

文章编号:1674-8190(2019)02-187-07

# 跑道侵入风险评价的改进网络层次分析法研究

丁松滨, 刘佳琦, 徐苏

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

**摘要:** 跑道侵入事件已成为威胁航空安全运行的重要因素之一。基于系统工程的思想,从机场、空中交通管制、航空公司三个方面分析造成跑道侵入事件发生的主要因素及其关联关系,并建立风险评价指标体系;利用三角模糊数对传统的网络层次分析法进行改进,基于此建立跑道侵入风险评价研究模型;通过实例分析,找出对跑道侵入风险产生影响的主要因素。结果表明:所用方法可行有效,能够反映出风险因素之间的相互关系,降低了主观判断对指标权重的影响程度,有助于制定预防跑道侵入事件发生的有效措施;管制员工作负荷、管制员情景意识丧失、飞行员操作偏差/疏忽为产生跑道侵入的主要风险因素。

**关键词:** 风险管理;跑道安全;跑道侵入;网络层次分析法;三角模糊数

中图分类号: V328.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.02.006

## Research on Runway Incursion Risk Assessment Based on Improved Analytic Network Process

Ding Songbin, Liu Jiayu, Xu Su

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Runway incursions have become an important factor that threaten the safe operation of aviation. Based on the thoughts of system engineering, main factors causing runway incursion incidents and their associated relationships are analyzed and a runway incursion risk assessment index system is established from three aspects of airports, air traffic control, and airlines; The traditional analytic network process is improved by triangular fuzzy numbers, and a research model for runway incursion risk assessment is established based on this; Through the analysis of examples, the main factors affecting the runway incursion risk are obtained. The results show that the method is feasible and effective, which can reflect the relationship between risk factors and reduce the influence of subjective judgment on the index weight, and help develop effective measures to prevent runway incursions. The workload of controller, lost situation awareness and deviation operation/negligence of pilot are main risk factors during the production of runway incursion.

**Key words:** risk management; runway safety; runway incursion; analytic network process; triangular fuzzy number

## 0 引言

截至 2017 年底,我国共有颁证民用航空机场

229 个,全年我国民用航空运输机场共完成起降架次为 1 024.9 万架次,较 2016 年增长 10.9%<sup>[1]</sup>。为了满足日益增长的民航运输需求,航空公司扩大了

收稿日期:2018-05-24; 修回日期:2018-08-02

通信作者:丁松滨,dingzhili@nuaa.edu.cn

引用格式:丁松滨,刘佳琦,徐苏. 跑道侵入风险评价的改进网络层次分析法研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(2): 187-193.

Ding Songbin, Liu Jiayu, Xu Su. Research on runway incursion risk assessment based on improved analytic network process[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(2): 187-193. (in Chinese)

机队规模,机场方面采取增加跑道数量、跑道入口以及扩大机场设施规模等措施,以此扩增机场容量、提高跑道的使用率。但机场飞行区内交通流量的增大和机场布局的日益复杂程度大大增加了跑道入侵的风险,据 FAA 数据统计,2017 年全年美国共发生了跑道侵入事件 1 742 起,较 2016 年增长 11.7%<sup>[2]</sup>,因此制定有效的跑道侵入事件防范策略已成为保障民航飞机安全运行的重要因素之一。

国际民航组织(ICAO)将跑道侵入定义为:在机场发生的任何飞机、车辆或人员不正确地出现在指定用于飞机着陆和起飞的地面保护区的事件<sup>[3]</sup>。目前,国内外对跑道侵入相关问题做了很多研究。国外主要采用案例研究与数据分析<sup>[4]</sup>、层次分析法、故障树<sup>[5]</sup>等方法以及通过建立统计学模型<sup>[6-7]</sup>、识别跑道侵入中的人为因素<sup>[8]</sup>、机场环境因素等来开展跑道侵入问题研究。国内通过对国际民航组织关于跑道侵入问题的研究进行综合分析<sup>[9]</sup>,主要选取威胁和差错管理模型<sup>[10]</sup>、基于人因可靠性的风险评估模型<sup>[11]</sup>、可拓评价物元模型<sup>[12]</sup>、SHEL-LO 模型<sup>[13]</sup>、模糊集与改进的 TOPSIS 方法<sup>[14]</sup>、模糊综合评价法<sup>[15]</sup>等不同方法开展对跑道侵入问题的研究。

