

文章编号: 1674-8190(2022)01-086-07

# 通用机场机坪运行安全风险评估方法研究

李明捷, 黄诗轶

(中国民用航空飞行学院 机场学院, 广汉 618307)

**摘要:** 传统机场机坪运行评价方法在确定指标权重方面存在不足, 而模糊评价法在确定隶属度时主观判断较多。结合通用机场机坪运行特点建立评价指标体系, 采用变权和相对差异函数的方法对通用机场机坪运行安全风险进行评估。首先运用变权理论对各评价指标的常数进行调整, 体现单个指标对评价结果的影响; 然后利用相对差异函数确定单因素对各安全等级的隶属度, 消除模糊评判隶属度向量受专家经验和认识的局限性; 最后对风险值进行计算, 得出通用机场机坪运行风险水平。结果表明: 该机场机坪运行风险水平计算结果正确, 该方法能客观反映风险源对风险评估值的影响。

**关键词:** 通用航空; 变权理论; 可变模糊集理论; 相对差异函数; 风险评价

中图分类号: V351.11

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.01.09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on Safety Risk Assessment Method of General Airport Apron Operation

LI Mingjie, HUANG Shiyi

(School of Airport, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** The traditional assessment method of airport apron operation has the disadvantage of determining the index weight, and there are too many subjective judgment for membership degree determining in the fuzzy evaluation method. In combination with the operation characteristics of general airport apron, the assessment index system is established, and the variable weight and relative difference function method is used to assess the safety risks of general airport apron operations. Firstly, the variable weight theory is used to adjust the constant weight of each evaluation index. And then the relative difference function is used to determine the single factor on membership degree of each safety level, so as to eliminate the limitation of fuzzy adjustment membership vector given by experts' experience and knowledge. Finally, the risk value is calculated to obtain the risk level of airport apron operation. The results show that the risk level calculation result is correct, and the proposed method can reflect the impact of risk sources on risk assessment value objectively.

**Key words:** general aviation; variable weight theory; variable fuzzy set theory; relative difference function; risk assessment

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-05-22

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金(U1733127)

通信作者: 黄诗轶, 1162397683@qq.com

引用格式: 李明捷, 黄诗轶. 通用机场机坪运行安全风险评估方法研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(1): 86-92.

LI Mingjie, HUANG Shiyi. Study on safety risk assessment method of general airport apron operation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(1): 86-92. (in Chinese)

## 0 引言

通用航空短途运输相较于铁路、公路等交通方式而言,具有受地形限制小、投资少、灵活性强等特点。自2020年1月1日民航局《B类通用机场备案办法(试行)》实施以来,通用机场备案数量持续增加。截至2020年6月底,纳入民航行业管理的通用机场数量达290个,其中A类通用机场111个(A1类75个,A2类22个,A3类14个),通用机场在数量上首次超过运输机场,其类型主要为跑道型和高架直升机场<sup>[1]</sup>。与运输机场相比,通用机场具有航空器品种繁杂、使用机型多、飞行时间不确定、飞行作业项目多样化、基础设施不完善、机场运行保障资源不足、从业人员培训不到位、运行管理不规范等特点,这给通用机场机坪运行安全带来很大风险。

目前,国内外对民用航空运输安全的研究多侧重于运输航空的飞行安全和空中交通服务。ISO/IEC 31010—2009《风险管理——风险评估技术》推荐了31种用于风险评估的技术方法<sup>[2]</sup>;刘刚等<sup>[3]</sup>采用主观赋权与客观赋权相结合的组合赋权法确定评价指标的权重,建立了机场机坪安全风险双层灰色评价模型,综合评价机坪的安全状况,主客观组合赋权得到更为科学合理的权重系数,所采用的灰色评价方法能与机坪的安全风险灰色特征相适应;张晓全等<sup>[4]</sup>采用事故树的方法定性分析原因,系统建立了机场机坪安全评价指标体系,采用灰色关联分析对机场机坪区域的整体风险进行评价,定性分析和定量分析相结合的综合评价模型较好地解决了评价指标难以准确量化和统计的问题,但所用的灰色评价方法只是对评判对象的优劣做出鉴别,并不反映绝对水平;陈明亮等<sup>[5]</sup>运用事件树、故障树、Bowtie等方法建立机坪运行的安全绩效指标,提出基于安全绩效的机坪运行风险评估模型,进行多层次运行风险评估,但权重的确定依据海恩法则并结合专家评价较为主观。为克服常权的主观性,突出较差指标对评估结果的影响,研究者对变权理论进行研究<sup>[6-9]</sup>。为克服模糊综合评价中隶属度确定不明确,避免评价过程大量运用主观判断,导致因素权重的确定带有一定的主观性问题,还有一些研究者运用可变模糊集理论、相对差异函数等评价方法,去除风险评价中的主观因素<sup>[10-12]</sup>。

