

# 基于复杂网络理论的机场飞行区 风险演化模型研究

□赵贤利 罗帆 [武汉理工大学 武汉 430070]

**[摘要]** 基于复杂网络模型,构建了机场飞行区风险演化数学模型以及风险演化拓扑结构模型,从聚类系数、平均路径长度、度分布对机场飞行区风险演化数学模型进行了阐述,从入出度、节点子网数、所含支链数对风险演化拓扑结构模型进行了分析,并提出了风险断链控制方案。结论表明,飞行区安全管理制度漏洞、员工安全培训缺乏、地面工作人员安全意识缺乏及违规操作、恶劣天气是机场飞行区风险演化模型的关键节点。

**[关键词]** 复杂网络; 机场飞行区; 风险演化

**[中图分类号]** F560

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1008-8105(2013)04-0031-04

## 引言

目前,对机场风险的研究主要集中在风险识别<sup>[1,2]</sup>、风险评价<sup>[3~6]</sup>、风险预测<sup>[7]</sup>、风险控制<sup>[8]</sup>等方面。研究对象大多锁定为机场,少数学者针对机场机坪风险<sup>[9]</sup>、跑道侵入风险<sup>[10]</sup>进行了研究,但针对机场飞行区的研究少见。对机场风险的研究局限于成因及影响因素<sup>[11]</sup>,对风险演化的研究相对缺乏。研究涉及到了航空网络拓扑结构及演化机制<sup>[12]</sup>,但未基于复杂网络对机场飞行区风险演化进行研究。

机场飞行区风险是一个动态演化的开放网络,随机性与规律性共存。本文基于复杂网络模型,构建了机场飞行区风险演化模型及风险演化拓扑结构模型,揭示风险演化的内在规律,提出相应的风险断链控制建议,对提升机场飞行区安全管理水平具有重要意义。

## 一、机场飞行区风险源的辨识

根据Elwyn Edwards教授提出的SHEL模型,机场飞行区的风险源可分为“人-机-环-管”四个方面。飞行区是飞机活动的区域,飞行区无论规模大小,通常包括跑道、滑行道、机坪和机场净空部分组成。飞行区风险源包括:1)人员方面的风险,包括飞行

员、管制员、地面工作人员等。主要表现在:管制员交接班不清、管制员工作负荷较大;飞行员对飞程序不熟悉、飞行员语言差异;地面工作人员安全意识缺乏、地面工作人员应急能力不足、地面工作人员违规操作等。2)设备设施方面的风险,主要表现在:道面破损、车辆故障、围界破损、排水系统故障、目视助航系统故障、驱鸟系统故障、拦阻系统故障、消防系统故障、雷达故障、自动化系统故障、通信设备故障、导航设备故障等。3)环境方面的风险,主要表现在:不停航施工负面影响、鸟害、恶劣天气、突发流控等。4)管理方面的风险,包括飞行区各部门沟通问题、飞行区安全管理制度漏洞、员工安全培训缺乏等。

## 二、机场飞行区风险演化模型的构建

### (一) 机场飞行区风险演化建模

复杂网络的基本模型主要包括随机网络模型、小世界网络模型和无标度网络模型,统计特征包括度、度分布、度相关性、最短路径长度、聚类系数等。机场飞行区风险的分布服从幂律分布,即具有某个特定度的节点数目与这个特定度之间的关系可以用一个幂函数近似表示,该特征类似于无标度网络模型。Barabasi和Albert将增长特性和择优连接两个特性增加到复杂网络的研究中,提出了无标度网

**[收稿日期]** 2012-11-08

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目“机场飞行区安全风险演化机理及预警仿真系统研究”(71271163);国家自然科学基金“机场飞行区安全风险演化机理及预警仿真系统研究”(71271163)。