国外学者通常采用数理统计的方法对跑道侵入事件相关的历史数据进行分析,研究角度较为宏观,较少地从影响跑道侵入事件发生的具体因素角度进行分析。国内学者在对跑道侵入风险评估的研究中通常忽略了风险之间的相互影响关系,同时也存在指标体系不够全面的问题。

本文采用系统工程理论思想,从人员、设备、环境、管理四个角度对影响跑道侵入事件发生的关键因素进行分类,建立较为全面的跑道侵入风险评价指标体系;利用三角模糊数对网络层次分析法(Alytic Network Process,简称 ANP)进行改进,并确定指标体系中各影响因素的权重,同时反映出各因素间存在的关联性;通过实例分析,验证该方法的有效性与合理性。

### 1 改进的网络层次分析方法

网络层次分析法是 T. L. Saaty 教授于 1996 年正式提出的,主要解决的是具有反馈性与依赖性的网络决策问题。而跑道侵入风险评估指标体系是一个包含多风险因素的复杂评估系统,其同层指

标和上下层指标之间通常存在着相互作用和依赖性。同时由于评估指标的不确定性、部分定性指标无法具体量化描述的特点,跑道侵入风险评估系统具有很大的模糊性。在确定指标权重时,通常选用主观赋权法,忽略了人的主观判断模糊性。因此,利用三角模糊数对网络层次分析法判断矩阵的构造进行改进,能够降低主观判断对指标权重的影响。

#### 1.1 三角模糊数

设论域  $P$  上的模糊数为  $M$ ,如果  $M$  的隶属度函数  $\mu_M(x)$ 使得  $P \rightarrow [0, 1]$ 表示为式(1),则称  $M$  为三角模糊数。通常三角模糊数  $M$  表示为  $(l, m, u)$ ,其中  $0 \leq l \leq m \leq u$ , $l$  和  $u$  表示  $M$  的下界值和上界值。设三角模糊数  $a_{ij}^t = (l_{ij}^t, m_{ij}^t, u_{ij}^t)$ , $t = 1, 2, \dots, T$ ,表示第  $t$  名专家根据某一准则对第  $i$  个指标和第  $j$  个指标的重要程度进行比较后得出的模糊评价价值<sup>[16]</sup>,根据  $n$  名专家的模糊评价构造模糊矩阵。

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{1}{m-l}x - \frac{l}{m-l} & x \in [l, m] \\ \frac{1}{m-u}x - \frac{u}{m-u} & x \in [m, u] \\ 0 & x \in (-\infty, l] \cup [u, +\infty) \end{cases} \quad (1)$$