本文结合通用航空机坪运行特点,建立通用

机场机坪风险评价指标体系;采用变权理论和相对差异函数相结合的方法,评估通用机场机坪运行安全风险;并以某飞行训练机场为实例,对方法的可行性进行验证。

## 1 通用机场机坪风险识别及风险评估指标体系的构建

本文采用专家咨询法和模糊统计法,结合通用机场机坪典型不安全事件致因,参考中国民用航空局已施行的民用机场安全评估指标体系,依据《通用机场管理规定》(征求意见稿)、《运输机场机坪运行管理规则》等相关法律法规和规范性文件,从硬件、软件、人和环境四个方面考虑,初选出评价指标。通过征求相关工作人员及专家,根据参考文献[13-14]的要求,最终建立由设施设备因素A、管理因素B、人员因素C、环境因素D共4个一级评价指标,及机坪道面完好率 $A_1$ 等14个二级指标的通用机场机坪风险评估指标体系,如图1所示。由于通用航空机坪设施设备配备受机场用途、飞行区等级、使用时间和频率等因素影响较大,故选取机坪道面完好率 $A_1$ 、机坪隔离防护措施 $A_2$ 、目视助航设施 $A_3$ 及特种设备配置情况 $A_4$ 作为评价指标;通用机场机坪运行安全管理主要参照运输机场执行,管理水平参差不齐,因此选用规章制度完善程度 $B_1$ 、应急预案完善程度 $B_2$ 、车辆驾驶管理情况 $B_3$ 、特种设备完好率 $B_4$ 等作为评价指标;通用机场普遍存在专业人员短缺、培训不到位等情况,故选取人员技术水平 $C_1$ 、平均年龄 $C_2$ 及培训合格率 $C_3$ 等作为评价指标;环境因素主要考虑天气与气象条件 $D_1$ 、涉及连续作业或夜间运行的机坪动态环境条件 $D_2$ 以及机坪卫生状况 $D_3$ 。

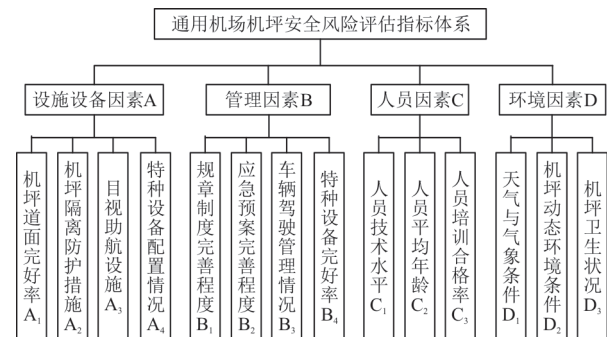


图1 通用机场机坪安全风险评估指标体系

Fig. 1 Risk assessment index system of general airport apron

## 2 变权的基本原理

本文将变权思想引入到风险评价中来。变权原理的中心思想是:指标因素的权重随着因素状态值的变化而变化,以使指标因素的权重更好体现相应指标因素在评价中的作用。其基本步骤<sup>[6]</sup>如下:

**步骤 1:** 确定各评价指标的常权值  $w^0 = (w_1^0, w_2^0, \dots, w_m^0)$ , 且满足  $w_i > 0, i = 1, 2, \dots, m$ ,  $\sum_{i=1}^m w_i^0 = 1$ , 则称  $w^0$  为常权向量, 常权向量一般通过专家打分法、层次分析法等得到。