**[作者简介]** 赵贤利(1989-)女,武汉理工大学管理学院博士生;罗帆(1963-)女,武汉理工大学管理学院教授,博士生导师。

Journal of UESTC (Social Sciences Edition) Aug.2013,Vol.15,No.4

络演化模型,常称为BA模型<sup>[13]</sup>。本文在无标度网络模型的基础上构建了机场飞行区风险演化模型。

机场飞行区风险演化模型的节点 $k_i$ 代表每一个可能的风险,连边 $e_i$ 代表风险诱发过程。假设初始时刻有 $m_0$ 个孤立的风险,在每一个时间间隔增添一个具有 $m$  ( $m \leq m_0$ ) 条边的新节点,连接这个新节点到 $m$ 个不同的已经存在于模型中的节点上。在选择新节点的连接点时,假设新节点连接到节点 $i$ 的概率 $\pi$ 取决于节点 $i$ 的度数即

$$\Pi_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (1)$$

经过 $n - m_0$ 步后就生成了具有 $n$ 个节点、 $m(n - m_0)$ 条边的网络。

设节点 $i$ 的度 $k_i$ 满足动态方程:

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m\pi(k_i) = m \frac{k_i}{\sum_{j=1}^{n-1} k_j} \quad (2)$$

经计算得

$$k_i(t) = m \left(\frac{t}{t_i}\right)^\beta \quad (3)$$

其中,  $\beta=1/2$ , 数量模拟表明具有 $k$ 条边的节点的概率服从指数为 $r=3$ 的幂指数分布。

### (二) 机场飞行区风险演化拓扑结构模型

机场飞行区风险演化拓扑结构共有31个风险和56条演化变链,31个节点代表31个风险,56条边代表56条演化路径。这些风险构成了不同的风险链,包括:1)直链式演化,即单个风险造成单个结果的演化;2)直链发散式演化,即单个风险造成多个结果的演化;3)自循环式演化,即单个风险原因与结果自反馈或者多个风险之间原因与结果自反馈;4)集中式演化,即多个风险导致单个结果的演化。

机场飞行区的风险因素比较复杂,既包括空中部分的风险:管制员工作中出现的风险、飞行员工作中出现的风险、雷达故障、通信设备故障、导航设备风险、自动化系统故障等;又包括地面部分的风险:道面系统、目视助航系统、排水系统、驱鸟系统、拦阻系统、消防系统故障等。由于管制员工作失误、飞行员操作失误可能引起飞行不安全事件;由于人员操作失误或管理指挥不当,跑道、滑行道、停机坪上的车辆可能与飞机产生摩擦,造成飞机车辆碰撞;飞机车辆碰撞的直接后果是造成航班延误,旅客不满情绪升级导致冲突的发生,可能产生人员伤亡。以上危机事件是各风险致因因素耦合作用、链式演化的结果。如图1所示,车辆故障、飞行不安全事件、飞机车辆碰撞、人员伤亡四个结果处于风

险演化拓扑结构的终端位置,即末端危机事件。

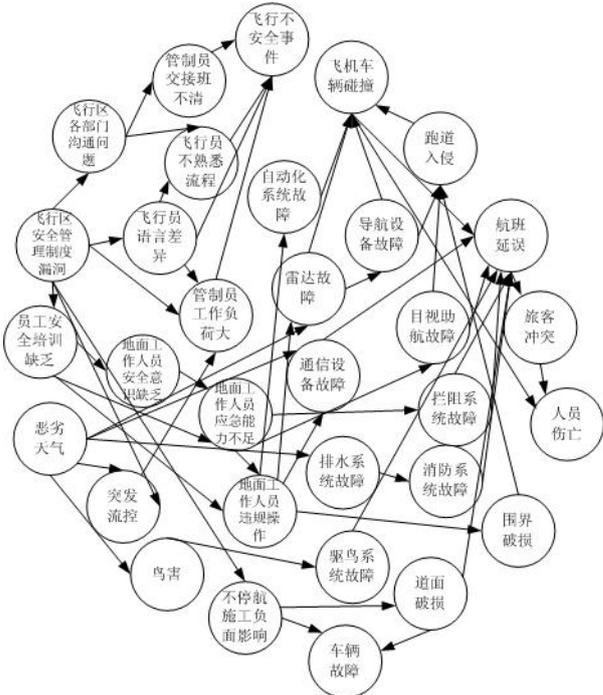


图1 机场飞行区风险演化拓扑结构模型

## 三、机场飞行区风险演化系统的分析与断链控制

### (一) 机场飞行区风险演化数学模型的分析

1. 基于BA无标度网络建立的机场飞行区风险演化模型,其聚类系数(Clustering Coefficient)为:

$$C = \frac{m^2(m+1)^2}{4(m-1)} \left[ \ln\left(\frac{m+1}{m}\right) - \frac{1}{m+1} \right] \frac{[\ln(t)]^2}{t} \quad (4)$$