#### 1.2 网络层次分析法

网络层次分析法的典型结构由网络控制层和影响网络层组成,如图 1 所示<sup>[17]</sup>。

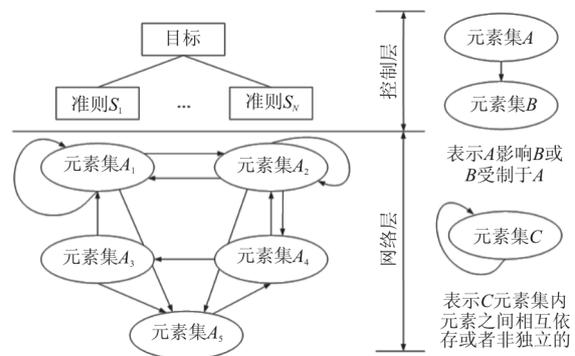


图 1 网络层次分析法典型的层次结构

Fig. 1 Typical hierarchical structure of analytic network process

假设在网络层次结构中,控制层中有元素  $S_1, S_2, \dots, S_N$ ,网络层中含有  $N$  个元素集  $C_1, C_2, \dots, C_N$ ,其中  $C_i$  中有元素  $e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in_i}, (i=1, 2, \dots, N), C_j$  中有元素  $e_{jt} (t=1, 2, \dots, n_j)$ 。分析网络层中各元素间的影响关系,选取被  $C_i$  中元素影响的元素  $e_{jt}$  作为次准则,对  $C_i$  中因素进行两两比较,构造比较判断矩阵,计算出  $C_i$  中元素相对于次准则的归一化权重排序向量  $w_i^{(jt)} = (w_{i1}^{(jt)}, w_{i2}^{(jt)}, \dots, w_{in_i}^{(jt)})^T$ ,由此可得  $C_i$  中所有元素对  $C_j$  中元素的影响作用排列矩阵  $w_{ij} = (w_i^{(j1)}, w_i^{(j2)}, \dots, w_i^{(jn_j)})^T$ 。以此类推,最终可获得在  $S_N$  准则下的超矩阵

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{N1} & w_{N2} & \dots & w_{NN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

超矩阵  $W$  只考虑到单一元素集对次准则的影响,因此超矩阵  $W$  的列向量不是归一化的。把每个元素集作为一个元素,以  $S_N$  作为准则,对元素集之间进行重要度比较,得到其他元素集的归一化权重排序向量  $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{Nj})^T, a_{ij}$  表示第  $i$  个元素集对第  $j$  个元素集的影响权值,进而可以得到反馈影响加权矩阵

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1N} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

构造加权超矩阵  $\bar{W} = (\bar{W}_{ij})$ ,其中  $\bar{W}_{ij} = a_{ij} W_{ij}, i, j=1, 2, \dots, N$ 。在  $k \rightarrow \infty$  时,  $\bar{W}$  的  $k$  次幂  $\bar{W}^k$  极限存在,即  $\bar{W}^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} \bar{W}^k, \bar{W}^\infty$  即为极限超矩阵,其第  $j$  列为控制准则下网络层各元素对于元素  $j$  的极限相对排序。

### 1.3 利用三角模糊数的网络层次分析法

在对网络层次分析法判断矩阵构造的过程中使用三角模糊数,具体分为三步。

**Step1** 采用三角模糊数构造判断矩阵  $F = (M_{ij})$ ,其中

$$M_{ij} = \frac{1}{T} \otimes (a_{ij}^1 + a_{ij}^2 + \dots + a_{ij}^t) \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$

**Step2** 计算元素集  $C_k$  中元素  $i$  的综合模糊值  $D_i^k$  即初始权重值

$$D_i^k = \sum_{j=1}^n M_{ij}^k \otimes \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij}^k \right)^{-1} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

**Step3** 将得到的综合模糊值去模糊化。 $M_1 (l_1, m_1, u_1)$  和  $M_2 (l_2, m_2, u_2)$  为两个三角模糊数,定义  $M_1 \geq M_2$  的可能度为

$$v(M_1 \geq M_2) = \sup_{x \geq y} \{ \min[u_{M_1}(x), u_{M_2}(y)] \} \quad (6)$$

$$v(M_1 \geq M_2) = \mu(d) = \begin{cases} 1 & m_1 \geq m_2 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)} & m_1 < m_2, u_1 \geq l_2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

定义一个模糊数大于其他  $K$  个模糊数的可能度为

$$v(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = \min v(M \geq M_i) \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (8)$$

令  $z'(c_i) = \min v(M_i \geq M_k), i = 1, 2, \dots, K$ ,则可得  $Z' = [z'(c_1), z'(c_2), \dots, z'(c_n)]^T$ ,将  $Z'$  做归一化处理得到构造超矩阵所需的指标排序向量  $Z = [z(c_1), z(c_2), \dots, z(c_n)]^T$ 。

