

# 基于区间反幂法的机场运行安全不确定性评估策略

王中叶, 刘峰, 胡明华, 张洪海

(南京航空航天大学 民航/飞行学院, 江苏 南京 211106)

**摘要:**为保证民航机场始终处于安全适用状态,对机场运行安全进行全面评估非常必要。针对机场运行安全评估中的不确定性和常用层次分析方法的不足,研究一种改进的层次分析方法,通过估计区间判断矩阵的谱半径,并将其作为位移,提出了一种带有位移的区间反幂法,并将此算法用于机场运行安全评估中。实际算例的数值计算表明本算法能够综合考虑机场运行安全评估中的确定性和不确定性,根据机场运行监控决策者的偏好信息,综合计算机场运行安全评价指标的组合权重区间和相对重要程度,比传统的层次分析方法更具有有效性和灵活性,非常适用于机场运行安全不确定评估工作中。

**关键词:**机场运行安全;不确定性评估;区间判断矩阵;层次分析法;区间反幂法  
**中图分类号:** TG156      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-2758(2019)05-1028-08

机场作为民用航空的重要基础设施之一,其运行安全关系整个航空运输系统的安全与效率。机场运行安全以预防监控为主,为保证民航机场始终处于安全适用状态,对机场运行安全进行评估非常必要<sup>[1]</sup>。然而机场系统本身所具有的复杂性导致其存在一些难以度量的因素,机场运行安全在“部分确知,部分不确定”的状态下,具有很高的灰色性<sup>[2]</sup>。因此,机场运行安全评估过程中,除了要考虑其确定性,专家主观上的不确定性以及评估过程中的随机性也是不可避免的。因此,针对这些不确定性以及随机性进行研究就成为了目前机场运行安全评估的关键所在。

实际应用中,常常利用层次分析法(AHP)及其变型<sup>[3-8]</sup>对机场运行安全进行评估。层次分析法的基本原理是对一个复杂问题进行分解,将分解后的各个指标按照支配关系进行重组,最终形成一个有序的递阶层次结构。通过将各个指标进行两两比较,确定层次中各个指标的相对重要性,最后结合专家的判断来给出决策各个指标相对重要性的总排序。

当通过定量描述方法难以解决决策问题时,层次分析法给予了决策者极大的便利,因此层次分析

法广泛应用于各个科学领域。然而,层次分析法也存在一定的不足。首先由于人们在建立判断矩阵过程中对指标的把握不能做到百分之百精确,这就使得权重结果会因为人的主观因素存在较大的误差;其次判断矩阵的构造带有明显的个人色彩,数值化的数据也意味着可能存在误差,人们根据经验所得出的判断往往不是一个确定的数。例如,将A,B方案进行比较,根据实际经验得出A方案比B方案重要程度在4~5之间。显然,通过量化的方法确定模糊量,或者将模糊量变成没有弹性的硬指标是不合理的。因此,近年来国内外专家引入区间判断矩阵,利用区间数模拟人们在判断过程当中的主观模糊性,并保证信息的完整性<sup>[9-10]</sup>。主观判断产生的不确定性导致了区间判断矩阵的相关研究较为复杂,因此Saaty等<sup>[11]</sup>通过分析不确定因素,给出区间判断矩阵的排序权值。Arbel利用线性规划模型给出了区间判断矩阵排序权值的另一种方法,但仅考虑了一致性区间判断矩阵<sup>[12]</sup>的情况。随后,Arbel等又讨论了不一致性区间判断矩阵的情形<sup>[13]</sup>,并给出了求解排序权值的方法。文献[14]提出了基于区间运算的区间幂法,区间运算问题的相关理论,见文献[15-16]。

本文针对机场运行安全评估的特点和传统层次分析方法的不足,综合考虑评估的确定性和不确定性,引入估计区间判断矩阵的谱半径,并将其做为位移,提出一个带有位移的区间反幂法,以提高其收敛速度,并结合计算机场运行安全指标的权重区间以及相对重要程度,将其用于中国某机场运行安全评估中。

## 1 基于区间运算的区间幂法

首先介绍区间分析的相关概念。

设  $I(\mathbf{R})$  表示闭实区间数的全体,  $I(\mathbf{R}^n)$  表示  $n$  维实区间向量,  $I(\mathbf{R}^{n \times n})$  表示全体  $n$  维实区间矩阵的集合。

设  $X^I = [x, \bar{x}] = \{x \mid x \leq x \leq \bar{x}, x, \bar{x} \in \mathbf{R}\}$ , 其中  $\mathbf{R}$  表示全体实数的集合, 显然  $X^I \in I(\mathbf{R})$ 。

