

# 基于强模糊云的机场刚性道面易损性评价

张宇辉<sup>1</sup>, 李林泉<sup>1</sup>, 寇伟彬<sup>1</sup>, 顾欣<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学交通科学与工程学院, 天津, 300300; 2. 中智航科(天津)技术有限公司, 天津, 300300)

**摘要** 为进一步完善民用机场飞行区道面的评价体系,在现有的道面评价管理技术规范基础上,建立新的刚性道面易损性评价体系,综合考虑结构和功能2个方面对道面做出综合易损性评价,分别选取有代表性的5个结构性指标和4个功能性指标,并通过熵权法确定各指标在子体系中的权重,借助模糊云评价模型在定性概念和定量描述之间相互转化的突出优势,在拓展云模型(ECM)的基础上提出强模糊云(SFCM)模型,建立道面综合易损性评价模型。结合中国南部某机场实际机场道面检测数据分析,得到该机场道面综合易损性评价值为2.277,道面评价结果为具有较大易损性,评价结果的置信度接近1,说明计算结果有效,同时与ECM的评价结果(2.123)一致,证明评价结果可靠。SFCM充分考虑评价指标不完全符合标准正态分布的特性,构建偏峰分布并增强区间过渡的模糊性,评价结果更符合实际。

**关键词** 交通运输规划与管理;易损性评价体系;云模型;机场道面

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.05.005

**中图分类号** V351.11 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)05-0037-09

## A Vulnerability Evaluation of Airport Rigid Pavement Based on Strong-Fuzzy Cloud Model

ZHANG Yuhui<sup>1</sup>, LI Linqun<sup>1</sup>, KOU Weibin<sup>1</sup>, GU Xin<sup>2</sup>

(1. Transportation Science and Engineering Department, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Zhongzhi Intelligent Aviation Technology (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

**Abstract** In order to further improve the assessment system for civil airport runway pavements, a new rigid pavement vulnerability evaluation system is developed on the basis of existing technical specifications for pavement evaluation and management. This system comprehensively evaluates the vulnerability of pavements in consideration of both structural and functional aspects. Five representative structural indicators and four functional indicators are selected, and their weights within the sub-systems are determined by using entropy weight method. With the aid of an advantage of the prominent ability of the fuzzy cloud evaluation model in transforming between qualitative concepts and quantitative descriptions, a Strong-Fuzzy Cloud Mode(SFCM) is proposed based on the Extended Cloud Model(ECM). Then, the comprehensive vulnerability assessment model for runway pavements is established. By analyzing the actual pavement inspection data from a southern airport, the comprehensive vulnerability assessment value for this pavement is determined as 2.277, indicating a high level of vulnerability. The confidence level of the assessment re-

收稿日期: 2023-11-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600500)

作者简介: 张宇辉(1984-),男,山西吕梁人,副教授,研究方向为机场智慧运行和机场智慧道面等。E-mail: xueyingshuang@163.com

**引用格式:** 张宇辉,李林泉,寇伟彬,等.基于强模糊云的机场刚性道面易损性评价[J].空军工程大学学报,2024,25(5):37-45. ZHANG Yuhui, LI Linqun, KOU Weibin, et al. A Vulnerability Evaluation of Airport Rigid Pavement Based on Strong-Fuzzy Cloud Model[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(5):37-45.

sults is close to 1, demonstrating the validity of the calculated results. Furthermore, the assessment result is consistent with the evaluation result (2.123) obtained by using ECM, confirming the reliability of the assessment outcome. The SFCM takes into account the non-conformity of evaluation indicators to the standard normal distribution, constructs skewed distributions, and enhances the fuzziness of interval transitions, whereas the results of assessment conform even more to reality.

**Key words** transportation planning and management; vulnerability evaluation system; cloud model; airport runway pavements

机场跑道是航空器起飞、着陆和运行最依赖的对象,道面基础设施的结构和功能完好是航空器运行安全的必要保障。本文在现有机场道面检测和评价方法的基础上,针对机场道面性能建立易损性评价模型,根据道面各指标检测数据对道面服役期间的健康状态做出综合易损性评价。学者们根据易损性衡量对象的不同给出了不同的定义和研究方法,但基本思想和目标一致,即针对目标暴露于环境或社会等外界压力下因缺乏足够适应变化的能力而导致对伤害的易感状态展开研究<sup>[1-4]</sup>。道面基础设施易损性用于表征跑道设施综合服务能力的易损程度,是基础设施在长期使用过程中所处于的不健康状态以及在恶劣天气如降雨、暴雪等条件下运行的风险水平。实际中,道面的使用性能和运行风险受到内部和外部的影响,内部受结构强度、表面状态等因素影响,外部受天气等运行环境影响,由于天气不可控制,道面自身易损性的控制就显得尤为重要。

