

## 基于 SPA-Markov 链的航班安保威胁态势评估

刘玲莉, 孙业婷, 万佳莉

(中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300)

**摘要:** 为了对航班安保威胁水平进行评估并分析和预测其发展变化, 本文提出了基于集对分析(SPA, set-pair analysis)和马尔科夫(Markov)链的航班安保威胁态势评估模型。首先, 以机上各类型案(事)件形势构建航班安保威胁态势评估指标体系, 综合灰色关联系数法和熵权法的计算结果确定指标的组权重。其次, 结合 SPA 理论中的三元联系数结构及民航风险分级标准, 将航班安保威胁等级划分为三级, 通过计算联系度确定航班安保威胁等级及发展趋势, 并结合 Markov 状态转移概率矩阵对未来航班安保威胁水平进行动态预测。最后, 采用 2021 年机上案(事)件数据对模型进行验证, 结果表明, 该模型能够反映航班安保威胁状态。

**关键词:** 航班安保; 态势评估; 集对分析; 马尔科夫(Markov)链

**中图分类号:** V328 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2025)05-0024-07

### Flight security threat posture assessment model based on SPA-Markov chains

LIU Lingli, SUN Yeting, WAN Jiali

(College of Safety Science and Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** In order to assess the level of flight security threats as well as analyze and predict their developmental trend, an assessment model of flight security threat posture based on set-pair analysis (SPA) and Markov chains was proposed. Firstly, evaluation index system of the flight security threat posture was constructed based on the occurrence posture of various types of in-flight cases (incidents), and the combined weights of the indicators were determined by integrating the calculation results of the gray correlation coefficient method and the entropy weighting method. Subsequently, by integrating the ternary connection number structure in the SPA theory and the civil aviation risk classification standards, the level of flight security threat was classified into three levels. By calculating the connection degree, the flight security threat level and the development trend were determined, and by combining it with the Markov state transition probability matrix, the future level of flight security threat was dynamically predicted. Finally, the proposed model was validated using 2021 in-flight cases (incidents) data. The results indicated that the model can reflect the status of flight security threat.

**Key words:** flight security; posture assessment; set-pair analysis; Markov chain

航班安保工作作为空防安全的重要部分, 为航班正常运行提供了极大保障。近年来, 虽然中国民航空防安全水平处于较为平稳的状态, 但机上案(事)件频发, 给航班安保工作带来了极大挑战。

目前, 国内外很多学者对民航安保领域开展了相关研究。Zhao 等<sup>[1]</sup>针对民用机场安保评价中存在的缺陷和不确定因素, 基于改进的未确知测度理论提出了民用机场安保综合评价方法。冯文刚等<sup>[2-3]</sup>通过分析民航安保事件, 总结了民航安保存在的隐患, 提出了多

模态融合方法, 结合深度神经网络模型进行民航旅客风险预警, 并构建深度长短记忆(LSTM, long short-term memory)模型, 基于事件时序特征分析行为主体, 进而实现安保事件行为主体的学习与预测。赵振武等<sup>[4]</sup>对国内外货运安保政策、法律法规、供应链框架及流程等进行对比研究, 并结合中国实际情况提出了航空货运安保建议。Kemp 等<sup>[5]</sup>探究了在遵循安全和安保标准的条件下安保事件仍然发生的原因, 并提出了优化建议。鞠晨阳等<sup>[6]</sup>提出基于区块链的安保信息共享模型,

建立中国民用航空局、航空公司、机场、公安局等单位之间的信息交流渠道。上述民航安保领域的研究主要集中在安保事件及安保政策等方面,从具体事件的分析及预防及管控规定方面对航班安保工作进行指导,但目前针对航班安保威胁环境进行整体研究评估的模型较少。因此,本研究引入态势评估概念与方法,以机上各类型案(事)件形势作为航班安保威胁态势评估指标,根据机上案(事)件客观数据对当前航班安保威胁水平进行评估和预测,可以得出航班安保威胁等级及发展趋势,不仅为航空安保预警研究提供了新的视角,同时也提高了机上案(事)件数据的利用率。

态势评估,也被称为态势估计,率先应用于军事,然后逐渐在物流、医学、交通运输等领域展开应用,直到发展成为一个成熟的理论框架和评估方法。构建态势评估模型的方法包括机器学习<sup>[7]</sup>、马尔科夫(Markov)链<sup>[8]</sup>、模糊综合评估<sup>[9]</sup>和集对分析(SPA, set-pair analysis)<sup>[10]</sup>等,单一评估方法具有一定的局限性,组合评估模型已在很多领域有较为成功的应用。首先,本文结合 SPA 及 Markov 链构建动态评估模型,打破单一评估方法的局限性,从而提高模型评估结果的准确性和实用性。其次,通过 SPA 理论中联系度描述航班安保威胁状态,并结合 Markov 状态转移概率矩阵进行预测,实现航班安保威胁态势的动态评估。最后,以实例证明该模型在航班安保威胁态势评估方面的有效性。