**步骤 2:** 确定状态变权向量  $S_x = [S_1(x), S_2(x), \dots, S_m(x)]$ 。

$$S_i(x) = \begin{cases} 1 & x_i \in [0, a] \\ \frac{w_i^0}{b-a}(x_i - a) & x_i \in (a, b] \\ w_i^0 & x_i \in (b, c] \\ d \left[ 1 - \frac{w_i^0(1-x_i)}{1-c} \right] & x_i \in (c, 1] \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x_i$  为指标  $i$  的风险模糊隶属度值, 通常采取专家打分法确定;  $a$  为否定水平,  $b$  为及格水平,  $c$  为激励水平,  $a, b, c \in [0, 1]$ ;  $d$  为激励调节水平, 与激励的水平成反比,  $d \in (0, 1)$ ;  $w_i^0$  为常权权重。

当  $0 \leq x_i \leq a$  时, 惩罚程度最大; 当  $a < x_i \leq b$  时, 惩罚程度随  $x_i$  的增大而减小; 当  $b < x_i \leq c$  时, 对该指标因素主观上既不惩罚, 也不激励; 当  $c < x_i \leq 1$  时, 对该指标因素进行激励, 且激励程度随  $x_i$  的增大而增大。

**步骤 3:** 计算各评价指标变权值。由以上定义, 根据变权原理, 指标  $i$  的变权可以表示为

$$w_i(x) = \frac{w_i^0 S_i(x)}{\sum_{j=1}^m w_j^0 S_j(x)} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

变权向量  $w_x$  是常权向量  $w^0$  与状态变权向量  $S_x$  的 Hardarmard 乘积。因此可以通过构造状态变权向量的途径来构造变权。

## 3 相对差异函数模型及其指标特征值的模糊化

常用的隶属度向量确定方法有模糊统计方法、专家经验法和利用分布函数将指标特征值模

糊化等<sup>[15]</sup>。模糊统计方法和专家经验法往往受专家经验和认识程度的影响, 结果差别较大, 且形式、区间固定, 可调节性差。赵然杭等<sup>[9]</sup>提出的可变模糊集理论中, 相对差异函数模型的具体实质与优点详见文献[10]。因此本文采用该方法确定因素的安全隶属度向量, 相对差异函数的具体定义详见文献[10]。

点  $x, M$  与  $[a, b]$  及  $[c, d]$  的位置关系如图 2 所示, 点与区间定义及参数间的关系详见文献[6-10]。



图 2 点  $x, M$  与  $[a, b]$  及  $[c, d]$  的位置关系

Fig. 2 The positional relationship between the point  $x, M$  and  $[a, b], [c, d]$

$x$  落到  $M$  点左侧时:

$$\begin{cases} D_A(u) = \left( \frac{x-a}{M-a} \right)^\beta & x \in [a, M] \\ D_A(u) = -\left( \frac{x-a}{c-a} \right)^\beta & x \in [c, a] \end{cases} \quad (3)$$

$x$  落到  $M$  点右侧时:

$$\begin{cases} D_A(u) = \left( \frac{x-b}{M-b} \right)^\beta & x \in (M, b] \\ D_A(u) = -\left( \frac{x-b}{d-b} \right)^\beta & x \in (b, d] \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\beta$  为非负指数, 通常可取  $\beta=1$ , 即相对差异函数模型为线性函数<sup>[10, 15-16]</sup>。

式(3)或式(4)满足: 当  $x=a$  或  $x=b$  时,  $D_A(u)=0$ ; 当  $x=M$  时,  $D_A(u)=1$ ; 当  $x=c, x=d$  时,  $D_A(u)=-1$ 。

$D_A(u)$  确定以后, 根据式(5)可求解相对隶属度  $\mu_A(u)$  为

$$\mu_A(u) = [1 + D_A(u)]/2 \quad (5)$$

通过此方法可得到最终的隶属度矩阵, 方法步骤详见文献[10]。

## 4 实例分析

### 4.1 变权值的计算

以某飞行训练机场为评价对象, 首先采用层次分析法获取各指标的常权, 然后采用公式(1)和

公式(2)计算评价指标体系的状态变权和变权值。考虑民航高风险的行业特点,必需加大惩罚力度,相对减小激励力度。但由于通用机场的设施设备配备与维护情况、人员的培训情况、规章制度的完善情况普遍较低,取定否定水平  $a=0.6$ ,及格水平  $b=0.7$ ,激励水平  $c=0.9$ ,激励调节水平  $d=0.8$ 。即当某个指标因素评价模糊值低于 0.6 时,对其惩