对于机场内道面状况的研究,已经有众多国内外学者通过不同的方法得到许多有效的研究成果,但大部分的研究重点关注道面单因素的影响,如 Benedetto<sup>[5]</sup>和 Merio 等<sup>[6]</sup>分别对短时暴雨条件下摩擦性能的损失和长周期使用条件下摩擦性能的衰减展开深入研究,凌建明等<sup>[7-9]</sup>针对道面平整度评价开展了大量研究,剖析了国际平整度和波音平整度的适用性和局限性,并提出了基于动力学模型的道面平整度评价分析方法<sup>[10]</sup>。陈东方等<sup>[11]</sup>提出基于多维模糊决策模型的计算方法,该模型综合考虑了道面的结构性和功能性,基于历史数据的分析比较,对当前道面状况进行综合评价,一定程度上克服了传统评价模型片面、单一的缺点,然而由于历史数据量少且难以获取,该方法的合理性有待考证且适用性受到制约。

结合已有的研究和当前面临的实际问题,可以得到机场道面综合评价的关键在于以下 3 点:①如何全面考量诸多影响因素;②如何实现定量检测数据向定性评价的转换;③如何使评价方法简单高效且具有广泛适用性。

针对以上问题,Zhang<sup>[10]</sup>提出的拓展云模型

(extended cloud model, ECM)提供了一种新的探究思路。本文在其基础上,突破标准正态云模型对数据的限制,保留正态分布的信息中心性,强化相邻区间边界过渡连贯性,提出强模糊云模型(strong-fuzzy cloud model, SFCM),结合易损性评价指标体系,建立刚性道面综合易损性评价模型,为完善机场道面评价体系提供一定参考。

## 1 强模糊云评价模型

### 1.1 拓展云模型(ECM)

云模型由中国工程院院士李德毅于 1995 年提出<sup>[13]</sup>,是处理定性概念和定量描述的不确定转换模型,现已成功地应用到许多领域<sup>[14]</sup>,具有普遍适用性的正态隶属云,揭示了自然科学和社会科学中大量模糊概念的隶属云所遵循的基本规律,在建立评价体系方法中具有良好的普遍适用性<sup>[15-19]</sup>。云模型主要通过 3 个数学特征描述,包含 3 次正态分布规律,记作:

$$M^3 = (E_x, E_n, H_e) \quad (1)$$

式中: $E_x$  为期望; $E_n$  为熵; $H_e$  为超熵。

正态隶属云期望曲线方程为:

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x - E_x)^2}{2E_n'^2}\right) \quad (2)$$

式中: $E_n' \sim N(E_n, H_e)$ 。

拓展云模型将传统云模型和可拓理论相结合,用云特征 $(E_x, E_n, H_e)$ 表示待评价物元量值的经典区间 $(a_{ji}, b_{ji})$ ,有利于抑制区间参数,评价中可以直接使用原始数据,避免了归一化程序导致潜在信息的丢失,故而可以适应复杂的评价环境,拓展云的待评价物元表示为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} N & c_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $N$  为事物。ECM 虽具有广泛的适用性,但也具有一定的局限性,即量值数据需明显符合标准正态分布。

1.2 强模糊云模型(SFCM)

不同于 ECM 局限于标准正态云, SFCM 将每一个标准云的完整对称特征( $E_x, E_n, H_e$ )区分为不同的 2 个半云组合( $E_x, E_{nl}, E_{nr}, H_e$ ), 同时构造强模糊边界, 更加突出不同等级云边界的模糊性和过渡连贯性。新的云滴分布特征根据指标区间特征呈偏斜分布, 既包含了正态分布云信息中心值的重要性, 还包含了半云分布的数字特征, 构成了具有强适应性的组合云<sup>[20-21]</sup>。

对于强模糊云的分布特征, 以 3 个评价等级 A、B、C 为例, 分别对应 3 个递增的数值区间  $[a_1, a_2)$ 、 $[a_2, a_3)$ 、 $[a_3, +\infty)$ , 其中区间 C 的经验值为  $k$  ( $k > a_3$ ), 可通过式(4)~式(6)计算:

$$\left\{ \begin{aligned} E_{xA} &= \frac{1}{2}(a_1 + a_2) \\ E_{nA} &= \frac{1}{3}(E_{xA} - a_1) \\ E_{nrA} &= \frac{1}{3}(E_{xB} - E_{xA}) \\ H_{eA} &= \frac{E_{nA} + E_{nrA}}{20} \\ \mu_A(x)_l &= 1 \\ \mu_A(x)_r &= \exp\left(-\frac{(x - E_{xA})^2}{2E'_{nrA}{}^2}\right) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} E_{xB} &= \frac{1}{2}(a_2 + a_3) \\ E_{nB} &= \frac{1}{3}(E_{xB} - E_{xA}) \\ E_{nrB} &= \frac{1}{3}(E_{xC} - E_{xB}) \\ H_{eB} &= \frac{E_{nB} + E_{nrB}}{20} \\ \mu_B(x)_l &= \exp\left(-\frac{(x - E_{xB})^2}{2E'_{nB}{}^2}\right) \\ \mu_B(x)_r &= \exp\left(-\frac{(x - E_{xB})^2}{2E'_{nrB}{}^2}\right) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} E_{xC} &= k \\ E_{nC} &= \frac{1}{3}(E_{xC} - E_{xB}) \\ E_{nrC} &= \frac{1}{3}E_{nC} \\ H_{eC} &= \frac{E_{nC} + E_{nrC}}{20} \\ \mu_C(x)_l &= \exp\left(-\frac{(x - E_{xC})^2}{2E'_{nC}{}^2}\right) \\ \mu_C(x)_R &= 1 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中: $E_{xi}$  为各区间的期望; $E_{nli}$ 、 $E_{nri}$  分别为评价云左、右半云的熵; $H_{ei}$  为评价各评价云的超熵;