## 1 航班安保威胁态势评估指标体系

### 1.1 指标体系构建

威胁态势是一种基于微观具体威胁而进行综合评估的宏观安全形势,当前航班安保的威胁态势会受到机上案(事)件发生的直接影响。利用具体威胁的严重性及发生频率,可以得到整体态势的威胁等级。航班安保面临的威胁,主要来源于除航空运输系统之外的人为威胁,包括人为非法破坏民用航空秩序、摧毁航空设施等,这些威胁的最终体现则是机上案(事)件的发生。通过统计一定周期内不同类型案(事)件的发生情况,可以推断当前总体航班安保威胁水平。因此,本研究以机上各类型案(事)件形势作为航班安保威胁态势评估指标。

机上案(事)件类型目前没有统一标准,在中国暴力恐怖袭击、极端暴力等恶性案件极少发生,机上案(事)件主要为非法干扰或扰乱事件,因此,本研究参考相关文件对以上两种行为进行分类。国外有大量对于非法干扰及扰乱行为的定义,国内对于非法干扰行为

的定义援引了国际民航组织出台的相关文件,同时与其也有一定差异,更加符合中国航空安保实情。因此,参考《公共航空旅客运输飞行中安全保卫工作规则》<sup>[11]</sup>(CCAR-332-R1)第四十九条中非法干扰行为与扰乱行为的定义和分类,对部分原文件中的类型名称稍作调整,删除其名称中“机场”“航空设施场所”等词语,使类别名称更加适配于机上案(事)件类型。通过对机上案(事)件数据进行清洗和梳理,增加“拒绝下机”“机上盗窃他人物品”两类案(事)件类型,最终确定了 18 类机上案(事)件类型,如表 1 所示。以这 18 类机上案(事)件的类型构建评估指标体系。

表 1 机上案(事)件类型

Tab.1 Types of in-flight cases (incidents)

序号	符号	类型描述
1	$X_1$	非法劫持航空器
2	$X_2$	毁坏使用中的航空器
3	$X_3$	在航空器上扣留人质
4	$X_4$	强行闯入航空器
5	$X_5$	为犯罪目的而将武器或危险装置、材料带入航空器
6	$X_6$	利用使用中的航空器造成人员死亡、严重人身伤害,或对财产、环境的严重破坏
7	$X_7$	散播危害飞行中航空器内的旅客、机组安全的虚假信息
8	$X_8$	强占座位、行李架
9	$X_9$	打架斗殴、寻衅滋事
10	$X_{10}$	违规使用手机或其他禁止使用的电子设备
11	$X_{11}$	盗窃、故意损坏或擅自移动航空设施设备或强行打开应急舱门
12	$X_{12}$	吸烟(含电子烟)、使用火种
13	$X_{13}$	猥亵客舱内人员或性骚扰
14	$X_{14}$	传播淫秽物品及其他非法印制物
15	$X_{15}$	妨碍机组成员履行职责
16	$X_{16}$	拒绝下机
17	$X_{17}$	机上盗窃他人物品
18	$X_{18}$	其他

各评估指标以月为单位,从每类案(事)件下所发生的具体案(事)件的威胁严重性及发生频率两方面进行量化。威胁严重性可以视为威胁主体利用某种非法手段破坏民航设施设备或袭击航空旅客,或扰乱客舱秩序从而影响航空安全的后果严重程度;发生频率则体现案(事)件的发生频繁程度。首先,通过对案(事)件细节信息进行分析,从行为人数、处罚结果、案(事)件后果及案(事)件发生所处的飞行阶段几个方面量化单个案(事)件的威胁严重性。然后,结合当月该类案(事)件总体发生频数得到当月此类案(事)件发生情况的最终量化数值。最后,按照均分原则划分为三级,对应低风险、中风险及高风险,即得到评估指标对应等级。

### 1.2 指标权重确定

各类型案(事)件对于航班安保威胁态势的影响

程度具有一定差异性,因此,讨论指标权重具有重要的研究意义。为了避免单一赋权方法造成的权重缺陷,本研究以灰色关联系数法和熵权法计算得到指标主客观权重结果,再以线性加权的方式进行组合,得到指标的组权重。