## 2 构建跑道侵入风险评价网络层次结构模型

### 2.1 建立跑道侵入风险评价指标体系

跑道侵入风险管理涉及到机场、空中交通管制、航空公司三个方面和多种因素,是一个整体的、复杂的、动态的系统。人一机一环境系统工程理论将“人一机一环境”作为系统中的三大要素,研究各个要素间信息传输的相互关系。基于此系统工程思想,并充分考虑管理因素对跑道侵入风险管理的作用,从人员、设备、环境、管理四个角度对影响跑道侵入事件发生的风险因素进行分类,结合国内外跑道侵入实际案例的属性与相关专家的研究成果<sup>[3-5,13-15,18]</sup>建立跑道侵入风险评价指标体系,如表 1 所示。

### 2.2 跑道侵入风险评价的网络层次结构模型

综合分析所构建指标体系中各级指标之间的

相互作用关系,构建跑道侵入风险评估网络层次结构模型,如图 2 所示。

表 1 跑道侵入风险评估指标体系 R  
Table 1 Runway incursion risk assessment index system R

目标层	因素层	指标层
跑道侵入风险评估指标体系 R	管制员风险 $R_1$	短时遗忘 $R_{11}$
		情景意识丧失 $R_{12}$
		未使用规范无线电通话用语 $R_{13}$
		工作负荷 $R_{14}$
		发布过长或复杂指令 $R_{15}$
		未确认复诵与发出许可一致 $R_{16}$
	飞行员风险 $R_2$	情景意识丧失 $R_{21}$
		对机场的熟悉程度 $R_{22}$
		未使用标准复诵程序 $R_{23}$
		未遵从管制员指令 $R_{24}$
		紧急情况处理能力 $R_{25}$
		操作偏差/疏忽 $R_{26}$
	车辆驾驶员/行人 $R_3$	未遵从管制员指令 $R_{31}$
		位置报告不准确 $R_{32}$
	环境风险 $R_4$	跑道、滑行道复杂度 $R_{41}$
		标志、标记牌、灯光 $R_{42}$
		能见度 $R_{43}$
		机场飞行区交通流量 $R_{44}$
穿越跑道次数 $R_{45}$		
设备风险 $R_5$	通信设备故障 $R_{51}$	
	无线电通话被干扰 $R_{52}$	
	监控/预警系统受限 $R_{53}$	
管理风险 $R_6$	人员培训程度 $R_{61}$	
	安全规章制度建设 $R_{62}$	
	安全意识与态度 $R_{63}$	

