

中文引用格式:李航,刘新月,胡小兵.恶劣天气下民用机场运输服务韧性双层评估模型[J].中国安全科学学报,2025,35(9):78-86.

英文引用格式:LI Hang, LIU Xinyue, HU Xiaobing. A two-layer assessment model for resilience of civil airport transport services in severe weather[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9):78-86.

恶劣天气下民用机场运输服务韧性 双层评估模型^{*}

李航 讲师, 刘新月, 胡小兵 教授

(中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.1617

基金项目:天津市自然科学基金多元投入青年项目资助(23JCQNJC00230);民航安全能力建设项目(HA202511)。

【摘要】 为提高民用机场应对恶劣天气的能力,从整体和要素2个层面提出机场运输服务韧性双层评估模型,第1层模型:基于云模型的机场整体韧性评估,在明确机场运输服务韧性定义和内涵基础上,从机场的吸收-适应-恢复-优化4个核心韧性能力出发,建立包含28个评价要素的韧性指标体系,并基于云模型确定评价标准云,逐层计算各层指标云数字特征值,评估机场整体韧性水平;第2层模型:基于“重要度+障碍度”的民用机场关键韧性要素识别,考虑对机场整体韧性的贡献和阻碍程度,提出机场要素的重要度和障碍度表征方法,进而综合识别机场韧性的关键要素,并以A机场为例开展验证分析。结果表明:文中构建的指标体系和评估模型能够准确评估机场运输服务韧性水平、识别关键韧性要素;A机场的运输服务韧性总体得分为0.2847,处于高韧性水平,与实际情况相符,证明文中所提模型具有一定的科学性和有效性;员工应急救援水平、员工心理素质水平、员工的工作年限等为影响机场韧性水平的关键要素,需重点关注和提升。

【关键词】 恶劣天气; 民用机场; 运输服务韧性; 双层评估模型; 云模型; 关键韧性要素

A two-layer assessment model for resilience of civil airport transport services in severe weather

LI Hang, LIU Xinyue, HU Xiaobing

(College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China,
Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to enhance the ability of civil airports to cope with adverse weather conditions, a two-layer assessment model for airport transportation service resilience was proposed, addressing both the overall level and specific elements. The first-layer model—a cloud-based assessment of airport overall resilience—was based on a clear definition and understanding of airport transportation service resilience. Starting from the four core resilience capabilities of absorption, adaptation, recovery, and optimization, a resilience indicator system comprising 28 evaluation elements was established. Based on the cloud model, evaluation standard clouds were determined, and the numerical characteristics of each layer of indicator clouds were calculated layer by layer to assess the overall resilience level of the airport. The second-layer

* 文章编号:1003-3033(2025)09-0078-08; 收稿日期:2025-04-13; 修稿日期:2025-07-16

model-identification of key resilience elements of civil airports was based on "importance + obstacle degree" of airport elements considering the contribution and obstruction degree to the overall resilience of the airport, proposed methods to characterize the importance and obstacle degree of airport elements, and comprehensively identified the key elements of airport resilience. Subsequently, a case study was conducted using Airport A as an example. The results indicate that the indicator system and evaluation model constructed in this paper can accurately assess the resilience level of airport transportation services and identify key resilience factors. Airport A's overall transportation service resilience score was 0.284 7, which is at a high resilience level and consistent with the actual situation. Among these, employee emergency rescue capabilities, employee psychological qualities, and employee years of service are key factors affecting airport resilience levels and require special attention and improvement.

Keywords: severe weather; civil airport; transportation service resilience; two-layer assessment model; cloud model; key resilience factors

0 引言

民用机场作为民航运输的重要组成部分,为航班正常运行提供了关键的基础设施和起飞降落等运输服务。然而,近些年机场周边的各类扰动事件频发,例如:设备故障、外来物侵入、恶劣天气等^[1],严重影响机场的航班运输服务能力,尤其是恶劣天气干扰。据统计,2018—2024年上半年,全国(包括港澳台地区)共发生710起机场航班延误、取消等事件(统称航班不正常事件)^[2],其中,因天气原因导致的事件373起,占总航班不正常事件约50%。因此,亟待开展提高民用机场抵御恶劣天气能力的相关工作。