灰色关联系数法<sup>[12-13]</sup>的核心是计算关联度,关联度是对于两个系统间的因素随时间或不同对象而变化的关联性大小的量度。该方法是唯一一种将数据对比与几何图形发展态势相结合的求权方法,通过几种曲线与同一条曲线间的差值来判断关联程度,其所需的样本量较小,可在极大程度上规避矩阵一致性的要求。

灰色关联系数法确定指标权重。首先,需要构造行为矩阵。假设有  $m$  个评估指标,  $n$  个评估专家,得到行为矩阵  $\mathbf{P} = (x_{kl})_{m \times n}$ 。选取矩阵  $\mathbf{P}$  中最大权重值作为参考向量  $\mathbf{X}_{\max} = (x_{\max}(1), x_{\max}(2), \dots, x_{\max}(n))$ 。然后,根据指标参考序列计算关联系数

$$\delta_{kl} = \frac{\min_{kl} |x_{\max}(l) - x_{kl}| + \beta \max_{kl} |x_{\max}(l) - x_{kl}|}{|x_{\max}(l) - x_{kl}| + \beta \max_{kl} |x_{\max}(l) - x_{kl}|} \quad (1)$$

式中:  $\delta_{kl}$  为第  $k$  个指标第  $l$  个评估专家关于参考序列的灰色关联系数;  $\beta$  为分辨系数,一般取 0.5;  $\min_{kl} |x_{\max}(l) - x_{kl}|$  为最小序列差;  $\max_{kl} |x_{\max}(l) - x_{kl}|$  为最大序列差。

利用关联系数  $\delta_{kl}$  的平均值可求得关联度  $\hat{\omega}_k$ , 即

$$\hat{\omega}_k = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \delta_{kl} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

最后,对  $\hat{\omega}_k$  进行归一化处理,以求得各指标的主观权重  $w_k$ , 即

$$w_k = \frac{\hat{\omega}_k}{\sum_{k=1}^m \hat{\omega}_k} \quad (3)$$

熵值法确定指标权重。首先,需要对原始评价矩阵进行标准化处理,将其转化为标准矩阵

$$\mathbf{X}' = (d_{kl})_{m \times n} \quad (4)$$

式中,  $d_{kl} = \frac{x_{kl}}{\sum_{k=1}^m x_{kl}}$ 。

然后,根据标准矩阵计算第  $k$  个指标的熵值  $E_k$  及熵权  $\tilde{w}_k$ ,  $\tilde{w}_k$  为第  $k$  个指标  $X_k$  客观权重计算结果, 即

$$E_k = -\frac{1}{\ln n} \sum_{l=1}^n d_{kl} \ln d_{kl} \quad (5)$$

$$\tilde{w}_k = \frac{1 - E_k}{\sum_{k=1}^m (1 - E_k)} \quad (6)$$

对灰色关联系数法和熵权法得到的权重结果,以线性加权的方式进行组合,最终得到第  $k$  个指标的组权重, 即

$$W_k = \{1 - [\frac{2}{n-1}(P_1 + 2P_2 + \dots + nP_n) - \frac{n+1}{n-1}]\}w_k + [\frac{2}{n-1}(P_1 + 2P_2 + \dots + nP_n) - \frac{n+1}{n-1}]\tilde{w}_k \quad (7)$$

式中,  $P_1, P_2, \dots, P_n$  为指标权重从小到大依次排序值。

向中国国际航空股份有限公司及中国南方航空股份有限公司的 10 位一线从业者发放机上案(事)件调查问卷得到指标重要度评分,评分区间为 1~9,其中,空警 3 人(警 1、2、3)、航空安全员 3 人(安 1、2、3)、机长 2 人(机 1、2)、乘务员 2 人(乘 1、2),得到其打分结果如表 2 所示。根据式(1)~式(7)计算最终得到的指标权重如表 3 所示。

表 2 指标权重打分结果

Tab.2 Scoring results of indicator weights

指标	警 1	警 2	警 3	安 1	安 2	安 3	机 1	机 2	乘 1	乘 2
X <sub>1</sub>	9	9	8	8	9	7	9	7	9	9
X <sub>2</sub>	9	8	9	8	9	8	9	8	9	8
X <sub>3</sub>	7	8	9	8	8	6	9	9	9	9
X <sub>4</sub>	1	8	8	8	7	5	9	7	9	9
X <sub>5</sub>	9	8	9	7	8	5	8	9	9	9
X <sub>6</sub>	9	8	9	9	9	9	8	9	9	9
X <sub>7</sub>	8	8	9	6	8	3	6	7	9	5
X <sub>8</sub>	2	3	5	5	5	2	2	5	7	3
X <sub>9</sub>	4	5	5	5	5	2	3	6	9	6
X <sub>10</sub>	1	3	4	3	4	1	2	3	3	4
X <sub>11</sub>	6	5	7	7	8	3	5	7	9	5
X <sub>12</sub>	3	3	7	6	8	2	5	2	9	6
X <sub>13</sub>	1	3	6	4	7	2	2	2	9	5
X <sub>14</sub>	2	3	5	4	7	2	2	2	5	3
X <sub>15</sub>	2	3	5	3	7	2	2	3	9	7
X <sub>16</sub>	2	3	6	2	4	1	2	1	4	4
X <sub>17</sub>	2	3	6	2	5	2	1	3	4	2
X <sub>18</sub>	2	3	5	1	1	1	1	1	4	5

