

基于耦合矩阵与云模型的迁建机场运行安全风险评估方法

慕素宇^{1,2}, 李龙海^{1*}

¹中国民航大学交通科学与工程学院, 天津

²青岛国际机场集团有限公司, 山东 青岛

收稿日期: 2025年4月30日; 录用日期: 2025年7月21日; 发布日期: 2025年7月29日

摘要

在大型机场迁建转场过程中, 运行安全风险呈现出高耦合性与多维演化特征, 传统二维风险评估模型已难以满足动态复杂系统的评估需求。为此, 文章提出一种融合可能性-严重性-脆弱性三维结构的运行安全风险量化方法, 构建多维耦合风险评估框架。通过改进的风险矩阵模型建立三级风险等级划分体系, 增强风险分级的敏感性与判别力; 运用DEMATEL方法量化风险指标间的耦合强度, 修正脆弱性参数以体现系统连锁失效效应; 并结合云模型理论引入逆向云发生器, 实现多层级风险等级的模糊映射, 提升评估体系的韧性与适应性。研究以迁建机场典型运行风险指标为输入, 完成风险等级识别与定量分布测算。结果表明, 该方法能够有效揭示多风险要素间的非线性耦合关系, 具备较高的识别精度与工程适用性。相关研究为新一代智慧机场迁建过程中的运行安全评估与分级管控策略制定提供了理论支撑与方法工具。

关键词

机场迁建转场, 运行安全, DEMATEL方法, 云模型, 模糊评估

Methodology for Operational Safety Risk Assessment of Relocated Airports Based on Coupling Matrix and Cloud Modeling

Suyu Mu^{1,2}, Longhai Li^{1*}

¹School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin

²Qingdao International Airport Group Co., Ltd., Qingdao Shandong

Received: Apr. 30th, 2025; accepted: Jul. 21st, 2025; published: Jul. 29th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 慕素宇, 李龙海. 基于耦合矩阵与云模型的迁建机场运行安全风险评估方法[J]. 交通技术, 2025, 14(4): 557-571. DOI: 10.12677/ojtt.2025.144055

Abstract

In the process of relocation and transfer of major airports, operational safety risk presents high coupling and multidimensional evolution characteristics, and the traditional two-dimensional risk assessment model makes it difficult to meet the assessment needs of dynamic and complex systems. Therefore, this paper proposes an operational safety risk quantification method that integrates the three-dimensional structure of likelihood-severity-vulnerability, and constructs a multidimensional coupled risk assessment framework. Through the improved risk matrix model, a three-level risk classification system is established to enhance the sensitivity and discriminative power of risk classification; the DEMATEL method is used to quantify the coupling strength between risk indicators, and the vulnerability parameter is modified to reflect the interlocking failure effect of the system; and an inverse cloud generator is introduced in conjunction with the theory of cloud modeling, which realizes the fuzzy mapping of the risk level of the multilevel risk classification and improves the resilience and adaptability of the assessment system. The study takes typical operational risk indicators of relocated airports as inputs, and completes the identification of risk levels and quantitative distribution measurement. The results show that the method can effectively reveal the nonlinear coupling relationship between multiple risk elements, and has high identification accuracy and engineering applicability. The study provides theoretical support and methodological tools for the development of operational safety assessment and hierarchical control strategies during the relocation of new-generation smart airports.

Keywords

Airport Relocation, Operational Safety, DEMATEL Method, Cloud Modeling, Fuzzy Assessment

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国民航业务量持续增长, 部分传统机场因容量瓶颈、空域限制及城市发展规划等原因面临整体迁建需求。迁建机场在转场初期运行阶段, 系统结构复杂、人员配置变化频繁、运行环境高度不确定, 极易引发运行安全风险。典型如某大型枢纽机场在转场首日因系统联调不足导致航班集中延误, 体现出系统耦合与联动失效的潜在风险。

