	节点度	平均度	聚集系数	平均最短路径长度	网络直径
北京飞行情报区	39	146	3.74	0.33	3.16	6
上海飞行情报区	67	235	3.51	0.28	5.05	13
广州飞行情报区	47	148	3.15	0.25	4.54	10
昆明飞行情报区	57	196	3.44	0.39	4.66	10
沈阳飞行情报区	38	118	3.11	0.25	4.16	10
兰州飞行情报区	34	114	3.35	0.38	3.74	8

特性.

研究度-度相关性的目的是得到空管设备间的连接偏好和机理, 如果度大的节点倾向于和度大的节点连接, 网络是度-度正相关的, 反之, 度大的节

点倾向于和度小的节点连接, 网络是度-度负相关的. 如图 4 所示, 空管技术保障系统网络导航台与邻接导航台不表现出正相关或负相关, 表现出随机网络的特征.

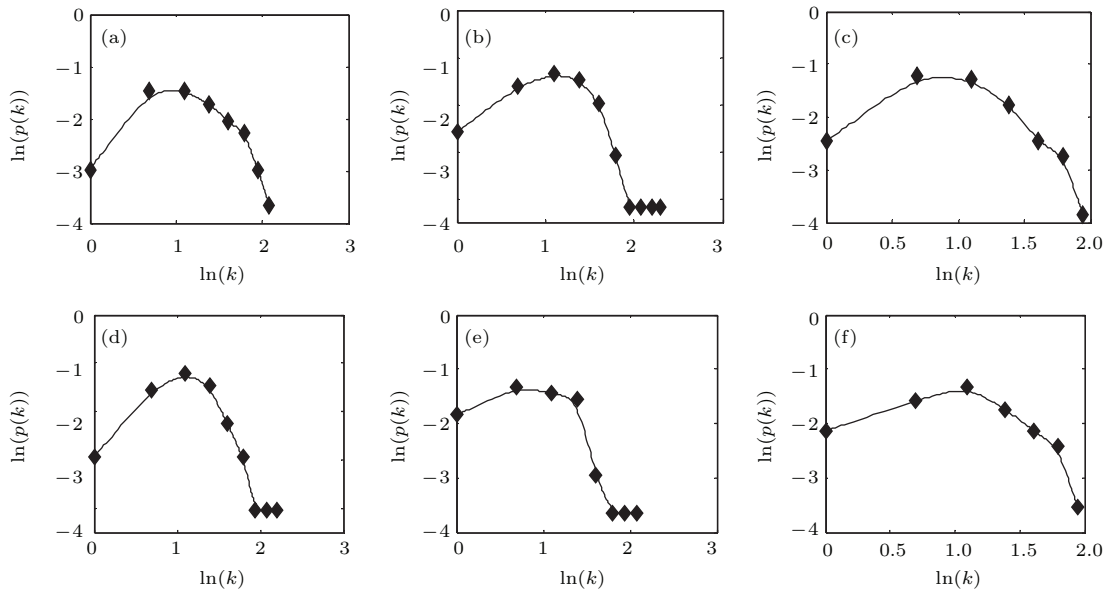


图 3 双对数坐标下度分布 (a) 北京飞行情报区; (b) 上海飞行情报区; (c) 广州飞行情报区; (d) 昆明飞行情报区; (e) 沈阳飞行情报区; (f) 兰州飞行情报区

Fig. 3. The cumulative degree distribution in double logarithmic scale: (a) Beijing FIR; (b) Shanghai FIR; (c) Guangzhou FIR; (d) Kunming FIR; (e) Shenyang FIR; (f) Lanzhou FIR.