表 3 指标权重计算结果

Tab.3 Calculation results of indicator weights

指标	主观权重	客观权重	组合权重
X <sub>1</sub>	0.080 2	0.012 9	0.067 6
X <sub>2</sub>	0.080 8	0.011 5	0.067 9
X <sub>3</sub>	0.077 6	0.015 5	0.066 0
X <sub>4</sub>	0.067 9	0.033 1	0.061 4
X <sub>5</sub>	0.076 9	0.017 1	0.065 7

续表 3 指标权重计算结果

Continued Tab.3 Calculation results of indicator weights

指标	主观权重	客观权重	组合权重
$X_6$	0.083 2	0.010 7	0.069 7
$X_7$	0.063 8	0.033 1	0.058 1
$X_8$	0.040 9	0.077 2	0.047 7
$X_9$	0.048 0	0.059 7	0.050 1
$X_{10}$	0.035 6	0.095 9	0.046 9
$X_{11}$	0.056 3	0.041 9	0.053 6
$X_{12}$	0.050 6	0.061 1	0.052 6
$X_{13}$	0.044 9	0.078 2	0.051 1
$X_{14}$	0.039 2	0.084 1	0.047 6
$X_{15}$	0.046 0	0.073 9	0.051 2
$X_{16}$	0.036 5	0.095 7	0.047 6
$X_{17}$	0.036 8	0.092 6	0.047 2
$X_{18}$	0.034 8	0.105 8	0.048 0

## 2 航班安保威胁态势评估模型

航班安保威胁态势在不同时期都存在一定的动态性和不确定性,SPA 是针对系统中的不确定性而提出的一种解决问题方法<sup>[14]</sup>,Markov 链可以描述系统中具有时间差异的动态随机现象,一旦确定现在的状态即可根据 Markov 链预测将来的系统状态<sup>[15]</sup>。自从孙晋众等<sup>[15]</sup>将集对分析与 Markov 链结合用于人力资源动态绩效评价后,SPA 与 Markov 链结合的方法被用于埋地燃气管道危险性评价<sup>[16]</sup>、航空维修安全动态评估<sup>[17]</sup>、飞行安全态势评估与预测<sup>[18]</sup>、重大决策社会风险评估<sup>[19]</sup>、水资源风险评估<sup>[20]</sup>等领域。基于机上案(事)件数据进行航空安保威胁态势预测,所依据的是乘客在特定环境下出现相同行为的概率,以及航班属性在短期内所具有的连续性,因此,本文构建基于 SPA-Markov 链的航班安保威胁态势评估模型,对航班安保威胁水平进行定量的动态评估。

### 2.1 同异反评估模型建立

集对分析由中国学者赵克勤<sup>[14]</sup>于 1989 年提出,基于该理论的核心思想,可以将集合与集合看作一个互相联系的集对  $H$ ,为探究两个集合间的关系,设两个集合间存在  $N$  个共同特征,其中,有  $N_S$  个特征为同一状态,  $N_F$  个特征为对立状态,有  $N_M = N - N_S - N_F$  个特征是不确定的,既不相同也不对立,那么集合间的确定与不确定的关系可以由这 3 个变量描述,也就是集合间的联系度

$$u = \frac{N_S}{N} + \frac{N_M}{N}i + \frac{N_F}{N}j = a + bi + cj \quad (8)$$

式中: $i \in [-1, 1]$  为差异度系数,表示集对  $H$  的不确定性,其值越接近于 0,则表示研究对象的不确定信息越大; $j = -1$  为对立度系数; $a, b, c \in [0, 1], a + b + c = 1$ 。通常来说  $a, b, c$  三者数值不同,可以通过相互比较来确定集合之间的关系,因此,定义集对势  $\text{shi}(H) = \frac{a}{c}$  ( $c \neq 0$ )来体现一定条件下集对的联系势。

按照均分假定,将航班安保威胁等级以联系度  $u \in [-1, 1]$ 划分为:高风险( $-1 \leq u < -0.33$ ),中风险( $-0.33 \leq u < 0.33$ ),低风险( $0.33 \leq u \leq 1$ )。