现有研究已从多维视角探索复杂系统运行安全风险识别与管理, 如张欣等[1]系统动力学模型耦合蒙特卡洛模拟, 量化生成风险阈值, 为民用机场飞行区安全管理提供分级预警依据。张晓全等[2]基于 ISM-MICMAC 方法, 筛选风险因素与驱动因子构建递阶模型, 余金煌等[3]融合风险矩阵法与熵值法构建泵站安全评估模型, 量化分析南水北调东线泵站风险, 揭示混凝土结构缺陷及计算机监控系统为关键风险源, 为泵站安全管理提供分级预警依据。衣超群等[4]融合 AHP-熵权法与相对差异函数模型, 构建高高原机场夜间运行安全评估指标体系, 量化分析四类风险因素, 揭示关键风险源, 为高高原机场夜航安全运行提供动态风险预警与决策支持。陈明亮等[5]针对机坪运行风险管控难题, 基于安全绩效理论构建多层级评估框架, 通过事件树、故障树与 Bowtie 方法融合建立动态指标体系, 开发风险评估工具, 实现多维度风险量化预警。赵俊妮[6]融合实体关系抽取与系统动力学方法, 构建机场飞行区运行风险致因网络及安全韧性评估模型, 量化分析人因与管理核心风险, 提升系统抗风险能力与恢复效率。杨锦等[7]针对机场管

制空域内无人机运行安全风险, 构建双层碰撞保护体积模型并融合蒙特卡罗模拟与改进 Reich 算法, 量化分析无人机与有人机在起降航线的碰撞概率, 证实降低无人机飞行高度与速度可显著缩减风险值, 为融合空域运行提供动态风险评估方法。赵赶超等[8]基于 N-K 风险耦合模型对直升机运行风险因素进行量化建模, 揭示了多因素交互耦合对安全事件的非线性驱动机制, 通过事故数据验证风险耦合强度与事故概率的正向关联, 为直升机安全系统性风险防控提供理论支撑。肖琴等[9]基于突变理论构建尖点突变模型, 引入随机扰动因子改进传统方法, 通过量化人机环耦合强度揭示差错风的非线性突变规律, 为动态识别风险演化路径及制定分级防控策略提供了突变动力学分析框架。Burbidge 等[10]通过问卷调查机场的气候风险评估与适应规划现状揭示了基础设施暴露度与适应行动间的显著差距, 提出需通过气候数据共享、风险评估工具开发和跨部门能力建设提升区域机场韧性, 为气候脆弱地区关键交通设施适应性治理提供了实证依据与政策路径。Hu 等[11]提出基于 LSTM 的智能预警模型, 通过分析机场飞行日志数据构建时序风险特征库, 采用门控机制处理长短期依赖关系, 实现了机场安全风险动态预警与资源优化配置, 显著提升了风险评估客观性与实时防控效能。

综上, 迁建机场运行安全风险评估仍面临三方面挑战: 一是评估维度不足, 缺乏对系统脆弱性特征的建模; 二是未能考虑指标间的耦合放大机制; 三是风险等级划分依赖专家经验, 缺乏模糊-随机复合表达能力。为此, 本文从迁建机场运行场景出发, 提出一种融合三维风险结构、DEMATEL 耦合分析与云模型模糊映射的多模型风险评估方法, 通过刻画风险综合特征、量化耦合关系并修正脆弱性参数, 实现风险等级的模糊可视化输出, 旨在增强迁建机场风险评估的系统性、精度与工程适用性。

2. 模型构建

2.1. 基于 DEMATEL 的三维风险矩阵模型脆弱性量化

传统风险矩阵模型基于风险事件发生的可能性(Frequency, F)与后果严重性(Consequence, C)两个维度构建, 难以满足机场迁建运行安全评估。在机场场景中单一风险因子往往难以独立解释系统故障的成因, 其背后往往伴随着多个指标间的联动效应。因此将脆弱性(Vulnerability, V)评估引入风险矩阵中, 通过将机场应急响应预案、运行流程规范等资料分析后得出机场迁建事件的脆弱性特征, 通过多维矩阵丰富风险状态的表征形式, 构建基于 $F.C.V$ 的三维风险评估框架。其中三维指标的定义如下。