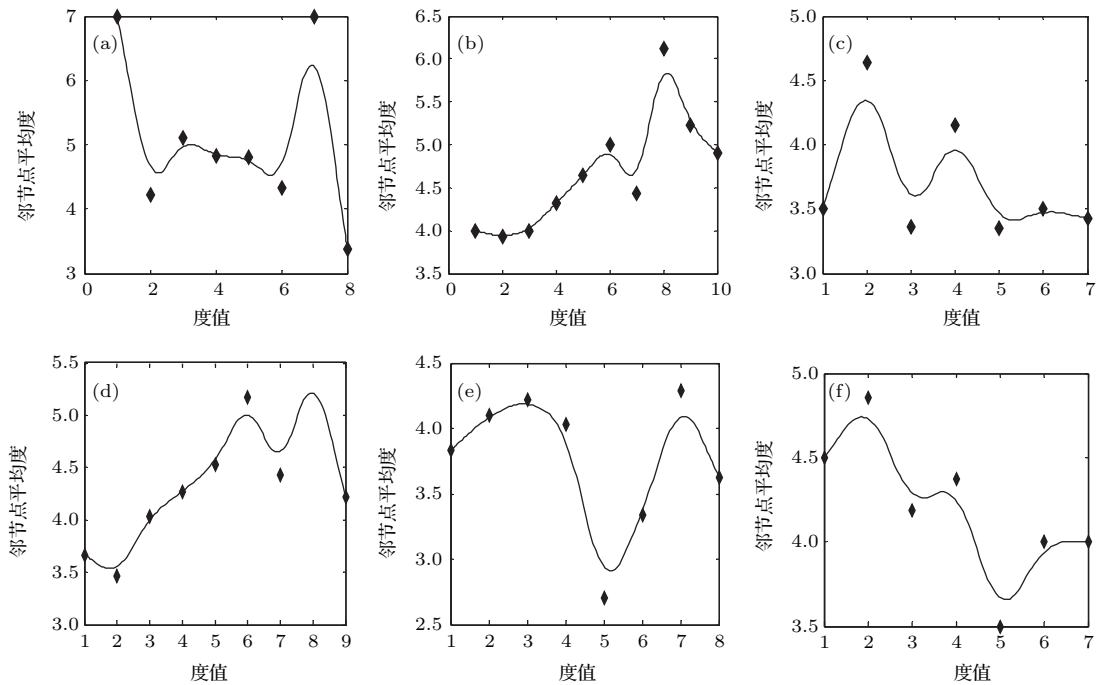


图 4 度-度相关性 (a) 北京飞行情报区; (b) 上海飞行情报区; (c) 广州飞行情报区; (d) 昆明飞行情报区; (e) 沈阳飞行情报区; (f) 兰州飞行情报区

Fig. 4. The degree-degree correlation of network: (a) Beijing FIR; (b) Shanghai FIR; (c) Guangzhou FIR; (d) Kunming FIR; (e) Shenyang FIR; (f) Lanzhou FIR.

分别对飞行情报区进行基于度优先的去点攻击,即依次攻击度值最大的导航台,测量网络整体效能,并与随机攻击情况下网络整体效能进行比较,如图5所示.图中“+”表示随机去点攻击情况下,删除节点后网络整体效能,图中“◆”表示基于度优先去点攻击情况下,删除节点后网络整体

效能.

空管技术保障系统网络在随机攻击下,网络整体效能呈下降趋势.在基于度优先攻击情况下,网络抗毁性较差,整体效能急剧下降.网络的可靠性由少数核心节点决定,网络不够发达,应该提高网络鲁棒性,特别是提高核心节点的抗毁性.