本研究将航班安保威胁态势评估指标和威胁等级视为一个集对,以集合  $A$  表示态势评估指标,以集合  $B$  表示航班安保威胁等级,则集合  $A$  和  $B$  可构成航班安保威胁态势评估集对  $H = (A, B)$ 。从静态角度考虑,若将各指标特性权重  $W_k (k = 1, 2, \dots, m)$ 引入 SPA 中,则得到航班安保威胁态势的评估联系度  $u$ ,即

$$u = \sum_{k=1}^{N_S} W_k + \sum_{k=1+N_S}^{N_S+N_M} W_k i + \sum_{k=1+N_S+N_M}^N W_k j \quad (9)$$

### 2.2 动态评估模型建立

机上安保形势在不断发生变化,这种复杂因素作用的结果具有动态实时性,因此,将 Markov 链的思想引入航空安保态势评估模型中。Markov 状态转移概率矩阵中的每一个元素都是一个状态转移概率,描述了从某个时刻的某种状态转移到下一个时刻的某种状态的概率<sup>[17]</sup>。将 3 个威胁态势作为 Markov 链中的 3 个状态,再引入状态转移概率。假设集对  $H$  的  $m$  个指标,在  $t$  时刻有  $s_t$  个指标的威胁等级为低风险(S),  $m_t$  个指标的威胁等级为中风险(M),  $f_t$  个指标的威胁等级为高风险(F),且有  $s_t + m_t + f_t = m$ 。若将这  $m$  个指标仍按 S、M、F 等级进行排列并编号,且各指标在  $t$  时刻重新编号后的序号所对应的权重为  $W_k^{(t)} (k = 1, 2, \dots, m)$ ,则在  $t$  时刻的评估联系度为

$$u^{(t)} = \sum_{k=1}^{s_t} W_k^{(t)} + \sum_{k=1+s_t}^{s_t+m_t} W_k^{(t)}i + \sum_{k=1+s_t+m_t}^m W_k^{(t)}j \quad (10)$$

根据 SPA 模型中评估指标月份之间同势、均势、反势状态的转换情况,构建状态转移概率矩阵。集对  $H$  在  $(t, t + \tau)$ 时段内( $\tau$ 为周期),有的指标保持不变,有的指标可能会变为更高或更低的威胁等级。

假设在此期间,集对  $H$  中原有的  $s_t$  个低风险的评估指标,有  $s_{t1}$  个指标保持原有状态,  $s_{t2}$  个指标状态转变为中风险,  $s_{t3}$  个指标状态转变为高风险,则对同一种转变形态下的指标计算权重和组成向量,并结合

初始时刻集对的同一联系度,得到低风险在变化周期内的状态转移概率向量为

$$S^{(t)} = (V_{11}, V_{12}, V_{13}) = \frac{1}{a^{(t)}} \left( \sum_{k=1}^{s_1} W_k^{(t)}, \sum_{k=1+s_1}^{s_1+s_2} W_k^{(t)}, \sum_{k=1+s_1+s_2}^{s_1} W_k^{(t)} \right) \quad (11)$$

式中,  $a^{(t)} = \sum_{k=1}^{s_1} W_k^{(t)}$ 。

假设在此期间原有的  $m_1$  个中风险的评估指标,经过一个变化周期后,有  $m_{11}$  个指标保持原有状态,  $m_{12}$  个指标状态转变为低风险,  $m_{13}$  个指标状态转变为高风险,得到中风险在变化周期内的状态转移概率向量为

$$M^{(t)} = (V_{21}, V_{22}, V_{23}) = \frac{1}{b^{(t)}} \left( \sum_{k=1}^{m_1} W_k^{(t)}, \sum_{k=1+m_1}^{m_1+m_2} W_k^{(t)}, \sum_{k=1+m_1+m_2}^{m_1} W_k^{(t)} \right) \quad (12)$$

式中,  $b^{(t)} = \sum_{k=1}^{m_1} W_k^{(t)}$ 。

假设在此期间原有的  $f_1$  个高风险的评估指标,经过一个变化周期后,有  $f_{11}$  个指标保持原有状态,  $f_{12}$  个指标状态转变为中风险,  $f_{13}$  个指标状态转变为低风险,得到高风险在变化周期内的状态转移概率向量为

$$F^{(t)} = (V_{31}, V_{32}, V_{33}) = \frac{1}{c^{(t)}} \left( \sum_{k=1}^{f_1} W_k^{(t)}, \sum_{k=1+f_1}^{f_1+f_2} W_k^{(t)}, \sum_{k=1+f_1+f_2}^{f_1} W_k^{(t)} \right) \quad (13)$$