设  $X^I, Y^I \in I(\mathbf{R})$ ,  $X^I = [x, \bar{x}]$ ,  $Y^I = [y, \bar{y}]$ , 则  $X^I$  和  $Y^I$  的加减乘除四则运算定义为

$$X^I + Y^I = [x, \bar{x}] + [y, \bar{y}] = [x + y, \bar{x} + \bar{y}] \quad (1)$$

$$X^I - Y^I = [x, \bar{x}] - [y, \bar{y}] = [x - \bar{y}, \bar{x} - y] \quad (2)$$

$$X^I \times Y^I = [x, \bar{x}] \times [y, \bar{y}] = [\min(x \cdot y, x \cdot \bar{y}, \bar{x} \cdot y, \bar{x} \cdot \bar{y}), \max(x \cdot y, x \cdot \bar{y}, \bar{x} \cdot y, \bar{x} \cdot \bar{y})] \quad (3)$$

$$\frac{X^I}{Y^I} = \frac{[x, \bar{x}]}{[y, \bar{y}]} = [x, \bar{x}] \left[ \frac{1}{\bar{y}}, \frac{1}{y} \right],$$

$$(当 0 \notin [y, \bar{y}] 时) \quad (4)$$

设  $A^I = (A^I_{ij}), B^I = (B^I_{ij})$  为  $n$  维实区间矩阵, 则实矩阵加减法以及乘法的定义如下

$$A^I \pm B^I = (A^I_{ij} \pm B^I_{ij}), A^I B^I = \left( \sum_{v=1}^n A^I_{iv} B^I_{vj} \right) \quad (5)$$

考虑求解以下区间判断矩阵按模最大特征值问题

$$A^I x^I = \lambda_{\max} x^I \quad (6)$$

式中,  $A^I = [A, \bar{A}]$  是区间判断矩阵,  $\lambda_{\max}$  是  $A^I$  的按模最大的特征值,  $x^I = [x, \bar{x}]$  是  $\lambda_{\max}$  对应的区间特征向量。类似于实矩阵, 可以利用区间幂法计算按模最大的特征值及其对应的区间特征向量。

从而区间判断矩阵的区间幂法算法表述如下:

区间幂法:

设  $A^I = [A, \bar{A}]$ 。利用区间幂法可以计算  $A^I$  的

按模最大的特征值  $\lambda_1$  及其对应的区间特征向量  $x^I_1$ 。

1) 任意给定初始非负区间向量

$$u^I_0 = (u_0^{(1)}, u_0^{(2)}, \dots, u_0^{(n)}) = ([u_0^{(1)}, \bar{u}_0^{(1)}], [u_0^{(2)}, \bar{u}_0^{(2)}], \dots, [u_0^{(n)}, \bar{u}_0^{(n)}])$$

$$k = 1$$

计算  $m_0 = \|u_0\| = \max_i |u_0^{(i)}| = \max_i |\bar{u}_0^{(i)}|; v^I_0 = \frac{u^I_0}{m_0}$

2) 迭代

$$u^I_{k+1} = A^I v^I_k = \left( \sum_{r=1}^n A^I_{ir} v_k^{(r)} \right) = \left( \sum_{r=1}^n [a_{ir}, \bar{a}_{ir}] [v_k^{(r)}, \bar{v}_k^{(r)}] \right) = \left( \left[ \sum_{r=1}^n a_{ir} v_k^{(r)}, \sum_{r=1}^n \bar{a}_{ir} \bar{v}_k^{(r)} \right] \right)$$

$$m_{k+1} = \|u^I_{k+1}\| = \max_i |\bar{u}_{k+1}^{(i)}|$$

$$v^I_{k+1} = \frac{u^I_{k+1}}{m_{k+1}}$$

3) 检验  $\|u^I_{k+1} - u^I_k\| = \max_i |u_{k+1}^{(i)} - u_k^{(i)}| \leq \varepsilon$ ,

若不成立, 则  $k = k + 1$ , 转步骤 2); 否则继续。

4) 归一化  $v^I_{k+1}$

$$x^I_1 = \frac{v^I_{k+1}}{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (v_{k+1}^{(i)} + \bar{v}_{k+1}^{(i)})}; \lambda_1 = m_{k+1}$$