$\mu_i(x)_l$  和  $\mu_i(x)_r$  分别为量值  $x$  对应各评价等级的隶属度。

标准云和强模糊云的分布特征曲线分别如图 1(a)和图 1(b)所示:

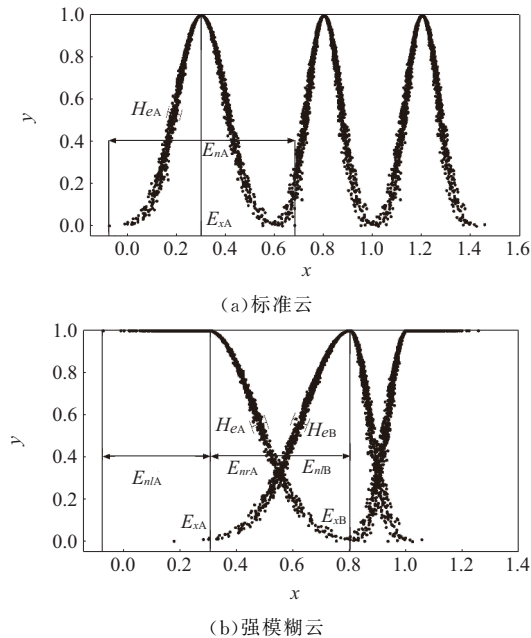


图 1 标准云和强模糊云分布特征曲线  
Fig. 1 Distribution characteristic curve of standard cloud model and strong-fuzzy cloud model

2 道面状况风险评价体系

2.1 关键指标

机场道面受损的类别繁多、方式多样, 如道面自身的板块裂缝、角隅断裂、沉陷错台、胀裂、脱空, 以及雨雪天气下道面面层的积水、结冰等, 良好的跑道道面至少应具备以下特点: ①足够的强度和刚度; ②良好的表面摩擦性能; ③良好的耐久性; ④良好的排水性能。

根据水泥混凝土道面特点可将衡量跑道道面健康状况的因素变量分为 2 类: 结构变量  $N_s$  和功能变量  $N_f$ , 如表 1 所示。结构变量包含 5 个表征道面力学结构性能指标, 功能变量包含 4 个表征道面表面使用性能指标。其中, 基于道面等级号 (pavement classification number, PCN) 的概念定义新的指标: 承载安全系数 = 道面 PCN 实测值 / 道面 PCN 通报值。PCN 由国际民用航空组织 (international civil aviation organization, ICAO) 推荐使用, 与飞机等级号 (aircraft classification number, ACN) 共同用于评价道面等级、确定道面限制飞机起飞重量。PCN 反映道面承载能力, PCN 越大表示道面能承受的荷载越大, 而承载安全系数反映道面承载能力的安全裕度, 承载安全系数越大, 表示允起降最大等级号飞机使用该跑道时更可靠, 反之则风险更大。

表 1 水泥混凝土道面评价指标

Tab. 1 Evaluation index of cement concrete pavement

变量 $N$	指标因素 $C$	指标名称	描述
结构变量 $N_s$	$C_{s_1}$	承载安全系数	最大允起降机型使用该跑道的可靠性
	$C_{s_2}$	结构状况指数	衡量道面结构性损坏程度的综合指标
	$C_{s_3}$	接缝弯沉比传递系数 %	道面板接缝两侧的荷载比值
	$C_{s_4}$	混凝土弯拉强度/MPa	道面板抵抗变形的能力
	$C_{s_5}$	基顶反应模量/(MN/m <sup>3</sup> )	基层顶面混凝土反应模量
功能变量 $N_f$	$C_{f_1}$	道面状况指数	衡量道面非结构性损坏程度的综合指标
	$C_{f_2}$	道面摩擦系数	标准湿态道面摩擦系数
	$C_{f_3}$	国际平整度指数/(m/km)	表征道面平整程度
	$C_{f_4}$	道面构造深度/mm	道面拉毛和刻槽质量

## 2.2 风险等级划分

安全生产领域一般将风险划分为 4 个等级,分别为重大(Severe)、较大(High)、一般(Medium)和

低(Low),在本文的研究中延续该思想,将道面综合易损性与已划分的风险等级对应,分为 4 个等级,如表 2 所示。

表 2 易损性等级划分及安全控制标准

Tab. 2 Vulnerability classification and safety control standards

评价等级	风险等级	易损性等级	相关安全控制措施
I	低	低易损性	道面状况良好,按照场地要求进行日常检查和维护
II	一般	一般易损性	道面状况一般,对可能存在病害的位置重点关注;对可能发生的病害提前做好应急预防准备
III	较大	较大易损性	道面状况较差,需对道面进行更全面检测,根据检测结果制定维修方案 做好停航准备
IV	重大	重大易损性	加强天气监测,预防恶劣天气下安全隐患扩大,必要时可停航规避恶劣天气下运行风险 道面状况很差,停航全面检修 邀请专家对道面存在的病害问题进行成因分析,对维修和养护方案给出指导意见 对维修后的道面再次进行安全评估