式中,  $c^{(t)} = \sum_{k=1}^{f_1} W_k^{(t)}$ 。

根据状态转移概率向量  $S^{(t)}$ 、 $M^{(t)}$ 、 $F^{(t)}$  组成集对在时间周期  $\tau$  中的状态转移概率矩阵  $V_\tau$ , 并求得  $n$  个变化周期内的平均状态转移概率矩阵  $\bar{V}_{nr}$ 。根据评估联系度和威胁等级的状态转移概率矩阵, 结合联系度的概念建立航班安保威胁态势动态评估模型, 即在  $(t, t + \tau)$  时段, 得到航班安保威胁评估联系度为

$$u^{(t+\tau)} = (a^{(t+\tau)}, b^{(t+\tau)}, c^{(t+\tau)}) V_\tau (1, i, j)^T \quad (14)$$

假设每个变化周期的状态转移概率矩阵均为  $V_\tau$ , 则  $n$  个周期后航班安保威胁态势评估联系度为

$$u^{(t+n\tau)} = (a^{(t)}, b^{(t)}, c^{(t)}) \bar{V}_{nr} (1, i, j)^T \quad (15)$$

式(15)符合目前在学术界较为权威的切普曼-科尔莫戈罗夫(C-K, Chapman-Kolmogorov)方程的基本条件, 即对某一系统来说, 若在  $t \rightarrow +\infty$  的条件下系统进行了多次状态转移, 则可以认为系统状态趋于稳定且保持不变。根据 Markov 链的遍历性, 经过  $n$  个周期转移后,  $\bar{V}_{nr}$  将趋于稳定。因此,  $t$  时刻的状态在经过  $n$  个周期后, 也将达到稳定状态。因此, 通过式(16)可

得到航班安保威胁态势的稳态联系度<sup>[18]</sup>, 即

$$\begin{cases} (\hat{a} \ \hat{b} \ \hat{c}) \cdot (I - \bar{V}_{nr}) = 0 \\ \hat{a} + \hat{b} + \hat{c} = 1 \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c} \geq 0$ ;  $I$  为单位矩阵。计算得出稳态联系度为

$$\hat{u} = \hat{a} + \hat{b}i + \hat{c}j \quad i \in [-1, 1], j = -1 \quad (17)$$

根据得到的稳态联系度和集对势, 全面综合分析航班安保威胁态势变化情况, 可以确定未来稳态下下一个周期的威胁态势等级, 航班安保威胁态势动态变化情况可根据表 4 进行判断。

表 4 航空安保威胁态势动态评估变化趋势

Tab. 4 Changing trend of dynamic assessment of flight security threat

posture		
集对势	大小关系	评估结果
同势 $a > c$	$a > b > c$	同势很强
	$b = c$	同势强
	$b < c$	同势较强
	$a = b, b > c$	同势减弱
	$a < b, b > c$	同势微弱
均势 $a = c$	$a > b, b < c$	均势强
	$a = b, b = c$	均势相等
	$a < b, b > c$	均势微弱
反势 $a < c$	$a > b, b < c$	反势很强
	$a = b, b < c$	反势强
	$a < b, b < c$	反势较弱
	$a < b, b = c$	反势弱
	$a < b, b > c$	反势微弱