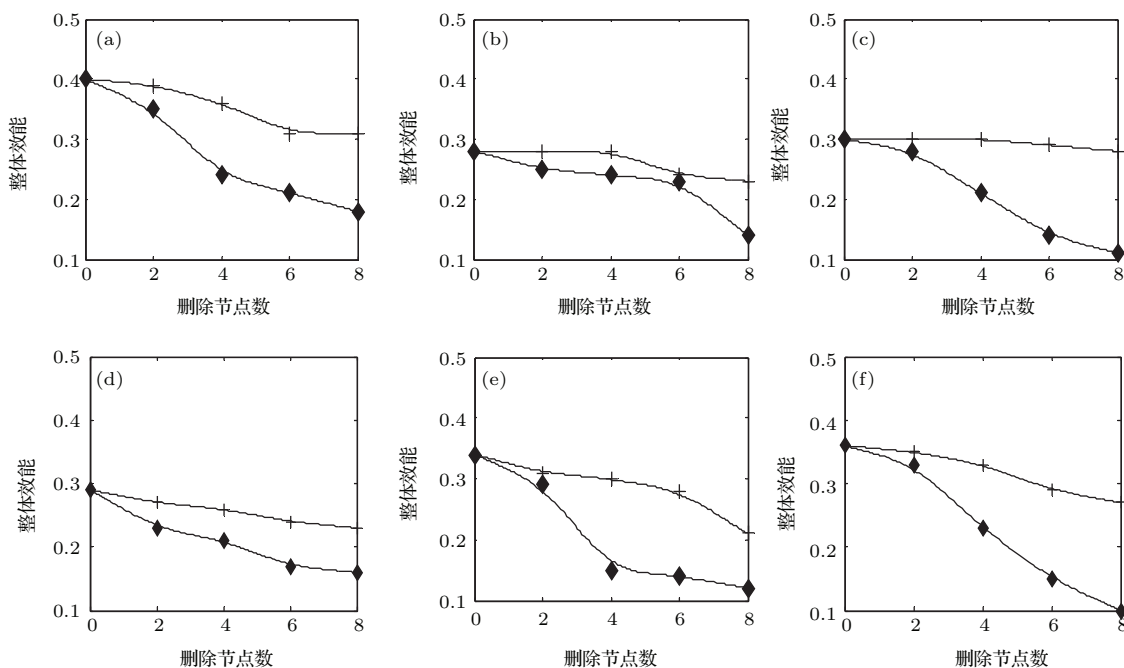


图5 不同攻击条件下网络的整体效能 (a)北京飞行情报区; (b)上海飞行情报区; (c)广州飞行情报区; (d)昆明飞行情报区; (e)沈阳飞行情报区; (f)兰州飞行情报区

Fig. 5. Overall performance of networks under different attack conditions: (a) Beijing FIR; (b) Shanghai FIR; (c) Guangzhou FIR; (d) Kunming FIR; (e) Shenyang FIR; (f) Lanzhou FIR.

## 5 结 论

空管技术保障系统网络包含通信设备网络、导航设备网络和监视设备网络,各网络之间存在复杂的业务关联,属于多元混合大系统,具备超网络特征,可以使用复杂网络方法对空管技术保障系统网络的平均度、度分布、度-度相关性、聚集系数、平均路径长度、直径等进行分析.本文构建了北京、上海、广州、昆明、沈阳、兰州飞行情报区空管技术保障系统网络模型,并运用复杂网络模型方法进行分析,得出以下结论.

1) 空管技术保障系统网络度值在2—4之间的节点最多,空管技术保障系统度值 $\geq 3$ 时符合幂律分布,与航空网络度分布一致.空管技术保障系统网络度-度相关不表现出正相关或负相关,表现出随机网络的特征.

2) 各飞行情报区空管技术保障系统的平均聚集系数在0.25—0.39之间,平均路径长度在3.16—5.05之间,网络平均路径长度为3.4,即两个设备之间平均需要经过3个节点即可到达,表现出小世界网络特征.

3) 对空管技术保障系统网络基于度优先的攻击和随机攻击.在随机攻击下,网络整体效能呈下降趋势.在基于度优先攻击情况下,删除8个度值最高的节点后,北京、上海、昆明网络整体效能下降了50%,广州、沈阳、兰州网络整体效能下降至0.1,网络的可靠性由少数核心节点决定,网络不够发达,网络抗毁性差,应提高网络鲁棒性,特别是提高核心节点的抗毁性.

4) 基于空管技术保障系统的复杂网络特征,借鉴业务持续性管理中的灾难受损与恢复的理念,建立一整套的空管技术保障系统管理流程.实现空管技术保障系统的多重覆盖,对通信、导航、监视的关



键节点选择最有效的备份方法, 进行目标免疫. 使用自动相关监视、星基导航、数字通信等新的空管技术保障设备对目前的系统进行备份, 提高空管技术保障系统的灵活性、鲁棒性和高效性.