$\lambda_1$  就是所求的按模最大的特征值, 且  $x^I_1$  是其对应的区间特征向量。

## 2 带有位移的区间反幂法

求矩阵按模最小特征值, 可以利用反幂法, 求矩阵按模最大的特征值及其相应的特征向量, 可以利用带有位移的幂法。用矩阵  $A - qI$  代替  $A$  应用幂法, 即把幂法应用于矩阵  $(A - qI)^{-1}, q \neq \lambda_i$ , 其迭代公式为

$$\left. \begin{aligned} z_k &= \frac{y_k}{m_k} \\ (A - qI)y_{k+1} &= z_k \end{aligned} \right\} k = 0, 1, 2, \dots, \quad (7)$$

式中,  $m_k = \max(y_k), q$  为  $A$  的谱半径估计的上界, 则

$$z_k \rightarrow \frac{x_1}{\max(x_1)} (k \rightarrow \infty), q + \frac{1}{m_k} \rightarrow \lambda_1 (k \rightarrow \infty) \quad (8)$$

其收敛商为  $|\lambda_1 - q| / \min_{i \neq 1} |\lambda_i - q|$ ,  $q$  越接近于  $\lambda_1$ , 收敛速度就越快。为求按模最大的特征值  $\lambda_1$ , 位移  $q$  可取谱半径估计的上界, 可以由以下定理进行估计。

**定理**<sup>[14]</sup> 设  $A$  为  $n$  维非负不可约矩阵,  $B = (I + A)^{n-1}$ , 其中  $I$  为  $n$  维单位矩阵, 则对任意正整数  $k$ , 有

$$\begin{cases} \min_i \frac{r_i(AB^k)}{r_i(B^k)} \leq \rho(A) \leq \max_i \frac{r_i(AB^k)}{r_i(B^k)} \\ \min_i \frac{c_i(AB^k)}{c_i(B^k)} \leq \rho(A) \leq \max_i \frac{c_i(AB^k)}{c_i(B^k)} \end{cases} \quad (9)$$

把谱半径估计上界作为位移  $q$ , 很好地逼近谱半径  $\rho(A)$ , 并且其收敛商  $|\lambda_1 - q| / \min_{i \neq 1} |\lambda_i - q|$  较小, 收敛速度较快。

将带有位移的反幂法进行推广, 得到带位移的区间反幂法, 其迭代格式表示如下

$$\left. \begin{aligned} z_k^I &= \frac{y_k^I}{m_k} \\ (A^I - \bar{\lambda}_i E^I) y_{k+1}^I &= z_k^I \end{aligned} \right\} k = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

式中,  $m_k = \max_i |y_k^{(i)}|$ ,  $\bar{\lambda}_i$  为  $\bar{A}$  的谱半径估计的上界,  $E^I$  为区间单位矩阵。

从而

$$z_k^I \rightarrow \frac{x_1}{\max(x_1)} (k \rightarrow \infty), \bar{\lambda}_i + \frac{1}{m_k} \rightarrow \lambda_1 (k \rightarrow \infty). \quad (11)$$

从而可以得到区间判断矩阵的带有位移的区间反幂法算法。

带有位移的区间反幂法算法:

设  $A^I = [A, \bar{A}]$ 。应用区间反幂法可以计算  $A^I$  的按模最大的特征值  $\lambda_1$  及其对应的区间特征向量  $x_1^I$ 。

1) 任意给定初始非负区间向量

$$\begin{aligned} y_0^I &= (y_0^{(1)}, y_0^{(2)}, \dots, y_0^{(n)}) = \\ &= ([\underline{y}_0^{(1)}, \overline{y}_0^{(1)}], [\underline{y}_0^{(2)}, \overline{y}_0^{(2)}], \dots, [\underline{y}_0^{(n)}, \overline{y}_0^{(n)}]) \end{aligned} \quad (12)$$

$$k = 1$$

$$\bar{\lambda}_i = \text{pubjgi2}(\bar{A})$$

$$(选取位移为 \bar{A} 的谱半径估计的上界) \quad (13)$$

计算

$$m_0 = \|y_0\| = \max_i |y_0^{(i)}| = \max_i |\overline{y}_0^{(i)}|, \quad (14)$$

$$z_0^I = \frac{y_0^I}{m_0}, \quad (15)$$

由  $(A^I - \bar{\lambda}_i E^I) y_1^I = z_0^I$ , 得  $y_1^I$ 。

2) 迭代

$$m_k = \|y_k\| = \max_i |y_k^{(i)}| = \max_i |\overline{y}_k^{(i)}| \quad (16)$$

$$z_k^I = \frac{y_k^I}{m_k} \quad (17)$$

由  $(A^I - \bar{\lambda}_i E^I) y_{k+1}^I = z_k^I$ , 得  $y_{k+1}^I$ 。

3) 检验  $\|y_{k+1}^I - y_k^I\| = \max_i |y_{k+1}^{(i)} - y_k^{(i)}| \leq \varepsilon$ , 若不成立, 则  $k = k + 1$ , 转步骤 2); 否则继续。