韧性一词可看作是表征系统吸收、适应外界扰动,并从扰动影响中快速恢复到正常功能的综合能力。目前,有关机场韧性研究主要聚焦恶劣天气对机场运行的影响^[3-4]。如齐麟等^[5-6]分别采用动态贝叶斯网络模型和航班数据收集等方法评估了机场韧性水平,为分析雨雪天气下机场运输功能的韧性表现,绘制了机场功能曲线图,并引入功能曲线与坐标轴围成的面积,以及机场正常功能水平与灾害持续时间的函数关系表征机场韧性水平^[7]。黄信等^[8]从物理、功能、经济和组织4个维度,建立了暴雪天气下机场基础设施系统韧性评估指标体系。ZHOU Lie等^[9]开发了一个弹性指标,以衡量机场在各种恶劣天气条件下的弹性表现,并证明了模式替代是运输系统的一种非常有效的弹性策略。李龙海等^[10]为提高机场日常运行的韧性水平,构建了机场韧性评估指标体系,并基于贝叶斯和多准则折衷排序法评估了机场韧性。部分学者也对机场航班延误的韧性评估方法展开研究。王兴隆等^[11]引入综合

韧性指数衡量了在恶劣天气下机场离场航班运行系统的韧性水平,通过遗传算法提高了航班在灾害天气下的恢复能力。陈仔燕^[12]为提高机场航班运行应对恶劣天气的韧性水平,引入长短期记忆网络模型预测了航班运行韧性。总的来说,现有关于机场运输服务和保障航班正常起降的研究相对较少,且倾向于航班延误的预测和恢复,对机场运输服务整体的韧性评估研究不足。

鉴于此,笔者拟在明确民用机场运输服务韧性的概念和内涵基础上,围绕机场的4个核心韧性能力,系统构建民用机场韧性评估指标体系,并从整体和要素2方面出发,提出一套双层评估模型,以期全面评估民用机场运输服务韧性水平和关键要素,提升民用机场抵御恶劣天气的能力。

1 运输服务韧性评估指标体系构建

1.1 民用机场运输服务韧性定义和内涵

文中民用机场运输服务主要聚焦航班正常起降的保障服务,结合相关传统韧性定义^[13-14],将恶劣天气下民用机场运输服务韧性定义为:在恶劣天气扰动下,民用机场系统能够有效应对、调整并迅速恢复至可接受的航班运输服务水平的能力,具体包括吸收、适应、恢复、优化4个韧性核心能力。为阐明民用机场运输服务韧性的内涵,从扰动前后及系统韧性过程2个维度构建民用机场运输服务韧性概念曲线,如图1所示,其中 t 表示时刻,区间 $t_0 \sim t_5$ 表征民用机场运输服务能力在一次扰动事件全过程中的动态演化。

在 $t_0 \sim t_1$ 时刻,恶劣天气扰动尚未发生,机场处于正常运输服务水平。在 t_1 时刻,某一恶劣天气发

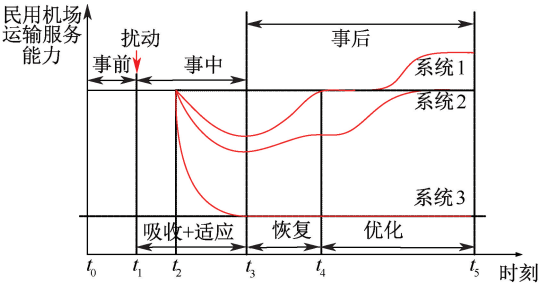


图1 民用机场运输服务韧性概念曲线
Fig.1 Conceptual curve of transport service resilience at civil airports

生,进入事中阶段($t_1 \sim t_3$ 时刻),涉及机场的吸收和适应2个韧性阶段和能力。其中,事中前期,主要是机场通过之前建立的一些设备系统、规章制度、人员能力等吸收部分扰动影响;事中后期,对于超出吸收能力、未被消解的剩余扰动影响,机场将根据一些前期经验、机动措施等调整行为,以适应扰动带来的影响;之后,到事后阶段($t_3 \sim t_5$ 时刻),主要包括机场的恢复和优化2个韧性阶段和能力。其中, $t_3 \sim t_4$ 时刻,反映的是机场针对扰动影响采取应急恢复措施快速恢复机场运输服务的能力; $t_4 \sim t_5$ 时刻,反映了系统整体韧性能力中的优化能力部分,在优化前期,机场总结应对干扰的经验,并制定后续优化措施;在优化后期,当合理的措施执行一段时间,再经历类似扰动时,系统则可能表现出比之前相当或更高的整体韧性能力。具体地,不同机场的运输服务韧性能力可能存在差异,表现在图1中,即高韧性的系统

(系统1)受扰动影响后,其事后学习制度和改进机制更加健全,如果未来再发生类似事件,机场则会以更高效率和能力应对影响,从而提高恶劣天气下机场的运输服务能力;中韧性的系统(系统2)则可能恢复到与之前相对水平的运输服务能力;低韧性的系统(系统3)则可能无法恢复,甚至暂时丧失运输服务功能。