### 3 实例应用

以 2021 年机上案(事)件数据为基础, 以月为单位对航班安保威胁态势进行动态评估。首先, 根据指标量化准则得到每个月各指标的威胁等级, 如表 5 所示。

依据式(10)得到每个月的航班安保威胁评估联系度  $u^{(t)}$ , 即

$$u^{(1)} = 0.544 + 0.308i + 0.148j$$

$$u^{(2)} = 0.595 + 0.262i + 0.143j$$

$$u^{(3)} = 0.651 + 0.201i + 0.201j$$

$$u^{(4)} = 0.546 + 0.191i + 0.263j$$

$$u^{(5)} = 0.653 + 0.051i + 0.296j$$

$$u^{(6)} = 0.592 + 0.247i + 0.161j$$

$$u^{(7)} = 0.708 + 0.150i + 0.143j$$

式中:  $i \in [-1, 1]$ , 其值趋近于 0;  $j = -i$ , 为对立度系数。

以 1~6 月的数据进行动态分析, 根据式(11)~式(13)得到逐个周期的状态转移概率矩阵为

表 5 指标威胁等级判定结果

Tab. 5 Determination results of indicator threat level

指标	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月
X <sub>1</sub>	S	S	S	S	S	S	S
X <sub>2</sub>	S	S	S	S	S	S	S
X <sub>3</sub>	S	S	S	S	S	S	S
X <sub>4</sub>	S	S	S	S	S	S	S
X <sub>5</sub>	S	S	S	S	S	S	S
X <sub>6</sub>	S	S	S	S	S	S	S
X <sub>7</sub>	M	M	S	F	S	F	S
X <sub>8</sub>	M	F	S	M	F	M	F
X <sub>9</sub>	M	M	M	F	F	F	M
X <sub>10</sub>	S	S	F	S	F	M	M
X <sub>11</sub>	F	M	F	S	S	M	S
X <sub>12</sub>	M	M	F	F	F	F	M
X <sub>13</sub>	S	S	S	F	M	S	S
X <sub>14</sub>	F	M	S	S	S	S	F
X <sub>15</sub>	M	S	M	F	F	M	S
X <sub>16</sub>	S	S	F	M	F	S	F
X <sub>17</sub>	F	F	M	M	S	S	S
X <sub>18</sub>	M	F	S	M	S	M	S

$$V_{1-2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.5226 & 0.1664 & 0.3110 \\ 0.3181 & 0.6819 & 0 \end{pmatrix}$$

$$V_{2-3} = \begin{pmatrix} 0.7552 & 0.0860 & 0.1588 \\ 0.1912 & 0.4034 & 0.4053 \\ 0 & 0.3303 & 0.6697 \end{pmatrix}$$

$$V_{3-4} = \begin{pmatrix} 0.6852 & 0.1470 & 0.1678 \\ 0.2352 & 0 & 0.5047 \\ 0.2621 & 0.2372 & 0.5007 \end{pmatrix}$$

$$V_{4-5} = \begin{pmatrix} 0.9142 & 0 & 0.0858 \\ 0 & 0.4997 & 0.5003 \\ 0.5849 & 0.1942 & 0.2208 \end{pmatrix}$$

$$V_{5-6} = \begin{pmatrix} 0.7554 & 0.1556 & 0.0890 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.3468 & 0.4924 & 0.1608 \end{pmatrix}$$

式中, V<sub>1-2</sub> 代表 1—2 月之间的状态转移概率矩阵, 以此类推。假设在每个月之间的航班安保威胁状态转移概率矩阵的权重不变, 则由此可得出 6 个月的航班安保威胁平均状态转移概率矩阵为

$$\bar{V}_{57} = \begin{pmatrix} 0.8220 & 0.0777 & 0.1003 \\ 0.1898 & 0.4139 & 0.3443 \\ 0.3024 & 0.3872 & 0.3104 \end{pmatrix}$$

进一步由式(15)预测 7 月的航班安保威胁联系度

$$u^{(7)j} = 0.6061 + 0.2039i + 0.1891j$$

在假设航班安保威胁态势平均状态转移概率矩阵一直不变的情况下, 根据式(16)和式(17), 可由以下方程组求得航班安保威胁态势的稳态联系度

$$\begin{cases} (\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}) \begin{pmatrix} 0.1780 & -0.0777 & -0.1003 \\ -0.1898 & 0.5861 & -0.3443 \\ -0.3024 & -0.3872 & 0.6896 \end{pmatrix} = 0 \\ \hat{a} + \hat{b} + \hat{c} = 1 \\ \hat{u} = 0.3342 + 0.3221i + 0.3436j \end{cases}$$

由各月份的联系度及稳态联系度可以得到安保威胁等级及发展趋势, 结果如表 6 所示。

表 6 航班安保威胁态势各月份联系度、集对势与评估结果

Tab. 6 Monthly correlation degree, set-pair potential and assessment results of flight security threat posture

月份	联系度	集对势	威胁等级	发展趋势
1 月份	0.396	3.665	低风险	同势很强
2 月份	0.452	4.164	低风险	同势很强
3 月份	0.450	3.243	低风险	同势很强
4 月份	0.283	2.077	中风险	同势较强
5 月份	0.357	2.205	低风险	同势较强
6 月份	0.431	3.680	低风险	同势很强
7 月份	0.565	4.951	低风险	同势很强
7 月份预测值	0.417	3.205	低风险	同势很强

结合表 6 的计算结果可知, 4 月份航班安保威胁处于中风险, 集对势  $shi(H) > 1$  属于同势, 根据表 4 分析 4 月份属于同势较强, 即保持低风险航班安保威胁水平存在一定困难, 需要对航班安保威胁保持警惕以维持低风险。其他月份航班安保威胁评级均为低风险, 且集对势  $shi(H) > 1$ , 大部分时间属于同势, 即保持低风险航班安保威胁水平的可能性很大, 可以暂时保持当前安保措施。7 月航班安保威胁联系度预测值的对应等级为低风险, 威胁等级和发展趋势与实际数据评估结果一致。