4) 归一化  $z_{k+1}^I$

$$x_1^I = \frac{z_k^I}{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (z_k^{(i)} + \overline{z}_k^{(i)})} \quad (18)$$

$$\lambda_1 = \bar{\lambda}_i + \frac{1}{m_k} \quad (19)$$

$\lambda_1$  就是所求的按模最大的特征值,  $x_1^I$  是其对应的区间特征向量。

### 3 实验分析

#### 3.1 建立机场安全评估指标

鉴于机场运行安全风险存在一定的随机性和较高的不确定性, 机场运行安全评价指标的选取, 既需要全方位考虑到反映机场运行过程中存在的各种潜在风险, 还应体现机场安全评估的客观性以及主观性。本文以中国某机场为例, 对其运行安全进行评估, 并通过数值实验分析实际情况。采用文献[1]收集的中国某大型机场 6 年内发生的运行不安全事件, 通过 HFACS (human factors analysis and classification system) 方法<sup>[17]</sup> 分析不安全事件发生的基本原因 (如表 1 所示), 可以构造运行安全评估指标的递阶层次结构 (如图 1 所示), 其中 HFACS 方法在事件分析中作为人因分类工具, 定义了不安全行为、不安全行为的前提条件、不安全的监督和组织影响四个层次的失效。根据系统论创始人贝塔朗非<sup>[18]</sup> 的观点, 系统与系统之间以及系统内部之间是相互关联, 并与环境相互联系组成的集合。从系统论的观点出发, 与机场运行安全有关的因素可以划分为 4 类: 人、设备、环境以及管理, 具有高度的不确定性, 如表 1 与图 1 所示。

表 1 机场运行不安全事件基本原因统计

年份	人员心理和生理素质	人员技能	安全意识	明确工作职责	违规操作	交流合作	安全教育和技能培训	维护保养水平
2007	5	24	64	10	31	16	55	12
2008	6	30	82	8	22	6	85	17
2009	3	31	64	7	18	12	64	13
2010	8	42	75	8	34	29	73	17
2011	7	41	80	8	36	15	74	20
2012	6	36	72	6	18	15	75	30

年份	设备故障	净空条件	地面环境	安全管理工作	管理者能力	天气	安全文化建设	安全监督
2007	16	12	21	21	3	6	50	38
2008	21	7	45	11	4	3	72	58
2009	23	9	18	14	3	3	52	35
2010	30	19	20	23	5	10	63	53
2011	27	11	27	6	5	6	65	40
2012	30	15	18	24	4	12	60	36

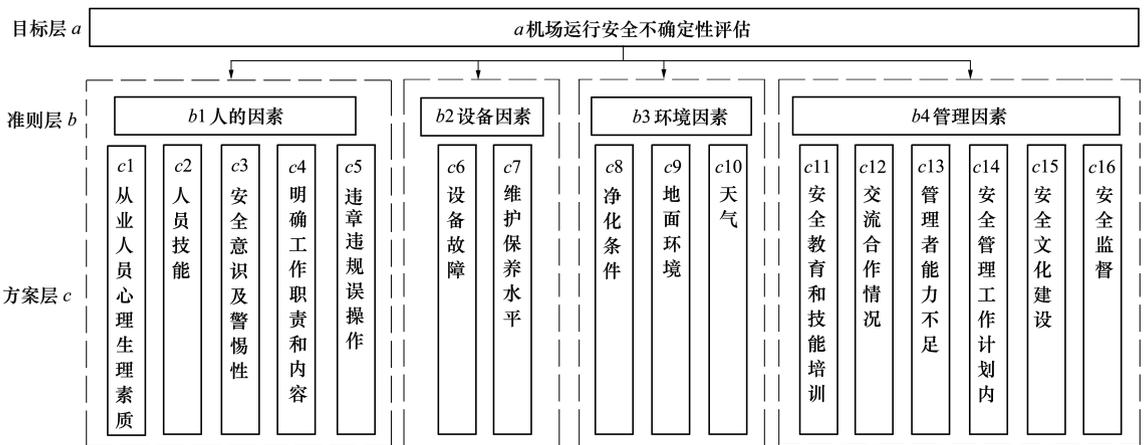


图 1 机场运行安全评估指标递阶层次结构

### 3.2 建立区间判断矩阵

本文中采用区间层次分析法 (IAHP)<sup>[19]</sup>, 通过两两判断得到区间判断矩阵时, 可采用 AHP 中的传统 9 标度法, 借助一个区间来表示判断矩阵的元素。