可能性 F 反应风险事件发生的频率等级, 可通过历史数据获取, 其数值越大代表系统对于该风险事件发生概率越大; 严重性 C 表示风险事件发生后造成的后果影响等级, 其数值越大代表该风险事件对于本系统造成后果更严重; 脆弱性 V 用于度量迁建系统在面对特定风险因子时抵抗的能力, 其数值越大代表系统对于该风险事件更为脆弱。因此风险事件 i 对于系统整体运行安全的风险影响值 R_i 可由以下公式表示, 如式 1 所示。

$$R_i = f(F_i, C_i, V_i) \quad (1)$$

三个维度的交叉评估可实现更精细的风险分级, 不同等级组合能有效区分风险量级。在迁建机场场景中, 部分风险在可能性和严重性上属于中等, 但因系统脆弱性较高, 综合后可能判定为高风险。例如, 机场周边施工意外闯入跑道的可能性和严重性均为中等, 但因防护设施薄弱、应急响应滞后, 脆弱性较高, 综合评估后应视为高风险, 为管理提供精确依据。

脆弱性能够描述系统结构对风险的内生反应特性, 特别是当风险因子间存在明显联动影响时, V 值将显著上升。为了得到风险指标脆弱性的量化数值, 本研究通过 DEMATEL 方法分析各指标之间的耦合关系并识别各风险因子之间的影响路径, 构建脆弱性修正函数, 形成动态风险结构。具体步骤如下:

步骤 1: 构建直接影响矩阵。设系统中包含 n 个风险因子, 通过专家评价获得任意两个指标间的直接

影响程度, 影响标度如表 1 所示。

Table 1. Meaning of the scales

表 1. 各标度含义

标度	风险指标 i 对风险指标 j 的影响程度
1	无影响
2	影响微弱
3	影响适度
4	影响较为突出
5	影响极为显著

步骤 2: 归一化处理。对矩阵 A 进行归一化处理, 得到标准化影响矩阵 D , 如式 2 所示。

$$D = \left(1 / \max_i \sum_{j=1}^n a_{ij} \right) \cdot A \quad (2)$$

步骤 3: 计算综合影响矩阵。计算直接与间接影响累加值, 形成综合影响矩阵 T , 如式 3 所示。

$$T = D + D^2 + D^3 + \cdots = D(1 - D)^{-1} \quad (3)$$

其中 $T = [t_{ij}]$ 表示指标 i 对指标 j 的综合影响程度, 包含所有影响路径下的传递效应。

步骤 4: 计算系统耦合强度。将 T 中每列非对角元素求和, 得到指标 j 的受影响强度 C_j , 如式 4 所示。

$$C_j = \sum_{i=1, i \neq j}^n t_{ij} \quad (4)$$

该式用于反映系统中其他风险因子对指标 j 的耦合影响程度, 可视为该指标在系统中的脆弱暴露程度, 耦合强度越高, 系统对该点越脆弱。

步骤 5: 构建脆弱性修正函数。在得到耦合强度 C_j 后, 对专家评分获得的基础脆弱性量化值 V_{0j} 进行修正, 形成动态脆弱性 V_j , 如式 5 所示。

$$V_j = V_{0j} \cdot (1 + \theta \cdot C_j) \quad (5)$$

其中, $\theta \in [0, 1]$ 为耦合敏感性调节系数, 用于控制耦合强度对脆弱性的放大效应。当取值为 0 时, 表示忽略耦合影响, 模型退化为传统 FCV 静态结构; 系数取值越大, 系统中耦合结构越强的指标, 其脆弱性修正幅度越大, 从而突出系统薄弱点。

2.2. 基于云模型驱动的风险动态评估

在完成风险因子数值化后, 为便于分级响应与差异化管控, 需将其转化为可识别的风险等级。考虑风险值的模糊性与不确定性, 传统硬阈值分类难以反映等级边界的渐变特征。为此, 本文引入基于云模型的等级映射, 实现数值到语言等级的模糊 - 随机转换, 并通过云图直观展示风险分布, 弥补传统方法在边界和不确定性表达上的不足。