罚程度达到最大;而在 0.6~0.7 之间时,惩罚程度相对减小;在 0.7~0.9 之间时,不惩罚也不激励;在 0.9~1.0 之间时才对该因素指标进行激励,目的是减小评价指标因素的激励程度。先采用层次分析法获取各个指标的常数,然后通过专家打分分别得到风险可能性和风险严重度的分值,如表 1 所示。

表 1 机坪安全风险评估指标体系及权重取值  
Table 1 Apron safety risk assessment index system and weight values

一级评价指标	二级评价指标	常数 $w_i^0$	风险可能性		风险严重度	
			专家打分值 $x_i$	变权 $w_i$	专家打分值 $x'_i$	变权 $w'_i$
设施设备因素 A	机坪道面完好率 $A_1$	0.126	1(0.8)	0.035	1.6(0.68)	0.014
	机坪隔离防护措施 $A_2$	0.248	0.5(0.9)	0.135	2(0.6)	0.280
	目视助航设施 $A_3$	0.073	2.5(0.5)	0.160	3(0.4)	0.082
	特种设备配置情况 $A_4$	0.553	1.5(0.7)	0.670	2(0.6)	0.624
管理因素 B	规章制度完善程度 $B_1$	0.500	3.5(0.3)	0.571	3.5(0.3)	0.500
	应急预案完善程度 $B_2$	0.288	3(0.4)	0.329	2.5(0.5)	0.288
	车辆驾驶管理情况 $B_3$	0.066	2.5(0.5)	0.075	3(0.4)	0.066
	特种设备完好率 $B_4$	0.146	1(0.8)	0.024	3(0.4)	0.146
人员因素 C	人员技术水平 $C_1$	0.580	3.5(0.3)	0.644	3.5(0.3)	0.580
	人员平均年龄 $C_2$	0.112	1(0.8)	0.014	2(0.6)	0.112
	人员培训合格率 $C_3$	0.308	3(0.4)	0.342	3.5(0.3)	0.308
环境因素 D	天气与气象条件 $D_1$	0.124	1(0.8)	0.017	2(0.6)	0.124
	机坪动态环境条件 $D_2$	0.643	3.5(0.3)	0.721	3.5(0.3)	0.643
	机坪卫生状况 $D_3$	0.233	3(0.4)	0.262	3.5(0.3)	0.233

由于式(1)中的  $x_i$  一般是 0~1 之间的一个数值,数值越大表示该项指标安全性越高,系统风险越小。故需采用极差变换法,对其进行标准化处理为 [0,1] 之间的无量纲数值,指标值越大表示该项指标安全性越好,处理后的结果见表 1 括号中的数值。从表 1 可以看出:变权考虑了各项指标在整个整体评价中的重要性,在指标 A 中,该机场目视助航设施  $A_3$  的分值仅为 0.50,位于否定水平之下,通过变权计算,将其权重由原来的 0.073 调整至 0.160,增强了该指标在整个评价体系中的权重。避免由于该因素对评价结果的影响被其他因素中和,而使得整个系统的危险性降低。

### 4.2 隶属度的确定

安全风险是对危险源的可能性与严重程度的

度量,即对危险源后果的评估。通常情况下,安全风险是通过可以度量的数字形式来确定的。安全风险=风险可能性×风险严重度<sup>[17]</sup>,安全风险可能性是指危险源发生的可能性。如把安全风险可能性定义为 [0,1)、[1,2)、[2,3)、[3,4) 及 [4,5] 五个区间,每个区间分别对应极不可能、不可能、较少、偶尔、频繁。安全风险严重度是指某一危险源导致的后果的严重程度<sup>[17]</sup>。如把安全风险严重度定义为 [0,1)、[1,2)、[2,3)、[3,4) 及 [4,5] 五个区间,分别表示可忽略的、较小的、重大的、危险的和灾难的<sup>[13-14]</sup>。