1.2 民用机场运输服务韧性评估指标体系

构建民用机场运输服务韧性3层评估指标体系。首先,将系统的吸收、适应、恢复和优化4个核心能力作为第一级韧性评估指标;其次,将民航安全管理中人机环管事故分析理论运用到韧性评估二级指标构建中,将其中的“环”作为外部干扰因素,针对每个一级指标,主要从人员、设备、管理3方面,分别构建其二级韧性评估指标;然后,在确定第三级底层评价要素时,主要考虑其对二级指标的相关性、支撑性及数据的可获取性等因素确定各评价要素。最终,构建出一套民用机场运输服务韧性评估指标体系,共包含4个一级指标,12个二级指标,28个三级评估要素,具体如图2所示。

2 运输服务韧性双层评估模型

为提升民用机场运输服务韧性,从系统整体和系统要素2个层面,构建基于云模型的机场整体韧性和基于重要度+障碍度的机场关键韧性要素双层评估模型。

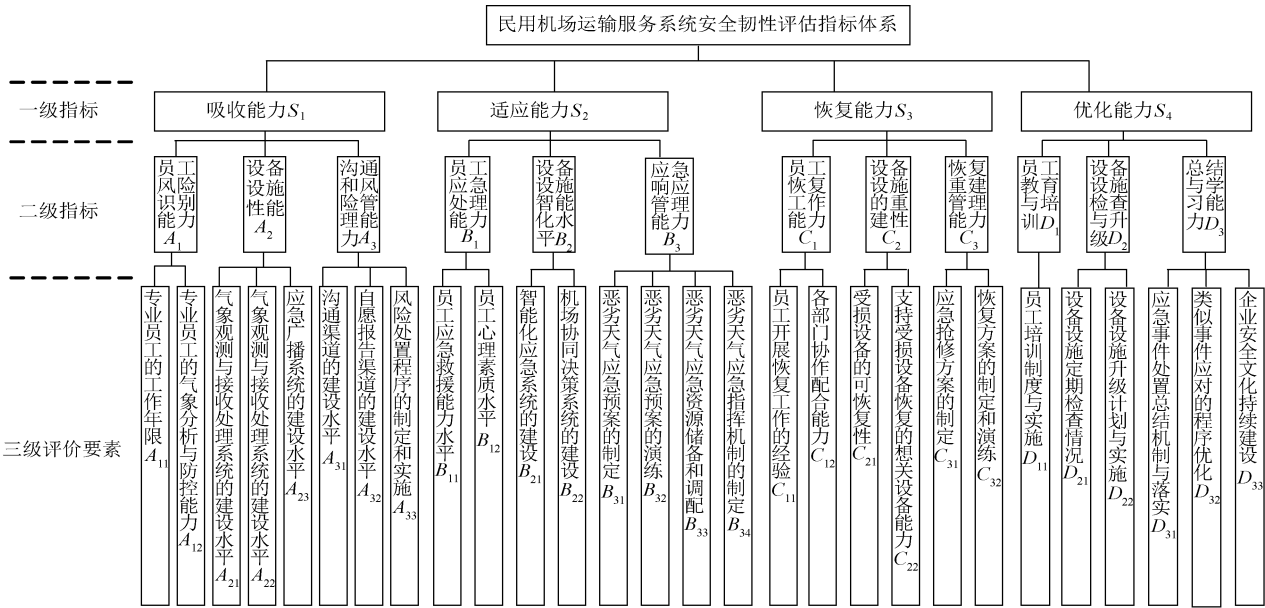


图2 民用机场运输服务韧性评估指标体系
Fig.2 Indicator system for assessing the resilience of transport services at civil airports

2.1 基于云模型的运输服务韧性评估模型

云模型是处理定性概念与定量描述的不确定转换模型,揭示评价对象的随机性和模糊性,并通过期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 等 3 个数字特征值反映影响因素的特征^[15]。基于云模型的民用机场运输服务韧性评估模型具体评估步骤如下:

1) 确定机场韧性评价标准云。结合以往研究文献的等级划分,将评价标准等级划分为 5 个层级,其韧性等级范围值分别为低韧性:(0,20];较低韧性:(20,40];中韧性:(40,60];较高韧性:(60,80];高韧性:(80,100],得到评语集 $V=\{\text{低韧性,较低韧性,中韧性,较高韧性,高韧性}\}$ 。依据不同的韧性等级区间,根据下式得到评价标准云的数字特征值。

$$\begin{cases} E_{xp} = \frac{(V_{\min} + V_{\max})}{2} \\ E_{np} = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{6} \\ H_{ep} = k \end{cases} \quad (1)$$