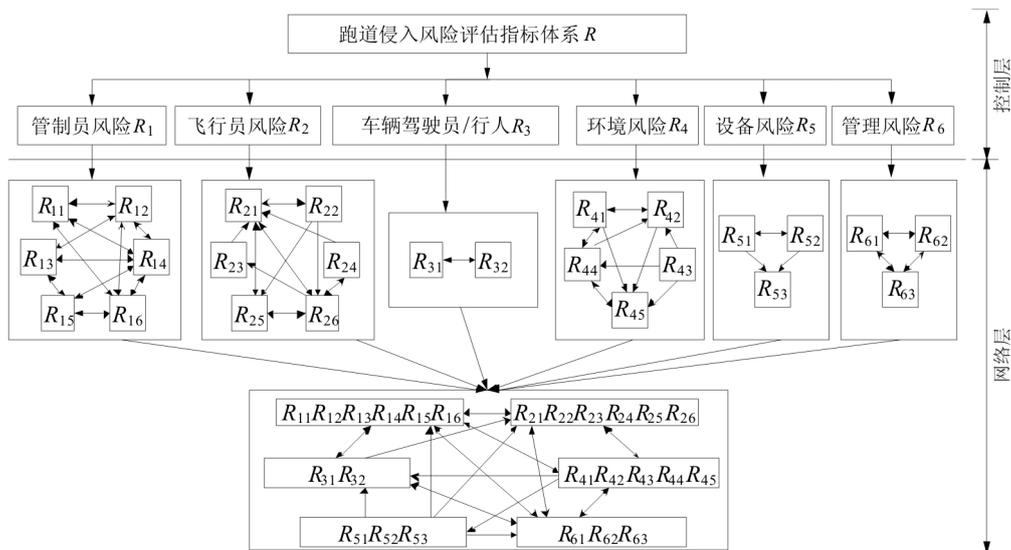


图 2 跑道侵入风险评估网络层次结构模型

Fig. 2 Hierarchical structure model of runway incursion risk assessment

### 3 实例分析

机场飞行区交通流量的增加将会提升跑道侵入事件发生的风险,因此,选取国内某干线机场作为实例分析对象,分析结果将更具有针对性与实际意义。依据上述跑道侵入风险评估网络层次结构模型,利用改进的网络层次分析法对该干线机场跑道侵入风险进行研究。

#### 3.1 构造未加权的初始超级矩阵

采用传统的 1~9 标度法,根据准则对该机场跑道侵入风险评估网络层次结构模型中的各因素进行两两重要度比较,利用三角模糊数表征专家的重要度判断决策,构建模糊判断矩阵,通过去模糊化得到各指标因素的权重,进而得到初始加权超矩阵。分别以一级指标管制员风险  $R_1$  元素集中的

各元素作为评估基本单元,基本单元的影响将通过元素集  $R_1$  中其他元素的两两重要度比较获得。以  $R_{11}$  短时遗忘作为评估基本单元为例,根据三位国内民航业专家的判断决策,得到指标元素  $R_{12}$ 、 $R_{14}$ 、 $R_{16}$  间的三个成对比较矩阵。

$$\begin{aligned}
 H_{11} &= \begin{bmatrix} (1,1,1) & (1,2,3) & (1/3,1/2,1) \\ (1/3,1/2,1) & (1,1,1) & (1/3,1/2,1) \\ (1,2,3) & (1,2,3) & (1,1,1) \end{bmatrix} \\
 H_{12} &= \begin{bmatrix} (1,1,1) & (1,2,3) & (1/3,1/2,1) \\ (1/3,1/2,1) & (1,1,1) & (1/5,1/4,1/3) \\ (1,2,3) & (3,4,5) & (1,1,1) \end{bmatrix} \\
 H_{13} &= \begin{bmatrix} (1,1,1) & (1,2,3) & (1/3,1/2,1) \\ (1/3,1/2,1) & (1,1,1) & (1/4,1/3,1/2) \\ (1,2,3) & (3,4,5) & (1,1,1) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

利用式(4)综合整理判断矩阵  $H_{11}$ 、 $H_{12}$ 、 $H_{13}$  中的三角模糊评判值,得到模糊判断矩阵  $F$

$$F = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (1.00,2.00,3.00) & (0.33,0.50,1.00) \\ (0.33,0.50,1.00) & (1,1,1) & (0.26,0.36,0.61) \\ (1.00,2.00,3.00) & (2.33,3.33,4.33) & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

利用式(5),计算出  $R_{12}$ 、 $R_{14}$ 、 $R_{16}$  的初始权重值,分别为

$$D_{R_{12}}^1 = (0.146, 0.299, 0.606)$$

$$D_{R_{14}}^1 = (0.100, 0.159, 0.316)$$

$$D_{R_{16}}^1 = (0.272, 0.541, 1.000)$$

根据式(6)~式(8),对初始权重值  $D_{R_{12}}^1$ 、 $D_{R_{14}}^1$ 、 $D_{R_{16}}^1$  去模糊化,  $R_{12}$  指标初始权重值大于  $R_{14}$ 、 $R_{16}$  指标初始权重值的可能度为