该模型不具有高的聚类系数,即风险聚集的程度并不一致性地高。部分节点之间存在密集连接性质,部分节点之间连接性质不密集。例如,恶劣天气对通信设备、雷达系统、排水系统、消防系统具有较强的风险传导性,但鸟害对以上系统则不具有强烈的风险传导性。

2. 机场飞行区风险演化数学模型属于无标度网络,但也具有小世界特性,其平均路径长度(Mean Path Length)为:

$$L \propto \frac{\log N}{\log \log N} \quad (5)$$

当网络规模极大时,可以用主方程法进行精确求解。

3. 该模型的度分布(Degree Distribution)为:

$$P(k) = \frac{2m(m+1)}{k(k+1)(k+2)} \propto 2m^2 k^{-3} \quad (6)$$

度分布是指网络中节点的度的概率分布或频率

(续表)

分布。该模型的度分布指数为不变量,即模型的度分布是与时间无关的渐进分布且与系统规模无关。现实中,机场飞行区的风险演化度分布是否符合这一特性还需进一步验证。

### (二) 机场飞行区风险演化拓扑结构模型分析

1. 入度与出度。有向网络中节点的度分为入度(In-degree)和出度(Out-degree)。网络拓扑图中,箭头指向该风险则表示入度,箭头从该风险引出则表示出度。入度与出度涵盖了风险可能性与严重性的特性。入度越大,表示导致该风险的途径越多,控制难度也相应增加;出度越大,表示该风险可能造成的后果越严重。末端危机事件的后果在短时间内难以辨识,因此在该模型中出度用严重性表示。

2. 节点子网数。节点子网数是指风险及其演化风险的个数总和。在风险演化网络模型中,节点子网数越大,表明风险造成的后果越严重。

3. 所含支链数。所含支链数是指经过某风险的各项支链累加之和。

网络中所有节点度的列表为度序列,图1中的度序列如表1所示。

表1 机场飞行区风险演化拓扑结构度序列

风险	入度	出度	子网节点数	所含支链数
飞行区各部门沟通问题	1	2	4	5
飞行区安全管理制度漏洞	0	6	13	17
员工安全培训缺乏	1	3	8	12
恶劣天气	0	5	10	15
突发流控	2	1	3	3
鸟害	1	1	3	5
不停航施工负面影响	0	3	4	7
管制员交接不清	1	1	2	3
管制员工作负荷大	3	1	2	6
飞行员不熟悉流程	2	1	2	4
飞行员语言差异	1	3	4	5
地面工作人员安全意识缺乏	1	1	7	10
地面工作人员应急能力不足	2	3	6	8
地面工作人员违规操作	2	4	10	15
自动化系统故障	1	1	2	4
雷达故障	2	2	4	5
通信设备故障	2	1	3	5
导航设备故障	1	2	3	4

风险	入度	出度	子网节点数	所含支链数
排水系统故障	1	1	3	4
驱鸟系统故障	1	1	2	4
消防系统故障	1	1	2	4
拦阻系统故障	1	1	2	4
目视助航系统故障	1	1	3	6
道面破损	1	2	3	5
车辆故障	2	*	1	2
围界破损	1	1	2	3
飞行不安全事件	4	***	1	4
飞机车辆碰撞	4	**	1	6
跑道入侵	3	1	2	4
航班延误	8	1	2	9
旅客冲突	1	1	2	1
人员伤亡	1	***	1	2

注:①末端节点的出度根据风险的严重性确定,用\*表示,\*数量越多则后果越严重;②在统计子网节点数时,所研究的事件本身也作为节点子网的一部分;③统计经过危机事件的每条支链并将其叠加,得到危机事件包含的支链数。

根据表1可以看出:1)管制员工作负荷大、飞行不安全事件、飞机车辆碰撞、跑道入侵、航班延误的入度较大,说明发生的可能性较大,风险发生途径多;飞行区安全管理制度漏洞、恶劣天气、地面工作人员违规操作的出度较大,说明其后果较严重。2)对末端危机事件的后果采用严重性来定义,飞行不安全事件、人员伤亡的风险非常高,飞机车辆碰撞风险次之,车辆故障风险相对最小。3)末端危机事件的节点子网数为1,即末端危机事件本身。飞行区安全管理制度漏洞、恶劣天气、员工安全培训缺乏以及地面工作人员违规操作的节点子网数较大,说明其可能造成的后果较严重。4)飞行区安全管理制度漏洞、员工安全培训缺乏、地面工作人员安全意识缺乏、地面工作人员违规操作、恶劣天气所含支链数较大,说明以上风险出现的频率较高,后果较严重。