## 参考文献

- [1] Wang J J, Yu X H, McGrath B, Zhong J X 2015 *Proceedings, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* Dallas, TX, United States October 30–November 1, 2014 p3543
- [2] Shimizu Y, Yamazaki F, Yasuda S, Towhata I, Suzuki T, Isoyama R, Ishida E, Suetomi I, Koganemaru K, Nakayama W 2006 *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* **132** 237
- [3] Zhou X, Yang F, Zhang F M, Zhou W P, Zou W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 150201 (in Chinese) [周漩, 杨帆, 张凤鸣, 周卫平, 邹伟 2013 物理学报 **62** 150201]
- [4] Zheng X, Chen J P, Shao J L, Bie L D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 190510 (in Chinese) [郑啸, 陈建平, 邵佳丽, 别立东 2012 物理学报 **61** 190510]
- [5] Cheung D P, Gunes M H 2012 *IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining* Istanbul, Turkey August 26–29, 2012 p699
- [6] Mehta V, Patel F, Glinia Y, Schmidt M, Miller B, Bliss N 2012 *Conference on Intelligent Data Understanding* Boulder, CO, United States October 24–26, 2012 p124
- [7] Xu Z W, Harriss R 2008 *Geo. Journal* **73** 87
- [8] Bagler G 2008 *Physica A* **387** 2972
- [9] Guida M, Maria F 2007 *Chaos, Solitons Fractals* **31** 527
- [10] Pien K C, Han K, Shang W L, Majumdar A, Ochieng W 2015 *Transportmetrica A: Transport Sci.* **11** 772
- [11] Zhang J, Cao X B, Du W B, Cai K Q 2010 *Physica A* **389** 3922
- [12] Cai K Q, Zhang J, Du W B, Cao X B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 028903
- [13] Wang H Y, Wen R Y 2012 *24th Chinese Control and Decision Conference* Taiyuan, China, May 23–25, 2012 p2400
- [14] Wang H Y, Wen R Y, Zhao Y F 2015 *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* **229** 2497
- [15] Zeng X Z, Tang X X, Jiang K S 2011 *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology* **11** 175 (in Chinese) [曾小舟, 唐笑笑, 江可申 2011 交通运输系统工程与信息 **11** 175]
- [16] Zeng X Z, Tang X X, Jiang K S 2012 *System Simulation Technology* **8** 111 (in Chinese) [曾小舟, 唐笑笑, 江可申 2012 系统仿真技术 **8** 111]
- [17] Zeng X Z, Jiang K S, Cheng K 2010 *Systems Engineering* **28** 39 (in Chinese) [曾小舟, 江可申, 程凯 2010 系统工程 **28** 39]
- [18] Wang J E, Mo H H, Jin F J 2009 *Acta Geographica Sinica* **64** 899 (in Chinese) [王姣娥, 莫辉辉, 金凤君 2009 地理学报 **64** 899]
- [19] Paleari S, Redondi R, Malighetti P 2009 *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **46** 198
- [20] Suo D, Wen F 2009 *2nd International Symposium on Information Science and Engineering* Shanghai, China December 26–28, 2009 p114
- [21] Shang L Y, Tan Q M 2014 *Proceedings of the IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences* Beijing, China June 27–29, 2014 p897

# Analysis on network properties of multivariate mixed air traffic management technical support system based on complex network theory\*

Wu Xi-Ping Yang Hong-Yu Han Song-Chen<sup>†</sup>

(National Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

( Received 7 April 2016; revised manuscript received 21 April 2016 )

## Abstract

Air traffic management technical support system provides communication, navigation and surveillance service for air traffic management system and air traffic controller. The failures of some facilities may lead to large delay, even affect air transportation safety. In order to improve the ability of air traffic management technical support system to respond to emergencies, a network model of air traffic management technical support system is presented. The network model of air traffic management technical support system is established according to the effective coverage of communication, navigation and surveillance facilities, the position of air traffic management technical support system and air route network. Flexibility, robustness and efficiency are used to measure the network. The measure index of air traffic management technical support system network includes degree, degree distribution, strength, clustering coefficient, network performance, betweenness centrality, average shortest path and diameter. For Beijing, Shanghai, Guangzhou, Kunming, Shenyang and Lanzhou flight information regions, the air traffic management technical support networks are built by using the data of air traffic support facilities, air route, air traffic flow, etc. The average degrees, degree distributions, degree-degree correlations, clustering coefficients, average shortest paths and diameters of these networks are comparatively analyzed. The results show that the degrees of most nodes are between two and four. The network has a power law distribution, which is the same as that of air transportation network. The degree-degree correlation of air traffic management technical support system network is not assortative nor disassortative mixing, which has random network characteristics. The clustering coefficients of several air traffic management technical support system networks are between 0.25 and 0.39. The clustering value is lower than that of air transportation network. The shortest paths of air traffic management technical support system networks are between 3.16 and 5.05. The average shortest paths of these networks are all 3.4, which exhibits small world characteristics. Network attack based on degrees of priority and random is conducted to several flight information regions of air traffic management technical support network, showing the network is vulnerable. The network performance decreases quickly after degree priority attack. Some key nodes play an important role in the network. The network survivability can be improved after targeted immunized key nodes. The network performance can be improved by using more satellites based air traffic management technical support system. These rules provide theoretical support for improving and expanding air traffic management technical support system, and have practical significance for reducing the influence of emergency on air traffic management system support ability and ensuring the continuous safety of air traffic.

**Keywords:** complex network, air traffic management, technology support, network properties

**PACS:** 02.10.Ox, 05.90.+m

**DOI:** 10.7498/aps.65.140203

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 71573184).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [hansongchen@nuaa.edu.cn](mailto:hansongchen@nuaa.edu.cn)