$$v(D_{R_{12}}^1 \geq D_{R_{14}}^1) = 1$$

$$v(D_{R_{12}}^1 \geq D_{R_{16}}^1) = 1$$

$$v(D_{R_{12}}^1 \geq D_{R_{14}}^1, D_{R_{16}}^1) = \min(1, 0.580) = 0.580$$

同理,可得

$$v(D_{R_{14}}^1 \geq D_{R_{12}}^1, D_{R_{16}}^1) = 0.142$$

$$v(D_{R_{16}}^1 \geq D_{R_{12}}^1, D_{R_{14}}^1) = 1$$

将结果做标准化处理可得归一化权重向量  $Z = (0.337, 0.082, 0.581)^T$ ,  $Z$  即  $R_{12}$ 、 $R_{14}$ 、 $R_{16}$  相对于  $R_{11}$  的归一化权重排序向量,由此可得  $w_1^{(11)} = (0, 0.337, 0, 0.082, 0, 0.581)^T$ , 同理最终可计算出

$$w_{11} = (w_1^{(11)}, w_1^{(12)}, \dots, w_1^{(16)})^T$$

$$= \begin{bmatrix} 0.000 & 0.256 & 0.000 & 0.238 & 0.000 & 0.225 \\ 0.337 & 0.000 & 0.387 & 0.367 & 0.000 & 0.297 \\ 0.000 & 0.138 & 0.000 & 0.143 & 0.143 & 0.000 \\ 0.082 & 0.478 & 0.443 & 0.000 & 0.571 & 0.377 \\ 0.000 & 0.000 & 0.170 & 0.096 & 0.000 & 0.101 \\ 0.581 & 0.128 & 0.000 & 0.156 & 0.286 & 0.000 \end{bmatrix}$$

以此类推,可以得到二级指标未加权超矩阵

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & w_{14} & w_{15} & w_{16} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & w_{24} & w_{25} & w_{26} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & w_{34} & w_{35} & w_{36} \\ w_{41} & w_{42} & w_{43} & w_{44} & w_{45} & w_{46} \\ w_{51} & w_{52} & w_{53} & w_{54} & w_{55} & w_{56} \\ w_{61} & w_{62} & w_{63} & w_{64} & w_{65} & w_{66} \end{bmatrix}$$

#### 3.2 建立指标元素集的权矩阵

指标元素集权重矩阵的计算采用与计算二级指标初始超级矩阵相同的方法,将  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$  元素集作为一个元素,针对其中某个元素集进行两两重要度比较,得到以该元素集作为准则下其他元素集的归一化排序向量  $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{6j})^T$ ,

整合后可得指标元素集权重矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0.345 & 0.389 & 0.391 & 0.309 & 0.314 & 0.306 \\ 0.183 & 0.188 & 0.195 & 0.206 & 0.193 & 0.213 \\ 0.120 & 0.000 & 0.138 & 0.127 & 0.123 & 0.144 \\ 0.109 & 0.124 & 0.000 & 0.088 & 0.000 & 0.118 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.052 & 0.080 & 0.000 \\ 0.243 & 0.299 & 0.276 & 0.218 & 0.290 & 0.219 \end{bmatrix}$$

### 3.3 超矩阵运算

首先,根据二级指标初始超矩阵  $W$  与指标元素集权重矩阵  $A$  计算二级指标加权超矩阵  $\bar{W}$ ,其中  $\bar{W} = (\bar{W}_{ij})$ ,  $\bar{W}_{ij} = a_{ij} W_{ij}$ 。然后计算加权超矩阵  $\bar{W}$  的无穷次幂,即极限超矩阵  $\bar{W}^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} \bar{W}^k$ ,计算得到的矩阵逐渐收敛到一个固定数值,所得数值即为二级指标权重值,具体结果如表 2 所示。