评价指标中结构状况指数、基顶反应模量、接缝弯沉比传递系数、道面状况指数、国际平整度、构造深度和摩擦系数可根据业内现有研究基础<sup>[22]</sup>和规范<sup>[23-24]</sup>得到其 4 级风险区间,而对于承载安全指数

和混凝土弯拉强度,通过对中国 20 个机场(飞行区等级涵盖 4F、4E、4D、4C)近 5 年飞行区道面检测结果进行整理并进行描述性统计分析,对 4 级风险区间指标参数的样本描述如表 3 所示。

表 3 原始样本数据描述分析

Tab. 3 Raw sample data is descriptive and analyzed

变量	样本量	最大值	最小值	平均值	标准差	中位数	方差	峰度	偏度	变异系数
$C_{s_1}$	227	2.505	0.604	1.023	0.191	1.0	0.037	23.718	3.501	0.187
$C_{s_4}$	142	12.050	3.870	5.515	0.857	5.4	0.735	23.858	3.517	0.155

基于当前样本数据集统计分析结果,变量  $C_{s_1}$  和  $C_{s_4}$  的变异系数均大于 0.15,说明样本中存在异常数据,使用可视化差异性分析——箱线图法对样本数据进行分析(如图 2 所示,以  $C_{s_1}$  为例),结果显示数据集中较小侧和较大侧存在少量异常值,说明数据集分布基本稳定,将识别出的异常值删除处理后再次分析得到新的样本,新样本分析结果如表 4 所示,对筛选后的样本数据采用四分位法进行频数分析,结果如表 5 所示。

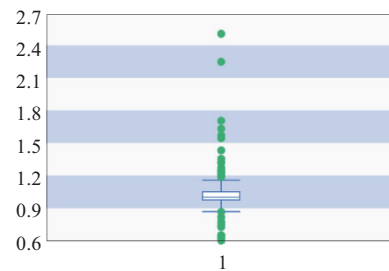
图 2  $C_{s_1}$  样本数据箱线图Fig. 2 Box plot of  $C_{s_1}$  sample data

表 4 新的样本数据描述分析

Tab. 4 New sample data description analysis

变量	样本量	最大值	最小值	平均值	标准差	中位数	方差	峰度	偏度	变异系数
$C_{s_1}$	191	1.132	0.879	1.005	0.047	1.000	0.002	0.376	0.302	0.047
$C_{s_4}$	138	6.980	3.870	5.419	0.567	5.395	0.322	0.345	0.166	0.105

表 5 频数分析结果

Tab. 5 Frequency analysis results

变量	选项	频数	百分比/ %	累计百分比/ %
$C_{s_1}$	[0.879,0.985)	48	21.145	21.145
	[0.985,1.0)	9*	3.965*	25.110*
	[1.0,1.027)	85	37.445	62.555
	[1.027,1.132]	49	21.586	84.141
	合计	191	100.000	100.000
$C_{s_4}$	[3.87,5.045)	35	24.648	24.648
	[5.045,5.395)	34	23.944	48.592
	[5.395,5.818)	34	23.944	72.535
	[5.818,6.98]	35	24.648	97.183
	合计	138	100.000	100.000

注: \* 因观测值 1.0 频数较高且在区间边界,导致区间[1.0, 1.027)频数较高而区间[0.985,1.0)频数较低,最终分析结果并无异常。

由此得到承载安全指数和混凝土弯拉强度的 4 级区间等级划分,并综合表 3 得到最终的 4 级评价指标区间,如表 6 所示。

表 6 4 级区间风险等级划分(9 个指标因素)

Tab. 6 Four-level interval risk classification (9 index factors)

N	C	评价等级			
		I	II	III	IV
$C_{s_1}$	[1.027,1.132]	[1.0,1.027)	[0.985,1.0)	[0.879,0.985)	
	(90,100]	(85,90]	(80,85]	[0,80]	
$N_s$	$C_{s_3}$	(80%,100%]	(56%,80%]	(31%,55%]	[0%,31%]
	$C_{s_4}$	[5.818,6.98]	[5.395,5.818)	[5.045,5.395)	[3.87,5.045)
$N_f$	$C_{f_1}$	(120,+∞)	(60,120]	(25,60]	[0,25]
	$C_{f_2}$	[85,100]	[70,85]	[40,70]	[0,40]
	$C_{f_3}$	(0.7,0.8]	(0.6,0.7]	(0.5,0.6]	[0,0.5]
	$C_{f_4}$	[0,2.5)	[2.5,3.5)	[3.5,4.3)	[4.3,+∞)
		[1.0,+∞)	[0.8,1.0)	[0.6,0.8)	[0,0.6)