以一级评价指标设施设备 A 中的 4 个二级评价指标为例,简要说明其风险可能性和风险严重度隶属度的计算。首先,确定 4 个指标风险可能性和风险严重度的吸引域矩阵  $I_{Aab}$  和全体范围

域矩  $I_{Acd}$

$$I_{Aab} = \begin{bmatrix} [0, 1] & [1, 2] & [2, 3] & [3, 4] & [4, 5] \\ [0, 1] & [1, 2] & [2, 3] & [3, 4] & [4, 5] \\ [0, 1] & [1, 2] & [2, 3] & [3, 4] & [4, 5] \\ [0, 1] & [1, 2] & [2, 3] & [3, 4] & [4, 5] \\ [0, 1] & [1, 2] & [2, 3] & [3, 4] & [4, 5] \end{bmatrix}$$

$$I_{Acd} = \begin{bmatrix} [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] \\ [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] \\ [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] \\ [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] \\ [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] & [0, 5] \end{bmatrix}$$

其次,计算风险可能性,根据表 1 数据,  $x_A = (1 \ 0.5 \ 2.5 \ 1.5)^T$ , 根据  $M$  的物理意义以及四个评价指标的特性,详见上述隶属度确定的定义与方法,得到:

$$M_A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0.5 & 1.5 & 2.5 & 3.5 & 4.5 \\ 1 & 2 & 3 & 3.5 & 4 \\ 0.5 & 1.5 & 2.5 & 3 & 4 \end{bmatrix}$$

运用公式(3)、公式(4)和公式(5)求取其风险可能性隶属度矩阵,得到:

$$\mu_A = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.500 & 0.250 & 0.167 & 0.125 \\ 1.000 & 0.250 & 0.125 & 0.083 & 0.063 \\ 0.313 & 0.417 & 0.750 & 0.417 & 0.313 \\ 0.438 & 1.000 & 0.375 & 0.250 & 0.188 \end{bmatrix}$$

归一化计算后得到:

$$R_A = \begin{bmatrix} 0.324 & 0.324 & 0.162 & 0.108 & 0.081 \\ 0.658 & 0.164 & 0.082 & 0.055 & 0.041 \\ 0.141 & 0.189 & 0.400 & 0.189 & 0.141 \\ 0.194 & 0.444 & 0.167 & 0.111 & 0.083 \end{bmatrix}$$

同理可得其他各指标值的严重程度和隶属度矩阵,由于篇幅限制具体计算过程不再罗列。

### 4.3 计算风险可能性和严重度向量

由  $E=WR$  同理可以计算得到通用机场机坪安全风险可能性向量和严重度向量:

$$E_{A1} = W_A R_A = [0.035 \ 0.135 \ 0.160 \ 0.670]$$

$$\begin{bmatrix} 0.324 & 0.324 & 0.162 & 0.108 & 0.081 \\ 0.658 & 0.164 & 0.082 & 0.055 & 0.041 \\ 0.141 & 0.189 & 0.400 & 0.189 & 0.141 \\ 0.194 & 0.444 & 0.167 & 0.111 & 0.083 \end{bmatrix} =$$

$$(0.253 \ 0.361 \ 0.193 \ 0.116 \ 0.087)$$

同理,可计算得到指标 A 的严重度向量以及 B,C,D 的风险可能性和风险严重度向量,将以上数据进行整理得到整个评价指标体系的风险可能性矩阵  $R$  及风险严重度矩阵  $R'$ ,即:

$$R = \begin{bmatrix} 0.253 & 0.361 & 0.193 & 0.116 & 0.087 \\ 0.114 & 0.149 & 0.221 & 0.315 & 0.201 \\ 0.109 & 0.143 & 0.211 & 0.330 & 0.208 \\ 0.107 & 0.140 & 0.205 & 0.339 & 0.210 \end{bmatrix}$$

$$R' = \begin{bmatrix} 0.186 & 0.294 & 0.254 & 0.177 & 0.133 \\ 0.115 & 0.153 & 0.246 & 0.296 & 0.191 \\ 0.105 & 0.140 & 0.196 & 0.352 & 0.209 \\ 0.106 & 0.141 & 0.196 & 0.350 & 0.208 \end{bmatrix}$$