表 2 跑道侵入风险评估指标权重值

Table 2 Weight values of runway incursion risk assessment indexes

目标层	因素层	指标层	
跑道侵入风险评估指标体系 $R$	管制员风险 $R_1$	$R_{11} = 0.081$	
		$R_{12} = 0.087$	
		$R_{13} = 0.063$	
		$R_{14} = 0.109$	
		$R_{15} = 0.049$	
		$R_{16} = 0.067$	
	飞行员风险 $R_2$	$R_{21} = 0.075$	
		$R_{22} = 0.014$	
		$R_{23} = 0.029$	
		$R_{24} = 0.018$	
		$R_{25} = 0.051$	
		$R_{26} = 0.083$	
	车辆驾驶员/行人 $R_3$	$R_{31} = 0.021$	
		$R_{32} = 0.033$	
		$R_{41} = 0.014$	
		$R_{42} = 0.013$	
		环境风险 $R_4$	$R_{43} = 0.011$
			$R_{44} = 0.017$
	$R_{45} = 0.030$		
	设备风险 $R_5$	$R_{51} = 0.009$	
		$R_{52} = 0.003$	
		$R_{53} = 0.013$	
	管理风险 $R_6$	$R_{61} = 0.031$	
		$R_{62} = 0.060$	
		$R_{63} = 0.019$	

### 3.4 结果分析

从表 2 可以看出:管制员工作负荷(0.109)、管制员情景意识丧失(0.087)、飞行员操作偏差/疏忽(0.083)为产生跑道侵入的主要风险因素。通过对识别的指标元素和跑道侵入风险评估网络层次建模的整体分析可见,权重值较高的指标对其他风险因素的影响范围较大或较易受到其他风险因素影响,使得跑道侵入事件的不安全状态产生了传递,增加了系统整体风险事件发生的概率。

## 4 结论

(1) 本文从机场、空中交通管制、航空公司三个方面对造成跑道侵入风险的风险源因素进行识别,采用系统工程思想,从人员—环境—设备—管理四个角度出发,将跑道侵入风险源因素分类并建立指标体系。结合三角模糊数与网络层次分析法,构建跑道侵入风险评估二级指标初始超矩阵与指标元素集权重矩阵,通过计算得出管制员工作负荷、管制员情景意识丧失、飞行员操作偏差/疏忽为产生跑道侵入的主要风险因素。

(2) 根据改进的跑道侵入风险评估网络层次模型,不仅可以得出指标元素的相对重要度排序与各指标元素之间的相互影响关系,同时避免了人的主观判断的影响。基于此可以更好地提高机场跑道侵入风险管理的有效性与针对性,并为进一步对跑道侵入风险程度进行评估奠定基础。

### 参考文献

- [1] 中国民航局发展计划司. 2017 年民航机场生产统计公报 [DB/OL]. [2018-05-24] [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201803/t20180307\\_55600.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201803/t20180307_55600.html), 2018-03-07/2018-04-18.  
Department of Development Planning of CAAC. 2017 civil aviation airport production statistics bulletin [DB/OL]. [2018-05-24] [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201803/t20180307\\_55600.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201803/t20180307_55600.html), 2018-03-07/2018-04-18. (in Chinese)
- [2] FAA. Runway incursion totals by quarter FY2017vs. FY 2016 [DB/OL]. [2018-05-24] [https://www.faa.gov/airports/runway\\_safety/statistics/year/?fy1=2017&fy2=2016](https://www.faa.gov/airports/runway_safety/statistics/year/?fy1=2017&fy2=2016), 2018-04-16/2018-04-18.
- [3] ICAO. Manual on the prevention of runway incursions [M]. Montreal Canada: Secretary General, 2007.