2.3 云特征参数

根据式(4)~式(6)计算得各指标云特征参数,结果如表 7 所示。

表 7 云特征参数

Tab. 7 Cloud feature parameters

C	M	评价等级			
		I	II	III	IV
$C_{s_1}$	$E_x$	1.08	1.01	0.99	0.93
	$E_{nt}$	0.02	0.01	0.02	0.02
	$E_{nr}$	0.04	0.02	0.01	0.02
	$H_e$	0.00	0.00	0.00	0.00
$C_{s_2}$	$E_x$	95.00	87.50	82.50	40.00
	$E_{nt}$	2.50	1.67	14.17	13.33
	$E_{nr}$	4.17	2.50	1.67	14.17
$C_{s_3}$	$H_e$	0.33	0.21	0.79	1.38
	$E_x$	0.90	0.68	0.44	0.16
	$E_{nt}$	0.07	0.08	0.09	0.05
$C_{s_4}$	$E_{nr}$	0.11	0.07	0.08	0.09
	$H_e$	0.01	0.01	0.01	0.01
	$E_x$	6.40	5.61	5.22	4.46
$C_{s_5}$	$E_{nt}$	0.26	0.13	0.25	0.20
	$E_{nr}$	0.46	0.26	0.13	0.25
	$H_e$	0.04	0.02	0.02	0.02
$C_{f_1}$	$E_x$	120.00	90.00	42.50	12.50
	$E_{nt}$	10.00	15.83	10.00	4.17
	$E_{nr}$		10.00	15.83	10.00
$C_{f_2}$	$H_e$	1.00	1.29	1.29	0.71
	$E_x$	92.50	77.50	55.00	20.00
	$E_{nt}$	5.00	7.50	11.67	6.67
$C_{f_3}$	$E_{nr}$	7.50	5.00	7.50	11.67
	$H_e$	0.63	0.63	0.96	0.92
	$E_x$	0.75	0.65	0.55	0.25
$C_{f_4}$	$E_{nt}$	0.03	0.03	0.10	0.08
	$E_{nr}$	0.05	0.03	0.03	0.10
	$H_e$	0.00	0.00	0.01	0.01
$C_{f_5}$	$E_x$	1.25	3.00	3.90	4.30
	$E_{nt}$	0.42	0.58	0.30	0.13
	$E_{nr}$	0.58	0.30	0.13	
$C_{f_6}$	$H_e$	0.05	0.04	0.02	0.01
	$E_x$	1.00	0.90	0.70	0.30
	$E_{nt}$	0.03	0.07	0.13	0.10
$C_{f_7}$	$E_{nr}$		0.03	0.07	0.13
	$H_e$	0.00	0.01	0.01	0.01

### 3 基于 SFCM 的综合易损性计算

#### 3.1 隶属度计算

隶属度用来衡量评价对象对于各评价区间的倾向性,设  $P_i$  为待评价对象  $P$  的第  $i$  个评价因子的实际测量值,则  $P$  可表示为:

$$P = [N, C, V] = \begin{bmatrix} N & c_1 & p_1 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & p_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $N$  为事物; $C$  为特征; $V$  为量值。在 ECM 中, $P_i$  作为一个云滴,其原始数据无需经过标准化就可以作为模型数据输入。对于评价等级  $j$  ( $j=1, 2, 3, 4$ ),云滴  $P_i$  对其隶属度  $\mu(P_i)$  可通过式(4)~式(6)计算,得到  $P$  的隶属度矩阵  $\mu$  为:

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \mu_{14} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \mu_{n3} & \mu_{n4} \end{bmatrix} \quad (8)$$

#### 3.2 熵权法确定指标权重

对 20 个机场道面近 8 年道面检测报告中相关数据的整理,如表 8 所示,使用熵权法分别得到各指标因素在子体系中的权重  $W$ ,  $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$ ,如表 9 所示。

表 8 我国 20 个机场道面检测数据

Tab. 8 Pavement detection data of 20 airports in China

C	机场编号				
	1	2	...	19	20
$C_{s_1}$	1.000	1.027	...	1.109	0.983
$C_{s_2}$	84	82	...	85	82
$C_{s_3}$	97%	99%	...	99%	98%
$C_{s_4}$	5.18	5.62	...	5.39	5.71
$C_{s_5}$	115.00	91.60	...	70.69	143.20
$C_{f_1}$	83	83	...	83	80
$C_{f_2}$	0.61	0.62	...	0.66	0.67
$C_{f_3}$	2.525	2.625	...	2.45	1.99
$C_{f_4}$	0.402	1.047	...	0.327	0.345

表 9 子体系各指标权重

Tab. 9 The weights of each indicator in the subsystem

指标	$C_{s_1}$	$C_{s_2}$	$C_{s_3}$	$C_{s_4}$	$C_{s_5}$
$\omega_s$	0.456	0.107	0.101	0.187	0.148
指标	$C_{f_1}$	$C_{f_2}$	$C_{f_3}$	$C_{f_4}$	
$\omega_f$	0.178	0.202	0.229	0.391	