#### 4 结语

本文引入了态势评估的概念, 通过 SPA 与 Markov 链的结合构造了航班安保威胁态势动态评估模型, 以月为评估周期验证了模型的可行性, 不仅能够对当前威胁状态进行评级, 还可以对航班安保威胁的发展趋势进行分析, 预测未来稳态下综合航班安保威胁等级。

在实际航班运行中, 航空公司可根据本模型得出的威胁态势, 调整勤务派遣等级或对机上安保措施做出调整, 更高效地做好航班安保勤务工作。

此外,本文的工作是基于宏观层面和宏观数据的航班安保威胁态势评估,但宏观由微观构成,月度数据由每日数据构成,如何利用月度数据进行日安保威胁态势评估,对于航班安保更具有针对性和有效性,将成为下一步研究的方向。

**参考文献:**

[1] ZHAO J N, SHI L N, ZHANG L. Application of improved unascertained mathematical model in security evaluation of civil airport[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2017, 8(3): 1989-2000.

[2] 冯文刚, 黄 静. 基于深度学习的民航安检和航班预警研究[J]. 数据分析与知识发现, 2018, 2(10): 46-53.

[3] 冯文刚. 基于深度长短记忆模型的民航安保事件分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(9): 1-7.

[4] 赵振武, 张 怡, 唐百慧. 美国航空货运安保供应链研究[J]. 综合运输, 2022, 44(5): 126-131.

[5] KEMP R, SMITH R. Security and safety incidents and standards[J]. Cyber Security: A Peer-Reviewed Journal, 2021, 5(2): 164-176.

[6] 鞠晨阳, 冯文刚, 何晓春. 基于区块链的民航安保信息共享模型研究[J]. 中国民航大学学报, 2021, 39(6): 43-48.

[7] XIANG J W, LIU Y, LUO Z P. Flight safety measurements of UAVs in congested airspace [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(5): 1355-1366.

[8] 李 欣, 段詠程. 基于改进隐马尔可夫模型的网络安全态势评估方法[J]. 计算机科学, 2020, 47(7): 287-291.

[9] 陈小妮, 许永存. 山区高速公路交通安全态势评估和预警技术研究[J]. 公路, 2019, 64(10): 168-172.

[10] 聂兴信, 马义洁, 艾维茜, 等. 矿工身心安全的多元系数影响态势评估[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(10): 189-195.

[11] 中华人民共和国交通运输部, 中国民用航空局. 公共航空旅客运输飞行中安全保卫工作规则: CCAR-332-R1[S]. 北京: 中国民航出版社, 2017.

[12] DENG J L. Figure on difference information space in Grey relational analysis[J]. Journal of Grey System, 2004, 16(2): 96-100.

[13] 李 芊, 张 翔, 顾清华, 等. 基于信息云组合权重与灰色关联度改进的 TOPSIS[J]. 系统工程, 2022, 40(5): 150-158.

[14] 赵克勤. 集对分析及初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000: 11-33.

[15] 孙晋众, 陈世权. 一种集对分析的动态模型及其应用[J]. 系统工程, 2004(5): 35-38.

[16] 亢 永, 许开立, 刘家喜. 城市埋地燃气管道危险性 SPA-Markov 链评价预测模型[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(3): 147-152.

[17] 张一瑶, 吴诗辉, 刘晓东, 等. 基于集对分析和马尔科夫链的航空维修安全动态评估[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(1): 122-128.

[18] 高 扬, 王向章. 基于 SPA-Markov 的飞行安全态势评估与预测研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(8): 87-91.

[19] 常志朋, 刘小弟, 张世涛. 基于高阶 Markov 链的重大决策社会风险变权集对预测模型[J]. 控制与决策, 2018, 33(12): 2243-2250.

[20] CUI Y, FENG P, JIN J L, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method[J]. Entropy, 2018, 20(5): 104-114.

(责任编辑:孟 欣)

## 《中国民航大学学报》投稿须知

本刊投稿采用网上投稿,不接受电子邮件等其他方式投稿,投稿网址 [https://www.cauc.edu.cn/jweb\\_cauc/CN/1674-5590/home.shtml](https://www.cauc.edu.cn/jweb_cauc/CN/1674-5590/home.shtml)。本刊未委托或授权其他任何网站或机构开展组稿活动,请作者投稿时认准我刊唯一投稿网址,请勿相信其他机构或人员,如遇到假冒我刊的网站或人员可致电编辑部进行举报,举报电话:(022)24092327,举报电子邮箱:xuebao@cauc.edu.cn。热忱欢迎广大作者关注《中国民航大学学报》并惠赐佳作。