式中: p 为韧性等级; $V_{\min}$ 和 $V_{\max}$ 为第 p 个韧性等级的最小值和最大值; k 为常数,取值范围一般为 0.001~0.1。

采用黄金分割率对民用机场运输服务韧性评语集分区,相邻评价等级的云参数之间的比值为 0.618^[16]。以中韧性作为中间评价状态,其云模型参数 $E_{x_3}=50, H_{e_3}=0.05$ 。根据式(1)得到评语集对应的云数字特征值,见表 1。再利用 Matlab 得到民用机场韧性评价标准云图,如图 3 所示。

表 1 评价等级云数字特征值

评价等级	评价区间	云数字特征值
低韧性	(0,20]	(0,10.300 0,0.130 9)
较低韧性	(20,40]	(30.900 0,6.366 7,0.080 9)
中韧性	(40,60]	(50,3.934 6,0.050 0)
较高韧性	(60,80]	(69.100 0,6.366 7,0.080 9)
高韧性	(80,100]	(100,10.300 0,0.130 9)

2) 计算机场韧性的云数字特征值。根据划分的韧性等级,通过专家打分得到三级评估要素打分表,通过逆向云发生器得到三级评估要素的云数字特征值如下:

$$\begin{cases} E_{x_j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}, j = 1, 2, \cdots, m \\ E_{n_j} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{ij} - E_{x_j}| \\ H_{e_j} = \sqrt{|S_j^2 - E_{n_j}^2|} \end{cases} \quad (2)$$

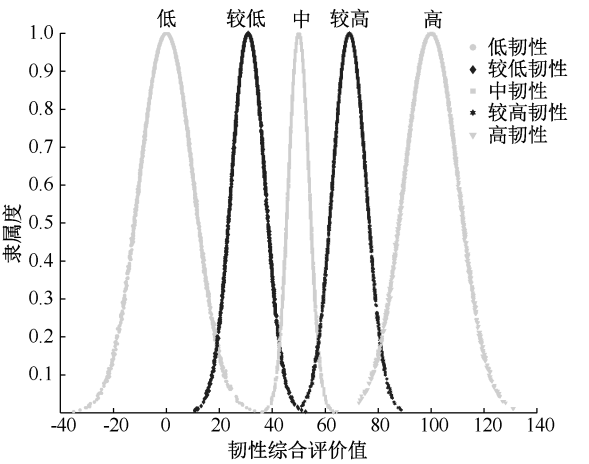


图 3 评价标准云图

Fig. 3 Evaluation criteria cloud diagram

式中: n 为专家人数; m 为三级评价要素的个数; x_{ij} 为第 i 个专家对第 j 个指标的评分; $E_{x_j}, E_{n_j}, H_{e_j}, S_j^2$ 分别为第 j 个指标的期望、熵、超熵、方差。

根据三级评估要素的云数字特征值,通过综合云逐层计算各级指标的云数字特征值,得到民用机场运输服务韧性的云数字特征值,具体公式如下:

$$\begin{cases} E_x = \sum_{j=1}^n E_{x_j} \times w_j \\ E_n = \sqrt{\sum_{j=1}^n E_{n_{2j}} \times w_j} \\ H_e = \sum_{j=1}^n (H_{e_j} \times w_j) \end{cases} \quad (3)$$

式中 w_j 为指标权重。

需要说明的是,考虑到熵权法是根据指标所含信息量确定权重的客观赋权法,可减弱主观因素的影响,增强评估客观性,文中指标权重确定方法采用熵权法,邀请多位专家对指标进行重要性打分,通过熵权法的计算得到指标权重 w_j 。

3) 基于云相似度的机场韧性等级确定。将各指标评价云与评价标准云对比,若无法判断指标评价云韧性等级,可通过计算云相似度判定,最大云相似度所对应的评价等级为韧性等级,具体公式如下:

$$S = \exp \left[- \frac{(E_x - E_x^*)^2}{2(E_n^*)^2} \right] \quad (4)$$

式中 E_x^* 和 E_n^* 为评价标准云的期望和熵。

2.2 关键韧性要素双层评估模型

从重要度和障碍度 2 方面构建系统关键韧性要

素双层评估模型。

1) 考虑系统要素对系统整体韧性的程度,提出系统韧性要素重要度评估方法。一般地,韧性要素对系统韧性的重要性越大,则越需要对其优先保障。基于韧性评价要素的初始等级值,通过逐步降级的方式计算韧性要素每降一级对系统韧性的影响程度,最终求得韧性要素降级对系统韧性的平均影响程度,作为衡量该评价要素的韧性重要度。具体计算公式如下:

$$Q(j)=\frac{\sum_{q=0,q\in Z}^{q\leq l-1}(E_x(j,l)-E_x(j,l-q))}{l-1}\tag{5}$$

式中: $Q(j)$ 为第 j 个评价要素对系统的重要度; l 为 j 的初始韧性等级级数; $E_x(j,l)$ 为第 j 个评价要素,在 l 韧性等级下时,整个系统的原韧性期望值; $E_x(j,l-p)$ 为第 j 个评价要素在 $(l-p)$ 等级的系统韧性期望值, q 为常数。