### (三) 机场飞行区风险演化系统的断链控制

由末端危机事件车辆故障、飞行不安全事件、飞机车辆碰撞、人员伤亡四个风险可知,机场飞行区的风险源一旦演化为不安全事件或事故征候,风险可能造成的后果是灾难性的。因此,在机场飞行区风险演化拓扑结构模型中确定关键断链环节显得尤其重要。由表1可知,飞行区安全管理制度漏洞、员工安全培训缺乏、地面工作人员安全意识缺乏及违规操作、恶劣天气是机场飞行区风险演化模型的

关键节点。

根据入出度、节点子网数、所含支链数的分析可知,机场飞行区风险演化的断链关键在于完善飞行区安全管理制度、加强员工安全管理培训、提高地面工作人员安全意识、减少地面工作人员违规操作次数以及对恶劣天气的事前防范。可见,关键断链方案是提高机场飞行区安全管理水平以及人员风险管控能力。

#### 四、结语

在机场飞行区风险源识别的基础上,本文基于复杂网络模型构建了机场飞行区风险演化数学模型以及风险演化拓扑结构模型,从聚类系数、平均路径长度、度分布对机场飞行区风险演化数学模型进行了阐述,从入出度、节点子网数、所含支链数对风险演化拓扑结构模型进行了分析,并提出了风险断链控制方案。从建模的角度,本研究只针对风险演化的拓扑结构构建了模型,对风险演化因素之间的关系模型还有待完善,同时风险演化数学模型的优化将是进一步研究的重点。

#### 参考文献

[1] JAVAUX D. Human error, safety, and systems development in aviation[J]. Reliability Engineering&System Safety, 2002, 75(2): 115-119.  
[2] AHLSTROM U. Work domain analysis for air traffic controller weather displays[J]. Journal of Safety Research, 2005,

36(2): 159-169.

[3] JANIC M. An assessment of risk and safety in civil aviation[J]. Journal of Air Transport Management, 2000, 6(1): 43-50.

[4] ENOMA A, ALLEN S. Developing key performance indicators for airport safety and security[J]. Journal of Air Transport Management, 2007, 25(7): 296-314.

[5] 刘刚, 朱金福. 一种机场安全风险灰色多层次评价方法研究[J]. 人类工效学, 2008, 14(3): 1-4.

[6] 卢炳峰. 民航机场风险评价模型应用探讨[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2008, 25(4): 92-94.

[7] 许红军, 田俊改. 支线机场安全动态预警技术研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(5): 123-128.

[8] 张有富. 机场安全风险[J]. 江苏航空, 2007(2): 4-7.

[9] 王永刚, 张朋鹏. 机场停机坪作业风险管理研究[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(5): 131-133.

[10] 高扬, 李阳. 利用ARIMA(自回归移动平均)模型对跑道侵入事件的分析及预测[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(11): 25-30.

[11] 罗帆, 余廉, 顾必冲. 民航交通灾害预警管理系统框架探讨[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2001, 14(4): 33-36.

[12] 周蓓. 四川省民用航空网络的拓扑结构特征及其演化机制[J]. 经济地理, 2006, 26(4): 577-579.

[13] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286: 509-512.

## Research on the Risks Evolution Model Based on Complex Networks in Airport Flight Area

ZHAO Xian-li LUO Fan  
(Wuhan University of Technology Wuhan 430070 China)

**Abstract** Based on the complex networks model, a mathematical model and a topology model of risks evolution in airport flight area are constructed. The analyses of the mathematical model conclude clustering coefficient, average path length and degree distribution. The analyses of the topology model conclude in-degree, out-degree, node subnet number and the contained branched numbers. The control scheme of risks chain scission is proposed. The results show that safety management system vulnerabilities in airport flight area, lack of employee safety training, the ground staff security awareness and illegal operations and the lack of inclement weather are the crucial nodes of risks evolution model in airport flight area.

**Key words** complex networks; airport flight area; risks evolution