由式(1)和式(2)计算得到 A,B,C,D 的变权值  $w_i = (0.175 \ 0.488 \ 0.248 \ 0.089)$ 。

则通用机场机坪安全风险可能性向量和严重度向量为

$$E_1 = w_i \cdot R = (0.137 \ 0.184 \ 0.212 \ 0.286 \ 0.184)$$

$$E_2 = w_i \cdot R' = (0.144 \ 0.196 \ 0.234 \ 0.258 \ 0.177)$$

### 4.4 模糊综合值的计算

对  $E_1$  和  $E_2$  进行归一化处理,通用机场机坪安全风险可能性综合值和严重度综合值分别为:  $L = E_1' \cdot V^T = (0.137 \ 0.184 \ 0.212 \ 0.286 \ 0.184)$   $(1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5)^T = 3.203$ ;  $S = E_2' \cdot V^T = (0.143 \ 0.194 \ 0.232 \ 0.256 \ 0.175)$   $(1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5)^T = 3.272$ 。

某通用机场机坪系统风险综合值为  $N = L \times S = 3.203 \times 3.272 \approx 10.480$ 。根据参考文献[18-19]采用的分级方法,则该机场风险度分级如表 2 所示。

表 2 风险度分级  
Table 2 Risk level grading

风险度	措 施
[1,5)	低风险,在考虑风险的各种因素后,机场正常运行。
[5,10)	中等风险,机场可以继续运行,但必须采取风险控制措施。
[10,25]	高风险,不可以接受。机场采取对应的控制措施,直至风险降低后才能恢复工作。

采用模糊综合评价对该通用机场机坪安全风险状况进行评估,结果对比情况如表 3 所示。

表3 计算结果对比

Table 3 Calculation results contrast

评价方法	评价价值	风险度
模糊综合评价	8.929	中等风险
变权与相对差异函数评价	10.480	高风险

从表3可以看出:变权与相对差异函数的运用,不仅可以考虑风险状况较差的单个指标对评价结果的影响,使得评价结果更为客观真实;并且能够消除模糊评判隶属度向量物理意义不确定、受专家经验和认识局限等缺点,具有适合区间形式标准值等优点。根据变权与相对差异函数评价结果,则该机场的机坪处于高度风险,机场应立即采取措施,如加强目视助航设施的完善、增加特种设备的配置、加大对特种设备的维护力度、提高人员的培训合格率、改善人员的工作条件、加强机坪卫生监管等,直至风险降低后才能恢复工作。