2) 考虑系统评价要素对系统韧性的阻碍程度,提出系统韧性要素障碍度评估方法。障碍度越大的指标,对系统整体韧性水平起到的阻碍作用越显著,也需要采取针对性措施进行优化改进。具体计算公式为:

$$T_j=\frac{F_j(1-u_j)}{\sum_{j=1}^mF_j(1-u_j)}\times100\%\tag{6}$$

式中: T_j 为第 j 个评价要素对系统韧性的障碍度;

u_j 为对评价要素采用极差法进行标准化处理后的值; F_j 为评价要素的因子贡献度,其值用权重 w_j 表示。

3 双层评估模型案例分析

以国内 A 机场为例,验证所提的民用机场运输服务韧性评估模型的有效性。A 机场是我国 2019 年正式通航的国际机场,目前开通航线 216 条,覆盖亚洲、欧洲和中东等 25 个国家和地区,2023 年,A 机场年旅客吞吐量为 3 941 万人次。A 机场所在地区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季暖热多雨,因此,主要评估 A 机场在雷雨天气下的运输服务韧性水平。

3.1 A 机场运输服务韧性评估数据

1) 数据来源。基于 1.2 节建立的恶劣天气下民用机场运输服务韧性评估指标体系,设计了一套相对应的调查问卷。问卷共包括 33 个问题,其中,基本信息问题 5 个,具体韧性指标问题 28 个。邀请 A 机场 17 名专家组成评估小组对本机场的韧性指标等级和重要性打分。共收集到有效问卷 16 份,作为 A 机场运输服务韧性评估的基础数据。

2) 数据处理与计算。根据问卷中韧性指标重要性打分数据,运用熵权法计算得到各级韧性指标权重,计算结果见表 2。

表 2 评估指标权重

Table 2 Assessment of indicator weights

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	三级评估要素	三级评估要素权重
A	0.240 1	A ₁	0.06 16	A ₁₁	0.023 6
				A ₁₂	0.038 0
		A ₂	0.103 0	A ₂₁	0.025 9
				A ₂₂	0.029 8
				A ₂₃	0.047 3
		A ₃	0.075 6	A ₃₁	0.035 5
				A ₃₂	0.020 2
				A ₃₃	0.019 9
B	0.316 6	B ₁	0.115 3	B ₁₁	0.069 7
				B ₁₂	0.045 6
		B ₂	0.087 8	B ₂₁	0.056 8
				B ₂₂	0.031 0
		B ₃	0.113 5	B ₃₁	0.032 6
				B ₃₂	0.028 5
				B ₃₃	0.029 1
				B ₃₄	0.023 3

续表 2

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	三级评估要素	三级评估要素权重
C	0.242 4	C_1	0.076 6	C_{11}	0.041 8
				C_{12}	0.034 8
		C_2	0.099 0	C_{21}	0.060 4
				C_{22}	0.038 6
		C_3	0.067 0	C_{31}	0.045 5
				C_{32}	0.021 5
D	0.200 8	D_1	0.051 0	D_{11}	0.051 0
		D_2	0.072 6	D_{21}	0.029 5
				D_{22}	0.043 1
		D_3	0.077 3	D_{31}	0.024 7
				D_{32}	0.027 0
				D_{33}	0.025 7

同时,根据问卷中韧性指标等级打分数据,通过式(2)得到三级评估要素的云数字特征值,利用式(3)逐级计算各级指标及民用机场运输服务韧性的云数字特征值,可得民用机场运输服务韧性的云数字特征值为(83.672 7,17.556 0,5.721 8),受篇幅所限,只展示一级指标的云数字特征值,见表 3。

表 3 一级指标云数字特征

Table 3 Digital characterization of the primary indicator cloud

一级指标	一级指标云数字特征
吸收能力 A	(82.372 8,18.472 2,7.809 6)
适应能力 B	(84.419 3,16.955 2,6.008 5)
恢复能力 C	(84.079 6,16.178 1,4.537 9)
优化能力 D	(83.600 4,18.913 1,4.205 3)