#### 3.3 综合易损性计算

根据指标权重和隶属度矩阵计算评价向量  $Y$ ,

通过加权平均得到变量易损性  $V$  和综合易损性  $S$ ,具体计算方法如式(9)~式(11)所示:

$$Y = W\mu = [y_1, y_2, y_3, y_4] \quad (9)$$

$$V = \frac{\sum_{i=1}^4 (y_i \times i)}{\sum_{i=1}^4 y_i} \quad (10)$$

$$S = \frac{V_s + V_f}{2} \quad (11)$$

式中: $V_s$  和  $V_f$  分别为结构变量易损性和功能变量易损性。

综合易损性  $S$  值分为  $[0, 1]$ 、 $[1, 2]$ 、 $[2, 3]$ 、 $[3, 4]$  4 个区间,分别对应等级 I、II、III、IV。由于隶属度计算过程参数  $E'_n$  来源于  $E_n$  和  $He$  构成的标准正态分布,其取值具有一定随机性,重复计算  $n$  次会得到一系列结果集  $(S_1, S_2, \dots, S_n)$ ,对于该结果集,采用期望  $\bar{S}$  和方差  $\sigma$  描述,并用置信度  $\theta$  衡量计算结果的可靠性:

$$\theta = \frac{\bar{S} - \sigma}{\bar{S}} \quad (12)$$

## 4 实例分析

根据《MH/T5024-2019 民用机场道面评价管理技术规范》,中国某南部机场最近一次的道面检测结果显示:

1)道面状况指数  $PCI=77$ ,损坏状况评价等级为“良”,整体状况良好;道面破损主要是反射裂缝、轮辙损坏。

2)道面结构状况指数  $SCI=81$ ,结构承载能力满足要求。

3)跑道左测线的接缝弯沉比传荷系数均值为 0.45,接缝传荷能力为“次”(0.31~0.55),测线 53.3%道面板存在板边脱空、23.1%道面板存在板角脱空;跑道右测线的接缝弯沉比传荷系数均值为 0.63,接缝传荷能力为“中”(0.56~0.80),测线 63.2%道面板存在板边脱空、66.4%道面板存在板角脱空。

4)跑道左测线刚性道面基顶模量的均值为 116  $MN/m^3$ ,强度等级为“B”,属于中强度等级;跑道右测线刚性道面基顶模量均值为 114  $MN/m^3$ ,强度等级为“B”,属于中强度等级。

5)道面芯样劈裂试验结果显示机场水泥混凝土芯

样抗弯拉强度均值为 6.31 MPa,95%保证率下的代表值为 5.32 MPa,弯拉弹性模量均值为 38.02 GPa,95%保证率下代表值为 30.25 GPa。

6)道面 PCN 测算结果为 105/R/B/W/T,本着安全原则以 95/R/B/W/T 对外通报。

7)跑道平整度综合评价为“良”,其中右测线国际平整度指数 IRI 平均值为 2.56(2.5~3.5),左测线国际平整度指数 IRI 平均值为 2.61(2.5~3.5)。

8)机场自有表面摩阻测试车(平均测速 94 km/h)测得跑道 1 号方向道面湿态摩擦系数:跑道 1/3 的平均摩擦系数为 0.51;跑道 2/3 的平均摩擦系数为 0.62;跑道 3/3 的平均摩擦系数为 0.63,平均值为 0.59,整体测线摩擦系数等级评定为“好”。跑道 2 号方向道面湿态摩擦系数:跑道 1/3 的平均摩擦系数为 0.60;跑道 2/3 的平均摩擦系数为 0.61;跑道 3/3 的平均摩擦系数为 0.62,平均值为 0.61;整体测线摩擦系数评价等级为“好”。依据 2 条测线测试结果,跑道湿态道面综合平均摩擦系数为 0.60,大于 0.47,但接地带范围摩擦系数较低,区域纹理衰减严重,经多次除胶作业仍对摩擦系数提升有限,建议重新刻槽或盖被等方式改造。使用摆式摩擦测试仪测得取样点的平均摩擦系数为 0.72。

9)道面双测线采用铺砂法测得构造深度平均值为 0.449 mm。

各指标的检测结果如表 10 所示。

表 10 道面检测结果

Tab. 10 Pavement test results

指标	$C_{s_1}$	$C_{s_2}$	$C_{s_3}$	$C_{s_4}$	$C_{s_5}$
检测值	1.105	81	54%	5.32	115
指标	$C_{f_1}$	$C_{f_2}$	$C_{f_3}$	$C_{f_4}$	
检测值	77	0.72	2.585	0.449	

根据式(4)~式(11)可得结构变量和功能变量的隶属度矩阵  $\mu_s, \mu_f$ , 评价向量  $Y$ , 变量易损性  $V_s, V_f$ , 以及综合易损性  $S$ , 计算流程中某一次计算过程数据如下:

1)将  $P$  中  $N_s$  和  $N_f$  代入式(4)~式(6)中  $\mu(x)$  的相关公式,得到各指标分别对应 4 个评价等级的隶属度矩阵  $\mu_s$  和  $\mu_f$ :

$$\mu_s = \begin{bmatrix} 1 & 2.7 \times 10^{-11} & 1.9 \times 10^{-24} & 7.6 \times 10^{-16} \\ 1.5 \times 10^{-6} & 6.6 \times 10^{-4} & 9.9 \times 10^{-1} & 2.0 \times 10^{-2} \\ 1.5 \times 10^{-5} & 2.0 \times 10^{-1} & 5.3 \times 10^{-1} & 2.7 \times 10^{-4} \\ 9.8 \times 10^{-7} & 5.2 \times 10^{-2} & 7.5 \times 10^{-1} & 1.2 \times 10^{-4} \\ 8.7 \times 10^{-1} & 4.5 \times 10^{-3} & 7.0 \times 10^{-5} & 1.9 \times 10^{-19} \end{bmatrix}$$