## 5 结 论

(1) 本文采用变权方法对常权重进行调节,实现了对较差指标的“惩罚”,使得风险评估的结果更加客观合理。

(2) 利用可变模糊评价中的相对隶属函数对风险度和后果严重程度的隶属度矩阵进行计算,进而得到风险度对应的等级,便于对通用机场机坪安全风险状况进行评估。

(3) 变权和相对差异函数的方法为深入开展我国通用机场机坪安全评价提供理论参考依据。

### 参 考 文 献

- [1] 中国民用航空局. 通用机场分类管理办法[S]. 北京: 中国民用航空局, 2017.  
Civil Aviation Administration of China. General airport classification management measures[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2017. (in Chinese)
- [2] International Electrotechnical Commission, Commission Electrotechnique Internationale. Risk management: risk assessment techniques: ISO/IEC 31010—2009[S]. US: International Electrotechnical Commission, Commission Electrotechnique Internationale, 2009.
- [3] 刘刚, 朱金福. 机坪安全灰色评价方法[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(5): 600-604.  
LIU Gang, ZHU Jinfu. Grey analysis of airport apron safety [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(5): 600-604. (in Chinese)
- [4] 张晓全, 刘旭. 机场机坪风险管理研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(3): 42-47.  
ZHANG Xiaoquan, LIU Xu. Study on risk management of airport apron[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(3): 42-47. (in Chinese)
- [5] 陈明亮, 张元, 陈艳秋. 基于安全绩效的机坪运行风险评估研究[J]. 民航学报, 2018, 6(2): 90-94.  
CHEN Mingliang, ZHANG Yuan, CHEN Yanqiu. Apron operation risk assessment based on safety performance[J]. Journal of Civil Aviation, 2018, 6(2): 90-94. (in Chinese)
- [6] 李德清, 李洪兴. 状态变权向量的性质与构造[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2002, 38(4): 455-461.  
LI Deqing, LI Hongxing. The properties and construction of state variable weight vectors[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2002, 38(4): 455-461. (in Chinese)
- [7] 穆富岭, 武昌, 吴德伟. 维修保障系统效能评估中的变权综合法初探[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(6): 693-696.  
MU Fuling, WU Chang, WU Dewei. Study on the synthetic method of variable weight of effectiveness evaluation of maintenance support system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(6): 693-696. (in Chinese)
- [8] 刘高磊, 戴冉, 王滔, 等. 变权云物元模型在船舶定线制后评估中的应用[J]. 上海海事大学学报, 2019, 40(4): 66-71, 88.  
LIU Gaolei, DAI Ran, WANG Tao, et al. Application of variable-weight cloud matter-element model in post-evaluation of ships' routing[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2019, 40(4): 66-71, 88. (in Chinese)
- [9] 赵然杭, 陈守煜. 模糊可变评价模型在评价农村水利现代化中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(2): 218-223.  
ZHAO Ranhang, CHEN Shouyu. Application of fuzzy variable set model to evaluation of rural hydro-modernization [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(2): 218-223. (in Chinese)
- [10] 潘科, 石剑云. 变权和相对差异函数在地铁运营安全评价中的应用[J]. 铁道学报, 2009, 31(3): 20-25.  
PAN Ke, SHI Jianyun. Application of variable weight theory and relative difference function in safety assessment of urban subway operation[J]. Journal of The China Railway Society, 2009, 31(3): 20-25. (in Chinese)
- [11] 张明媛. 城市承载能力及灾害综合风险评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.  
ZHANG Mingyuan. Research on the assessment of disaster-carrying capability and disaster comprehensive risk in urban place[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [12] 金雪松, 朱红, 苏红旗. 民航机场危险源严重度评价方法研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2010, 21(6): 17-20.

- JIN Xuesong, ZHU Hong, SU Hongqi. Study on evaluation method of hazard severity of civil aviation airport[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2010, 21(6): 17-20. (in Chinese)
- [13] International Civil Aviation Organization. Safety management manual (SMM): Doc 9859 [S]. US: International Civil Aviation Organization, 2018.
- [14] International Civil Aviation Organization. Annex19 safety management[S]. US: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [15] 梁红. 未确知数学在地铁工程施工安全评价中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
- LIANG Hong. Research on the application of unascertained mathematics in subway engineering construction safety evaluation[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010. (in Chinese)
- [16] 尉强. 基于变权和相对差异函数的地铁运营安全管理评价[J]. 价值工程, 2019, 38(3): 37-39.
- WEI Qiang. Evaluation of subway operation safety management based on variable weight and relative difference function [J]. Value Engineering, 2019, 38(3): 37-39. (in Chinese)
- [17] 石荣. 基于最优组合赋权的航空公司飞行安全风险评估[J]. 交通运输工程与信息学报, 2014, 12(2): 36-41.
- SHI Rong. Airline's flight safety risk assessment based on optimal combination weight method[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2014, 12(2): 36-41. (in Chinese)
- [18] 王威, 宋卓, 刘晓然, 等. 基于直觉模糊集的城市供水安全预警评价模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(4): 180-185.
- WANG Wei, SONG Zhuo, LIU Xiaoran, et al. Early warning and evaluation model of urban water supply security based on intuitionistic fuzzy set[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(4): 180-185. (in Chinese)
- [19] 华景会. 浅谈飞机引导车的风险管理与控制[J]. 江苏航空, 2013(2): 8-9.
- HUA Jinghui. On the risk management and control of aircraft guided vehicles[J]. Jiangsu Airlines, 2013(2): 8-9. (in Chinese)

#### 作者简介:

李明捷(1981—),女,硕士,副教授。主要研究方向:机场规划设计、机场安全运行管理、机场净空管理。

黄诗轶(1996—),女,硕士研究生。主要研究方向:机坪运行管理。

(编辑:丛艳娟)