3.2 A 机场运输服务韧性评估结果分析

1) A 机场运输服务韧性评估结果分析。A 机场的整体运输服务韧性水平评估结果如图 4 所示,A 机场运输服务韧性云相似度见表 4。由图 4 可知:A 机场的整体运输服务处于较高韧性水平和高韧性水平之间。由表 4 可知:A 机场运输服务韧性的最大云相似度为 0.284 7,对应高韧性等级,这一结果与实际调研情况基本相符,这证明文中所提模型具有一定的科学性和有效性。

作为新建的国际机场,A 机场拥有稳定的能源综合管理系统,提供重要负荷的不停电需求,从而保障设备在恶劣环境下的正常运行。同时,机场还具有世界先进的空管系统,该系统不仅可以为飞机起降提供安全检测和导航服务,还具有先进的冗余能力。另外,A 机场各项管理制度比较健全,相关专业人员配备较为齐全,遭遇恶劣天气时具有较强的应对能力,在变动环境中能比较好地保持正常运输服

务功能。

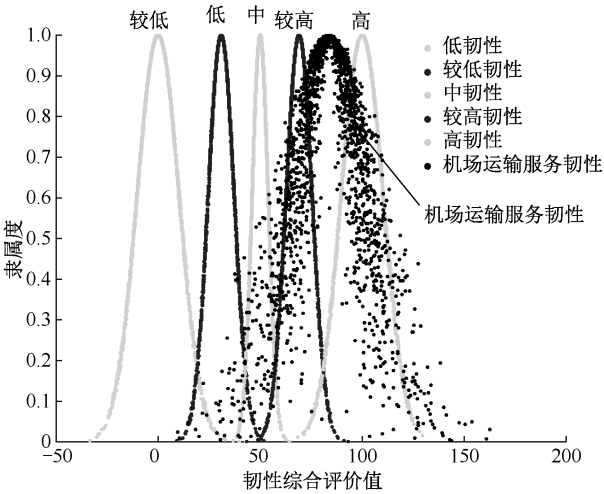


图 4 A 机场运输服务韧性综合评价云和评价标准云对比

Fig. 4 Comparison of Airport A's comprehensive evaluation cloud of transport service resilience and evaluation criteria cloud

表 4 A 机场运输服务韧性云相似度

Table 4 Airport A transport service resilience cloud similarity

韧性等级	较低韧性	低韧性	中韧性	较高韧性	高韧性
云相似度	0	0	0	0.072 8	0.284 7

进一步分析 A 机场 4 个核心韧性能力水平,如图 5a 所示。A 机场的 4 个韧性能力的评价云基本重合。通过计算云相似度,4 个韧性能力均为高韧性水平,与 A 机场整体韧性水平一致。此外,从人、机、管 3 个维度进一步分析 4 个韧性能力的具体表现,如图 5b—图 5d 所示。在人员维度,吸收能力和适应能力的韧性水平为较高韧性,而恢复能力和优化能力为高韧性,主要因为新建机场的灾害应对经

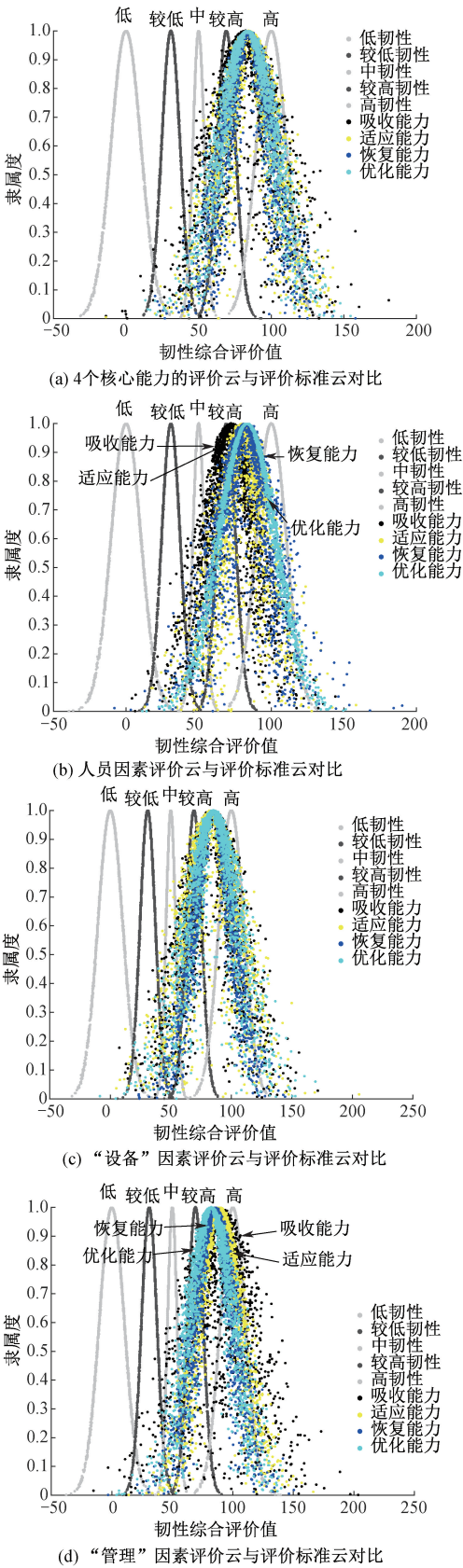


图5 指标评价云和评价标准云对比

Fig. 5 Comparison of the indicator evaluation cloud and the evaluation criteria cloud