### 3.3 计算各层元素的组合权重

假定第  $k-1$  层上  $n_{k-1}$  个指标已经计算得出, 其相对于总目标的排序权重区间向量为  $\mathbf{W}^{(k-1)} = (w_1^{(k-1)}, w_2^{(k-1)}, \dots, w_n^{(k-1)})^T$ , 设  $\mathbf{p}_j^{(k)} = (p_{1j}^{(k)}, p_{2j}^{(k)}, \dots, p_{n_j}^{(k)})^T$  是第  $k$  层上  $n_k$  个指标对第  $k-1$  层上第  $j$  个指标为准则的排序权重区间向量, 其中不受  $j$  支配的指

标的权重为零。令  $\mathbf{P}^{(k)} = (p_1^{(k)}, p_2^{(k)}, \dots, p_{n_{k-1}}^{(k)})$  为  $n_k \times n_{k-1}$  区间矩阵, 其含义为  $k$  层上元素对  $k-1$  层上各指标的排序, 则第  $k$  层指标对总目标的合成排序向量  $\mathbf{W}^{(k)}$  可以表示为

$$\mathbf{W}^{(k)} = (w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_n^{(k)})^T = \mathbf{P}^{(k)} \cdot \mathbf{W}^{(k-1)}$$

通常  $\mathbf{W}^{(k)} = \mathbf{P}^{(k)} \mathbf{P}^{(k-1)} \dots \mathbf{P}^{(3)} \mathbf{W}^{(2)}$

式中,  $\mathbf{W}^{(2)}$  所表示的含义为第 2 层上指标对总目标的排序向量, 即单准则下的排序向量。

第 1 步 设根据建立区间判断矩阵规则, 利用专家打分对机场运行安全的评估得到如下区间判断

矩阵

$$\begin{aligned}
ab &= \begin{bmatrix} (1,1) & (3,4) & (3,4) & \left(\frac{1}{2},1\right) \\ \left(\frac{1}{4},\frac{1}{3}\right) & (1,1) & \left(\frac{1}{2},1\right) & \left(\frac{1}{5},\frac{1}{4}\right) \\ \left(\frac{1}{4},\frac{1}{3}\right) & (1,2) & (1,1) & \left(\frac{1}{5},\frac{1}{4}\right) \\ (1,2) & (4,5) & (4,5) & (1,1) \end{bmatrix} & b_{1c} &= \begin{bmatrix} (1,1) & \left(\frac{1}{6},\frac{1}{5}\right) & \left(\frac{1}{9},\frac{1}{8}\right) & \left(\frac{1}{2},1\right) & \left(\frac{1}{5},\frac{1}{4}\right) \\ (5,6) & (1,1) & \left(\frac{1}{3},\frac{1}{2}\right) & (4,5) & (1,2) \\ (8,9) & (2,3) & (1,1) & (8,9) & (2,3) \\ (1,2) & \left(\frac{1}{5},\frac{1}{4}\right) & \left(\frac{1}{9},\frac{1}{8}\right) & (1,1) & \left(\frac{1}{4},\frac{1}{3}\right) \\ (4,5) & \left(\frac{1}{2},1\right) & \left(\frac{1}{3},\frac{1}{2}\right) & (3,4) & (1,1) \end{bmatrix} \\
& & b_{2c} &= \begin{bmatrix} (1,1) & \left(\frac{1}{2},1\right) \\ (1,2) & (1,1) \end{bmatrix} & b_{3c} &= \begin{bmatrix} (1,1) & \left(\frac{1}{3},\frac{1}{2}\right) & (1,2) \\ (2,3) & (1,1) & (3,4) \\ \left(\frac{1}{2},1\right) & \left(\frac{1}{4},\frac{1}{3}\right) & (1,1) \end{bmatrix} \\
& & b_{4c} &= \begin{bmatrix} (1,1) & (4,5) & (8,9) & (4,5) & (1,2) & (1,2) \\ \left(\frac{1}{5},\frac{1}{4}\right) & (1,1) & \left(\frac{1}{3},\frac{1}{2}\right) & \left(\frac{1}{2},1\right) & \left(\frac{1}{4},\frac{1}{3}\right) & \left(\frac{1}{3},\frac{1}{2}\right) \\ \left(\frac{1}{9},\frac{1}{8}\right) & (2,3) & (1,1) & (2,3) & \left(\frac{1}{9},\frac{1}{8}\right) & \left(\frac{1}{9},\frac{1}{8}\right) \\ \left(\frac{1}{5},\frac{1}{4}\right) & (1,2) & \left(\frac{1}{3},\frac{1}{2}\right) & (1,1) & \left(\frac{1}{4},\frac{1}{3}\right) & \left(\frac{1}{3},\frac{1}{2}\right) \\ \left(\frac{1}{2},1\right) & (3,4) & (8,9) & (3,4) & (1,1) & (1,2) \\ \left(\frac{1}{2},1\right) & (2,3) & (8,9) & (2,3) & \left(\frac{1}{2},1\right) & (1,1) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