$$\mu_f = \begin{bmatrix} 1.2 \times 10^{-2} & 1 & 2.2 \times 10^{-2} & 3.6 \times 10^{-5} \\ 1.4 \times 10^{-17} & 4.8 \times 10^{-2} & 9.4 \times 10^{-1} & 1.2 \times 10^{-2} \\ 9.7 \times 10^{-2} & 8.1 \times 10^{-1} & 1.1 \times 10^{-4} & 4.5 \times 10^{-31} \\ 6.7 \times 10^{-2} & 1.5 \times 10^{-4} & 2.8 \times 10^{-32} & 1 \end{bmatrix}$$

2)根据式(9),结合权重  $W$  计算评价向量  $Y_s$  和  $Y_f$ :

$$Y_s = [5.8e^{-1}, 4.5e^{-2}, 2.9e^{-1}, 2.1e^{-3}]$$

$$Y_f = [6.0e^{-2}, 3.6e^{-1}, 1.9e^{-1}, 3.9e^{-1}]$$

3)根据式(10),通过加权平均得到变量易损性  $V_s$  和  $V_f$ :

$$V_s = 1.69$$

$$V_f = 2.91$$

4)根据式(11),最终得到综合易损性:

$$S = 2.30$$

为消除计算结果的随机性,通过 1 000 次循环运算得到结果集  $(S_1, S_2, \dots, S_{1000})$ , 该结果集的期望  $\bar{S} = 2.277$ , 方差  $\sigma = 7.21 \times 10^{-4}$ , 置信度  $\theta = 0.999\ 684$ 。置信度  $\theta$  十分接近 1,表明计算结果具有显著可靠有效。为进一步验证模型的可靠性,使用 ECM 的方法进行对比,结果如表 11 所示。可见 2 种模型的评价结果相近,但 SFCM 计算结果的方差更小,置信度更高。

表 11 SFCM 和 ECM 的评价结果

Tab. 11 Evaluation results of SFCM and ECM

模型	$\bar{S}$	$\sigma$	$\theta$
SFCM	2.277 126	0.000 721	0.999 684
ECM	2.122 995	0.008 118	0.996 176

综上可以得到该机场的综合易损性为 2.277,属于评价等级 III(对等级 II 具有一定倾向性),道面基础设施具有较大易损性,面对不利气象条件时具有较大运行风险,需根据表 2 及时采取相关防范措施,结合具体检测结果,建议优先对道面表面纹理进行处理,如通过重新刻槽或盖被等方式,加大道面构造深度,增强雨雪天气下道面的抗滑和排水性能,降低机轮滑移风险。

## 5 结论

针对当前机场道面综合易损性复杂难以准确评价的问题,建立刚性道面易损性评价指标体系,基于传统云模型和 ECM 提出 SFCM,得到综合易损性评价模型。通过实例分析和 ECM 对验证得到以下结论:

1)根据实例机场的道面检测数据得到该机场道面综合易损性评价期望值为 2.277,置信度为

0.999 684,评价结果为较大易损性。

2)通过与 ECM 进行对比,两者的评价结果一致为较大易损性,证明 SF-CM 结果可靠,同时 SF-CM 的计算结果方差更小,置信度更高。

3)基于 SF-CM 构建的综合易损性评价模型具有适用性和合理性,能够为完善当前民航机场道面评价提供科学合理的参考依据。

## 参考文献

- [1] LUERS A L, LOBELL D B, SKLAR L S, et al. A Method for Quantifying Vulnerability, Applied to the Agricultural System of the Yaqui Valley, Mexico[J]. *Global Environmental Change*, 2003, 13 (4): 255-267.
- [2] LUERS A L. The Surface of Vulnerability: an Analytical Framework for Examining Environmental Change[J]. *Global Environmental Change*, 2005, 15 (3): 214-223.
- [3] ADGER W N. Vulnerability[J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 268-281.
- [4] MATTSSON L G, JENELIUS E. Vulnerability and Resilience of Transport Systems-a Discussion of Recent Research[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 81: 16-34.
- [5] BENEDETTO A. A Decision Support System for the Safety of Airport Runways: the Case of Heavy Rainstorms[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2002, 36(8): 665-682.
- [6] DE LUCA M, DELL'ACQUA G. Runway Surface Friction Characteristics Assessment for Lamezia Terme Airfield Pavement Management System[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2014, 34: 1-5.
- [7] 凌建明,刘诗福,袁捷,等.采用 IRI 评价机场道面平整度的适用性[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(1): 20-27.
- LING J M, LIU S F, YUAN J, et al. Applicability of IRI Based Evaluation of Airport Pavement Roughness[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(1): 20-27. (in Chinese)
- [8] 凌建明,刘诗福,李萌,等.波音平整度评价方法的局限性分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(8): 1035-1041.
- LING J M, LIU S F, LI M, et al. Application Limitation of Boeing Bump to Evaluation Runway Roughness[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46(8): 1035-1041. (in Chinese)
- [9] 凌建明,刘诗福,袁捷,等.机场道面平整度评价指标的相关性分析[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(3): 17-23.
- LING J M, LIU S F, YUAN J, et al. Analysis on Correlation of Evaluation Indicators of Airport Pavement Roughness[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(3): 17-23. (in Chinese)
- [10] 凌建明,刘诗福,袁捷,等.不平整激励下机场道面和公路路面平整度评价综合分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(4): 519-526.
- LING J M, LIU S F, YUAN J, et al. Comprehensive Analysis of Pavement Roughness Evaluation for Airport and Road with Different Roughness Excitation[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(4): 519-526. (in Chinese)
- [11] 陈东方,蔡良才,邵斌,等.基于历史数据矩阵的机场道面维护决策方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(8): 1947-1954.
- CHEN D F, CAI L C, SHAO B, et al. Maintenance Decision of Airport Pavement Based on Historical Data Matrix[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(8): 1947-1954. (in Chinese)
- [12] ZHANG L M, WU X G, DING L Y, et al. A Novel Model for Risk Assessment of Adjacent Buildings in Tunneling Environments[J]. *Building and Environment*, 2013, 65: 185-194.
- [13] 李德毅,孟海军,史雪梅.隶属云和隶属云发生器[J]. *计算机研究与发展*, 1995 (6): 15-20.
- LI D Y, MENG H J, SHI X M. Subordinate Clouds and Subordinate Cloud Generators [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 1995 (6): 15-20. (in Chinese)
- [14] 叶琼,李绍稳,张友华,等.云模型及应用综述[J]. *计算机工程与设计*, 2011, 32(12): 4198-4201.
- YE Q, LI S W, ZHANG Y H, et al. Cloud Model and Application Overview[J]. *Computer Engineering and Design*, 2011, 32(12): 4198-4201. (in Chinese)
- [15] 张渺. G1-EW 组合赋权云模型下地铁运营安全风险评价[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(6): 163-170.
- ZHANG M. Risk Assessment of Metro Operation Based on G1-EW Combination Weightingcloud Model [J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(6): 163-170. (in Chinese)
- [16] 蒋军,袁一平,邓萍,等.基于云模型和 VIKOR 法的重庆长江上游航运中心建设成效评价[J]. *中国航海*, 2023, 46(3): 91-97, 104.
- JIANG J, YUAN Y P, DENG P, et al. Effectiveness Evaluation of Chongqing Shipping Center Project with Cloud Model and VIKOR Method[J]. *Naviga-*



- tion of China,2023,46(3): 91-97,104. (in Chinese)
- [17] 米伟铭,叶鹏,张明理,等. 基于云模型的新型配电系统灵活性评估方法[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2532-2540.
- MI W M, YE P, ZHANG M L, et al. Novel Flexibility Evaluation for Distribution Systems Based on Cloud Models[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2532-2540. (in Chinese)
- [18] 李明捷,冯庆旺. 基于集对云的机坪运行管理移交安全评价研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(11): 169-176.
- LI M J, FENG Q W. Study on Safety Evaluation of Apron Operation Management Transfer Based on Set Pair Cloud[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(11): 169-176. (in Chinese)
- [19] 王媛,刘佳豪,郝泽嘉,等. 基于AHP-云模型的大型输水倒虹吸安全综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 79-84.
- WANG Y, LIU J H, HAO Z J, et al. Comprehensive Safety Evaluation of Large Water Conveyance Inverted Siphon Based on AHP-Cloud Model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 79-84. (in Chinese)
- [20] 陈绍南,陈碧云,韦化,等. 不规则风速概率分布的混合半云建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1314-1321.
- CHEN S N, CHEN B Y, WEI H, et al. Mixed Half-cloud Modeling Method for Irregular Probability Distribution of Wind Speed [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1314-1321. (in Chinese)
- [21] YANG J, LIU H R, YU X D, et al. Entropy-Cloud Model of Heavy Metals Pollution Assessment in Farmland Soils of Mining Areas[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2016, 25(3): 1315-1322.
- [22] 李岳,周则圆,蔡靖. 基于联系云的飞机轮胎滑水风险可拓评价模型[J/OL]. 北京航空航天大学学报, (2023-06-15) [2023-10-22]. <https://doi.org/10.13700/j. bh. 1001-5965. 2023. 0136>.
- LI Y, ZHOU Z Y, CAI J. Extensible Evaluation Model of Aircraft Tire Hydroplaning Risk Based on Connection Cloud[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, (2023-06-15)[2023-10-22]. <https://doi.org/10.13700/j. bh. 1001-5965. 2023. 0136>. (in Chinese)
- [23] 民用机场道面评价管理技术规范: MH/T 5024-2019[S]. 北京: 中国民航出版社, 2019.
- Technical Specifications for Pavement Evaluation and Management of Civil Airports: MH/T 5024-2019[S]. Beijing: Civil Aviation Press of China, 2019. (in Chinese)
- [24] 民用机场飞行区技术标准: MH 5001-2021[S]. 北京: 中国民航出版社, 2021.
- Technical Standards for Airfields at Civil Airports: MH/T 5001-2021[S]. Beijing: Civil Aviation Publishing House of China, 2021. (in Chinese)

(编辑:杜娟)