验有限,但平时机场的相关人员应急演练和总结做得比较到位;在设备维度,4个核心能力的韧性水平均为高韧性,主要因为A机场配备了多个先进的气象预警与辅助决策设备,例如云数据平台可以联动复杂事件处理,预测运行态势,支持快速的智能决策;稳定高效的信息系统可以提升机场旅客和飞机中转效率,保障机场稳定运行。在管理维度,4项能力都属于高韧性水平,其中,吸收能力与适应能力表现更突出,主要源于机场管理者尤其关注灾害天气的快速应对响应,这对降低天气影响效果更显著。

2) A机场的关键韧性要素评估结果分析。基于重要度+障碍度的关键韧性要素评估模型,利用式(5)和式(6)得到A机场的关键韧性要素评估结果,见表5。篇幅所限,只展示重要度和障碍度排名前10的三级评估要素。

由表5可知:从4个核心能力角度出发,在重要度排名前10的评价要素中,属于适应能力和恢复能力的评价要素分别占据总比重的30%,而吸收能力和优化能力的评价要素各占20%。在障碍度排名前10的评价要素中,适应能力的评价要素最多,占比40%;其次为吸收能力,占比30%;恢复能力和优化能力分别占20%和10%。因此,A机场应更加关注系统适应能力,其次是吸收能力和恢复能力,最后是优化能力。

从人员、设备和管理3个方面出发,在重要度中排名前10的评价要素中,属于人员的评价要素占比最高,为50%;其次是设备相关评价要素,占比40%;最后是管理相关评价要素,仅有10%。在障碍度排名前10的评价要素中,属于人员的评价要素占比为60%,而设备和管理各占20%。因此,A机场在提升系统韧性时优先关注人员因素,其次是设备,最后是管理。

因此,综合云模型的机场整体韧性结果以及基于重要度+障碍度的关键韧性要素分析结果,为进一步提升恶劣天气下A机场的运输服务韧性水平,需重点关注的关键韧性要素排序为:员工应急救援水平 B_{11} 、员工心理素质水平 B_{12} 、专业员工的工作年限 A_{11} 、专业员工的气象分析与防控能力 A_{12} 、沟通渠道的建设水平 A_{31} 、员工开展恢复工作的经验 C_{11} 、员工培训制度与实施 D_{11} 、智能化应急系统的建设 B_{21} 、应急广播系统的建设水平 A_{23} 、受损设备的可恢复性 C_{21} 、设备设施升级计划与实施 D_{22} 、灾害天气应急预案的演练 B_{32} 、应急抢修方案的制定 C_{31} 。

表 5 指标重要度和障碍度

Table 5 Indicator importance degree and obstacles degree

指标排序	指标	重要度	指标	障碍度
1	员工应急救援水平 B_{11}	3.114 0	员工应急救援水平 B_{11}	7.471 7
2	受损设备的可恢复性 C_{21}	2.792 0	受损设备的可恢复性 C_{21}	6.474 8
3	智能化应急系统的建设 B_{21}	2.483 3	专业员工的气象分析与防控能力 A_{12}	6.110 3
4	员工培训制度与实施 D_{11}	2.338 2	员工心理素质水平 B_{12}	6.110 3
5	员工心理素质水平 B_{12}	2.338 1	智能化应急系统的建设 B_{21}	6.088 9
6	应急广播系统的建设水平 A_{23}	2.277 0	员工培训制度与实施 D_{11}	5.922 7
7	员工开展恢复工作的经验 C_{11}	2.237 6	应急抢修方案的制定 C_{31}	4.877 5
8	应急抢修方案的制定 C_{31}	2.158 5	员工开展恢复工作的经验 C_{11}	4.854 3
9	设备设施升级计划与实施 D_{22}	1.976 7	应急预案的演练 B_{32}	4.073 5
10	沟通渠道的建设水平 A_{31}	1.968 4	专业员工的工作年限 A_{11}	4.005 6

4 结 论

1) 文中构建的民用机场运输服务韧性指标体系和双重评估模型,能够分析恶劣天气下民用机场运输服务的韧性水平,可识别提升和阻碍民用机场运输服务韧性的关键要素,为管理者提供优化提升的方向。