第 2 步 计算每个区间矩阵的区间特征向量

$$\begin{aligned}
W_{b_{1c}} &= \begin{bmatrix} (0.0406, 0.0546) \\ (0.2062, 0.3067) \\ (0.4261, 0.4601) \\ (0.0496, 0.0534) \\ (0.1625, 0.2404) \end{bmatrix} \\
W_{b_{3c}} &= \begin{bmatrix} (0.1719, 0.3153) \\ (0.4494, 0.7198) \\ (0.1243, 0.2193) \end{bmatrix} \\
W_{b_{4c}} &= \begin{bmatrix} (0.2411, 0.3969) \\ (0.0418, 0.0686) \\ (0.0504, 0.0848) \\ (0.0472, 0.0752) \\ (0.2037, 0.3371) \\ (0.1706, 0.2825) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

第 3 步 计算指标总的区间权重向量  $\bar{W} = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \bar{w}_3, \dots, \bar{w}_{16}]$  机场运行安全评估指标权重区间结果如表 2 所示。

归一化处理:  $\bar{W} = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \bar{w}_3, \dots, \bar{w}_{16}]$ , 结果如表 3 所示。

进一步计算各指标的相对重要性, 定义  $m(A)$  为指标的相对重要性估计,  $r(A)$  表示重要性估计的不确定性, 采用中心区间的形式表示个指标的权重区间向量:  $\bar{W} = [(\overline{m(A_1)}, r_1), (\overline{m(A_2)}, r_2), (\overline{m(A_3)}, r_3), \dots, (\overline{m(A_{16})}, r_{16})]$  通过上述方法计算得到的机场运行安全评估指标权重区间的重要性估计结果如表 4 所示。

表 2 机场运行安全评估指标权重区间计算结果

权重	人员心理	人员	安全	明确工	违规	交流	安全教育	维护保
区间	和生理素质	技能	意识	作职责	操作	合作	和技能培训	养水平
最小值	0.012 9	0.065 6	0.135 7	0.015 8	0.051 7	0.029 4	0.041 7	0.017 6
最大值	0.017 9	0.110 4	0.165 6	0.019 3	0.086 6	0.047 6	0.067 2	0.036 9
权重	设备	净空	地面	安全管理	管理者	天气	安全文化	安全
区间	故障	条件	环境	工作	能力		建设	监督
最小值	0.046 1	0.012 7	0.105 1	0.018 2	0.021 9	0.020 5	0.088 8	0.074 3
最大值	0.084 1	0.025 7	0.191 2	0.033 1	0.040 9	0.036 2	0.162 4	0.136 1

表 3 机场运行安全评估指标权重区间归一处理结果

权重	人员心理	人员	安全	明确工	违规	交流	安全教育	维护保
区间	和生理素质	技能	意识	作职责	操作	合作	和技能培训	养水平
最小值	0.014 4	0.073 1	0.151 1	0.017 5	0.057 6	0.032 8	0.046 4	0.019 6
最大值	0.021 9	0.122 9	0.184 4	0.021 4	0.096 4	0.053 0	0.074 9	0.041 1
权重	设备	净空	地面	安全管理	管理者	天气	安全文化	安全
区间	故障	条件	环境	工作	能力		建设	监督
最小值	0.051 4	0.014 2	0.117 0	0.020 3	0.024 4	0.022 9	0.098 9	0.082 8
最大值	0.093 7	0.028 6	0.212 9	0.036 8	0.045 5	0.040 4	0.180 8	0.151 5