- [4] 比尔·克拉克. 跑道侵入[M]. 赵洪元, 译. 北京: 中国民航出版社, 2005.  
Bill Clarke. Runway Incursions[M]. Translated by Zhao Hongyuan. Beijing: Civil Aviation Publishing House of China, 2005. (in Chinese)
- [5] Kim D, Yang H. Evaluation of the risk frequency for hazards of runway incursion in Korea[J]. Journal of Air Transport Management, 2012, 23(7): 31-35.
- [6] Wilke S, Majumdar A, Ochieng W Y. Modelling runway incursion severity[J]. Accident Analysis and Prevention, 2015, 79: 88-99.
- [7] Mathew J K, Major W L, Hubbard S M, et al. Statistical modelling of runway incursion occurrences in the United States[J]. Journal of Air Transport Management, 2017, 65: 54-62.
- [8] Adam G L, Lentz R H, Bair R W. Study of the causes of runway incursions and related incidents[C]//Control Applications, First IEEE Conference on IEEE, 2002(1): 539-543.
- [9] 孙瑞山, 马平. 跑道侵入初步研究[J]. 中国民航大学学报, 2007, 25(增刊1): 85-87.  
Sun Ruishan, Ma Ping. Preliminary study on runway incursion[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2007, 25(S1): 85-87. (in Chinese)
- [10] 霍志勤. 基于历史数据的中国民航跑道安全管理关键问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
Huo Zhiqin. Key issue research on runway safety management of China civil aviation based on historical data[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [11] 许桂梅, 黄圣国. 基于人因可靠性的跑道侵入风险定量分析研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(19): 4715-4719.  
Xu Guimei, Huang Shengguo. Runway incursion risk assessment model based on HRA[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(19): 4715-4719. (in Chinese)
- [12] 许桂梅, 黄圣国. 基于改进关联函数的跑道侵入风险可拓评价[J]. 人类工效学, 2010, 16(4): 56-59.  
Xu Guimei, Huang Shengguo. Extension evaluation for runway incursion risk based on improved correlation function[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2010, 16(4): 56-59. (in Chinese)
- [13] Chang Y H, Wong K M. Human risk factors associated with runway incursions[J]. Journal of Air Transport Management, 2012, 24(24): 25-30.
- [14] 罗军, 林雪宁. 基于模糊集和改进 TOPSIS 方法的跑道侵入风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(12): 116-121.  
Luo Jun, Lin Xuening. Runway incursion risk assessment based on fuzzy sets theory and improved TOPSIS method[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(12): 116-121. (in Chinese)
- [15] 卢飞, 张宗路, 张兆宁. 基于网络层次分析法的跑道侵入风险模糊评价[J]. 中国民航大学学报, 2014, 32(1): 10-14.  
Lu Fei, Zhang Zonglu, Zhang Zhaoning. Fuzzy comprehensive evaluation of runway incursion risk based on analytic network process[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2014, 32(1): 10-14. (in Chinese)
- [16] 肖钰, 李华. 基于三角模糊数的判断矩阵的改进及其应用[J]. 模糊系统与数学, 2003, 17(2): 59-64.  
Xiao Yu, Li Hua. Improvement on judgement matrix based on triangle fuzzy number[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2003, 17(2): 59-64. (in Chinese)
- [17] 孙宏才. 网络层次分析法与决策科学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 148-162.  
Sun Hongcai. Analytic network process and decision science[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 148-162. (in Chinese)
- [18] 中国民用航空局空管行业管理办公室. IB-TM-2013-002 民航空管防止跑道侵入指导材料[S]. 北京: 中国民用航空局, 2013.  
Office of Air Traffic Regulation of CAAC. IB-TM-2013-002 Guidance for preventing runway incursion of civil aviation air traffic management[S]. Beijing: CAAC, 2013. (in Chinese)

### 作者简介:

丁松滨(1964—),男,博士,教授。主要研究方向:飞行系统安全与人为因素、飞行性能工程。

刘佳琦(1993—),女,硕士研究生。主要研究方向:飞行系统安全与人为因素、飞行性能工程。

徐 苏(1996—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行系统安全与人为因素、飞行性能工程。

(编辑:赵毓梅)