2) 以国内 A 机场为例开展案例研究,结果表

明:恶劣天气下 A 机场的整体运输服务能力处于高韧性水平,这与 A 机场的实际调研情况基本相符,证明文中所提模型具有一定的科学性和有效性。同时,员工应急救援水平、员工心理素质水平、专业员工的工作年限等为该机场运输服务韧性的关键要素,未来可重点关注和优化这些要素,进一步提升恶劣天气下该机场的运输服务韧性能力。

参 考 文 献

[1] 中国民用航空局. 民航行业发展统计公报(2023 年)[R], 2024.

[2] 民航资源网. 航班延误[EB/OL]. (2018-02-11). <https://news.carnoc.com/search.html?key=%E8%88%AA%E7%8F%AD%E5%BB%B6%E8%AF%AF>.

[3] CHEN Yuxiu, YANG Shiqi, YU Jian. A quantitative research on climate resilience in coastal airports from the perspective of adaptation[J]. Environmental Systems Research, 2024, 13(1): DOI:10.1186/s40068-024-00362-7.

[4] HUANG Xin, YANG Lizhi, WU Kun, et al. Study on the resilience recovery of civil airport infrastructure under weather extremes[J]. Natural Hazards, 2025, 121(1):1 143-1 163.

[5] 齐麟, 怀永成, 陈小林,等. 基于动态贝叶斯网络的机场韧性评价方法[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(35): 15 276-15 284.

QI Lin, HUAI Yongcheng, CHEN Xiaolin, et al. Airport resilience evaluation method based dynamic bayesian network [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(35): 15 276-15 284.

[6] 齐麟, 怀永成, 戴克娟,等. 气象灾害下民航机场韧性指数研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(6):20-28.

QI Lin, HUAI Yongcheng, DAI Kejuan, et al. Study on resilience index of civil aviation airports under meteorological disasters[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6):20-28.

[7] 齐麟, 戴克娟. 雨雪天气下民航机场运输能力的韧性评价[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(3):835-842.

QI Lin, DAI Kejuan. Resilience evaluation of civil aviation airport transportation capacity under rain and snow weather [J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(3):835-842.

[8] 黄信, 徐平, 吴堃. 降雪天气对机场基础设施系统韧性恢复的影响[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 175-182.

HUANG Xin, XU Ping, WU Kun. Influence of snowfall weather on resilience recovery of airport infrastructure system [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4):175-182.

[9] ZHOU Lie, CHEN Zhenhua. Measuring the performance of airport resilience to severe weather events[J]. Transportation

Research Part D: Transport and Environment, 2020, 83: DOI:10.1016/j.trd.2020.102362.

[10] 李龙海, 杨力源, 常鑫,等. 基于贝叶斯 BWM-VIKOR 法的机场运行韧性评估方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(25):11 014–11 020.

LI Longhai, YANG Liyuan, CHANG Xin, et al. Airport operation resilience assessment method based on Bayesian BWM-VIKOR method [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(25):11 014–11 020.

[11] 王兴隆, 赵俊妮, 王进. 恶劣天气下机场离场航班运行韧性评估及恢复[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(1):110–121.

WANG Xinglong, ZHAO Junni, WANG Jin. Resilience assessment and recovery of airport departure flights under severe weather[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(1):110–121.

[12] 陈仔燕. 恶劣天气下机场航班运行韧性评估及预测[D]. 天津:中国民航大学, 2022.

CHEN Zaiyan. Evaluation and prediction of airport flights operational system resilience under severe weather [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022.

[13] ZHOU Yaoming, WANG Junwei, YANG Hai. Resilience of transportation systems: concepts and comprehensive review[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(12): 4 262–4 276.

[14] 黄浪, 吴超, 王秉. 系统安全韧性的塑造与评估建模[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(12):15–21.

HUANG Lang, WU Chao, WANG Bing. Modelling the shaping and assessment of system safety resilience[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(12):15–21.

[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 Miao. Risk assessment of metro operation based on G1-EW combination weighting cloud model[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6):163–170.

[16] 聂相田, 范天雨, 董浩,等. 基于 IOWA-云模型的长距离引水工程运行安全风险评价研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(2):151–160.

NIE Xiangtian, FAN Tianyu, DONG Hao, et al. IOWA-Cloud model-based study on risk assessment of operation safety of long distance water transfer project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(2):151–160.

作者简介: 李 航 (1989—),男,陕西岐山人,博士,讲师,主要从事复杂系统安全韧性、民航应急管理等方面的研究。E-mail:lih@cauc.edu.cn。