表 4 机场运行安全评估指标权重的重要性估计结果

权重	人员心理	人员	安全	明确工	违规	交流	安全教育	维护保
重要性估计	和生理素质	技能	意识	作职责	操作	合作	和技能培训	养水平
不确定性	0.018 1	0.098 0	0.167 8	0.019 5	0.077 0	0.042 9	0.060 6	0.030 3
权重	设备	净空	地面	安全管理	管理者	天气	安全文化	安全
重要性估计	故障	条件	环境	工作	能力		建设	监督
不确定性	0.003 7	0.024 9	0.016 6	0.001 9	0.019 3	0.010 0	0.014 2	0.010 7
重要性估计	0.072 5	0.021 4	0.165 0	0.028 5	0.035 0	0.031 6	0.139 8	0.117 2
不确定性	0.021 1	0.007 1	0.047 9	0.008 2	0.010 5	0.008 7	0.040 9	0.034 3

根据表 4 结果可以定量地确定机场运行安全指标的相对重要性。鉴于机场运行安全评估存在的不确定性,在对指标权重进行相对重要性排序时,还要根据机场运行监控决策者的偏好和所评估机场的特

点,综合考虑权重区间的中点和半径。在本文算例中,当决策者着重考虑权重区间中点值时,即认定上面 16 个权重区间的谱半径近似为 0.05,那么各指标相对重要性排序为表 5 和图 2 所示。

表 5 机场运行安全评估指标权重的重要性估计结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
指标	安全	地面	安全文	安全	人员	违规	设备	安全教育
	意识	环境	化建设	监督	技能	操作	故障	和技能培训
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
指标	交流	管理者	天气	维护保	安全管理	净空	明确工	人员心理
	合作	能力		养水平	工作	条件	作职责	和生理素质

从表 5 和图 2 可以看出,安全意识、地面环境、安全文化建设、安全监督和人员技能等指标较为重

要,对机场运行安全的影响也较大;机场净空条件、明确工作职责、人员心理和生理素质等指标对机场

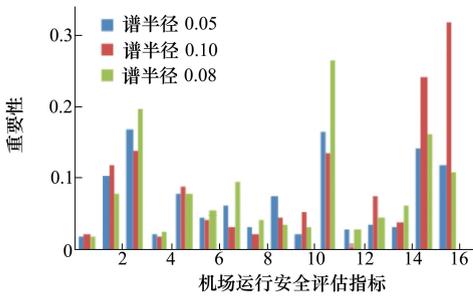


图 2 不同机场运行监控决策者偏好下的安全指标重要性

运行安全的影响相对较小。这与表 1 中的机场运行不安全事件基本原因统计分析结果比较吻合,说明本方法的计算结果是有效的。此外,由图 2 可见,机场运行监控决策者的偏好对评估有较大影响作用,这说明该方法不仅能够有效地计算指标权重区间,而且能够考虑评估的不确定性,使机场运行监控决策者参与其中,实现专家和决策者的协同评估,更符合实际需求。这样可以避免传统 AHP 方法在求得

权重向量后,简单地按数值大小进行排序,而使决策者无法参与评估的缺陷。

## 4 结 论

本文研究了一种改进的层次分析方法,通过估计区间判断矩阵的谱半径,并将其作为位移,提出了带有位移的区间反幂法,并将此算法用于国内某机场运行安全评估中。与传统 AHP 方法相比,本文所提算法能够综合考虑机场运行安全评估中的确定性和不确定性,根据机场运行监控决策者的偏好信息,综合计算机场运行安全评价指标的组合权重区间和相对重要程度,克服了传统 AHP 方法在求得权重向量后,对数值大小进行简单排序,导致决策者无法参与所引起的不足。所提算法兼具有效性和灵活性,非常适用于机场运行安全的不确定评估。下一步工作可以在基础上,采集实际数据,全面完成机场运行安全评估工作。

## 参考文献:

- [1] 靳慧斌,洪远,蔡亚敏. 基于因子分析的机场运行安全评价模型[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(6): 62-65  
JIN Huibin, HONG Yuan, CAI Yamin. Safety Evaluation Model of Airport Operation Based on Factor Analysis[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(6): 62-65 (in Chinese)
- [2] 刘思峰,党耀国,方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004  
LIU Sifeng, DANG Yaoguo, FANG Zhigeng. Grey System Theory and Application[M]. Beijing, Science Press, 2004 (in Chinese)
- [3] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988  
XU Shubai. Principle of Analysis Hierarchy Process[M]. Tianjin, Tianjin University Press, 1988 (in Chinese)
- [4] 吴育华, 诸为, 李新全, 等. 区间层次分析法——IAHP[J]. 天津大学学报, 1995, 28: 700-705  
WU Yuhua, CHU Wei, LI Xinquan, et al. Interval Approach to Analysis of Hierarchy Process[J]. Journal of Tianjin University, 1995, 28: 700-705 (in Chinese)
- [5] GHORBANZADEH O, MOSLEM S, BLASCHKE T, et al. Sustainable Urban Transport Planning Considering Different Stakeholder Groups by an Interval-Ahp Decision Support Model[J]. Sustainability, 2019, 11(1): 9
- [6] ZHANG Z, PEDRYCZ W. Intuitionistic Multiplicative Group Analytic Hierarchy Process and Its Use in Multicriteria Group Decision-Making[J]. IEEE Trans on Cybernetics, 2018, 48(7): 1950-1962
- [7] AYODELE T R, OGUNJUYIGBE A S O, ODIGIE O, et al. A Multi-Criteria Gis Based Model for Wind Farm Site Selection Using Interval Type-2 Fuzzy Analytic Hierarchy Process: The Case Study of Nigeria [J]. Applied Energy, 2018, 228: 1853-1869
- [8] WANG S, LEIJIAO G E, CAI S, et al. Hybrid Interval AHP-Entropy Method for Electricity User Evaluation in Smart Electricity Utilization[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(4): 701-711
- [9] MOORE R E. Interval Analysis[M]. New York, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1966
- [10] ALEFELD G, HERZBERGER J. Introduction to the Interval Computations[M]. New York, Academic Press, 1983
- [11] SAATY T L, VARGAS L G. Uncertainty and Rank Order in the Analytic Hierarchy Process[J]. European Journal of Operational Research, 1987, 32: 107-117

- [12] ARBEL A. Approximate Articulation of Preference and Priority Derivation[J]. *European Journal of Operational Research*, 1989, 43(3): 317-326
- [13] ARBEL A, VARGAS L G. Preference Simulation and Preference Programming: Robustness Issues in Priority Derivation[J]. *European Journal of Operational Research*, 1993, 69(2): 200-209
- [14] 刘方芳. 基于区间运算的区间幂法[D]. 上海: 华东理工大学, 2011  
LIU Fangfang. New Power Method Based on Interval Arithmetic for Interval Matrices[D]. Shanghai, East China University of Science and Technology, 2011 (in Chinese)
- [15] 冷慧男. 估计区间特征值问题特征值界的一种新方法[J]. *应用力学学报*, 2007, 24(4): 615-618  
LENG Huinan. New Method for Estimating Eigenvalue Bounds in Interval Eigenvalue Problems[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2007, 24(4): 615-618 (in Chinese)
- [16] 邱志平, 陈望寰, 周振平. 对称区间矩阵标准特征值问题的一种新算法[J]. *吉林大学学报*, 1994(3): 62-66  
QIU Zhiping, CHEN Wanghuan, ZHOU Zhenping. A New Algorithm for Standard Eigenvalue Problem of the Symmetric Interval Matrix[J]. *Journal of Jinlin University*, 1994(3): 62-66 (in Chinese)
- [17] 张正勋. HFACS在民航训练飞行人为差错分析中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2010  
ZHANG Zhengxun. The Application of HFACS in the Analyses of Human Factors in Flight Training[D]. Chengdu, University of Electronic Science and Technology, 2010 (in Chinese)
- [18] 贝塔朗菲. 一般系统论[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 1987
- [19] 王振, 刘茂. 应用区间层次分析法(IAHP)研究高层建筑火灾安全因素[J]. *安全与环境学报*, 2006(1): 12-15  
WANG Zhen, LIU Mao. On Fire-Safety of High-Rises with IAHP-Based Method[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006(1): 12-15 (in Chinese)

## A Strategy for Uncertainty Evaluation of Airport Operation Safety Based on Interval Inverse Power Method

WANG Zhongye, LIU Hao, HU MingHua, ZHANG Honghai

(College of Civil Aviation/College of Flight, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to maintain a safe and suitable state of civil airports, it is necessary to conduct an airport operation safety evaluation. Aiming at uncertainty of airport operation safety evaluation and the deficiencies of analytic hierarchy process, we propose an improved analytic hierarchy process for solving this problem. By estimating the spectral radius of the interval judgment matrix and using it as shift, we propose an interval inverse power method with shift, and apply this algorithm to airport operation safety evaluation. The numerical examples show that this method can comprehensively consider the certainty and uncertainty of airport safety evaluation and compute the combined weight and relative importance of the evaluating indicators. Our method is more flexible and effective than traditional method, and is very suitable for uncertainty evaluation of airport operation safety.

**Keywords:** airport operation safety; uncertainty evaluation; interval judgment matrix; AHP; interval inverse power method