潜在风险事件的威胁程度不仅取决于其内生属性, 还受风险缓释措施效能与执行完整性影响。引入层次化控制策略可提升系统动态适应性, 使风险熵值收敛至可容忍范围内。为此有必要构建基于成本 - 效益均衡的精准分级控制框架, 通过量化控制措施的资源消耗与风险衰减增益的非线性关系, 寻求风险

暴露与管控成本的最优帕累托解。依据 ALARP 原则, 本文提出的分级控制范式如表 2 所示。

Table 2. Relocated airport operational safety risk classification and control

表 2. 迁建机场运行安全风险分级管控

等级名称	等级说明	等级
固有风险可接受级	符合 ISO31000 风险准则, 无需审批即可纳入容错边界	一级
条件性风险缓释级	系统化缓释策略实施后, 需合规性审查	二级
例外性风险特许级	基于 ALARP 原则进行例外性风险评估与特许授权	三级
强制风险消除级	通过工程技术干预或风险转移实现消减	四级

在界定风险控制层级后, 需制定风险可接受性判据, 该判据由决策主体的容忍阈值及效用偏好驱动, 并应符合动态适应性与行业规范。当前国际主流方法包括 ALARP、GAMAB 和 MEM 准则, 其中 ALARP 因具备跨行业普适性及成本-效益均衡特征, 被广泛采纳为风险决策基准。本文结合 ALARP 框架与迁建机场特征参数, 构建嵌入机场工程与安全管理双重边界的韧性导向型风险接受准则, 如表 3 所示。

Table 3. Operational safety risk acceptability criteria for relocated airports

表 3. 迁建机场运行安全风险可接受性判据

风险量级	判据	颜色编码	控制等级
[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预	绿色	符合 ISO31000 风险准则, 无需审批即可纳入容错边界
[7, 9]	风险合理可行	黄色	系统化缓释策略实施后, 需合规性审查
[10, 12]	风险需强制降低至 ALARP 区	橙色	基于 ALARP 原则进行例外性风险评估与特许授权

为科学划分云模型语义等级, 采用德尔菲法两轮问卷调研, 共邀请 12 名来自民航行业专家参与问卷评分, 归纳风险等级语义并确定数值映射区间, Kendall 系数 0.81 ($p < 0.05$)表明专家意见高度一致, 支撑标准云模型构建。进一步推导各指标的 Ex 、 En 、 He 参数, 形成迁建机场运行安全风险云发生器, 并通过逆向云算法反演隶属度分布, 输出风险云图及系统安全熵值, 实现风险态势可视化与韧性阈值动态标定。

基于德尔菲法获取的专家语义评语及习惯性描述获得如优秀、良好、一般、较差、差五个评语等级, 分数取值为 0~100, 分数高低代表安全状况好或差, 按照式 6 计算标准云参数, 得到三个等级对应的特征参数实现定性一定量转换, 计算结果见表 4 所示。本文基于德尔菲专家评分构建 5 个语义等级, 每一等级对应一个分数区间。通过逆向云发生器方法, 将每类评分样本集合转化为标准云模型三元组, 确保模型既表达等级模糊边界, 又保留专家评分中的不确定波动。例如, 专家将“较差”定义为(30, 60], 其得分样本在均值 45 附近波动较大, 经逆向推导得到参数为(45, 5, 0.5), 体现出该等级具有较高的不确定性与评价离散性。

$$\begin{cases} Ex_k = \frac{X_k^{\max} + X_k^{\min}}{2} \\ En_k = \frac{X_k^{\max} - X_k^{\min}}{2} \\ He = 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

Table 4. Risk level corresponds to standard cloud model parameters
表 4. 风险等级对应标准云模型参数

评语等级	得分	云模型参数
优秀	(90, 100]	(95, 1.67, 0.5)
良好	(80, 90]	(85, 1.67, 0.5)
一般	(60, 80]	(70, 1.67, 0.5)
较差	(30, 60]	(45, 5, 0.5)
差	(0, 30]	(15, 5, 0.5)

上述云模型由专家评价样本通过逆向云模型方法推导得到, 实现定性等级向定量模型的映射。基于前序 FCV 风险模型与 DEMATEL 方法修正后结果, 得到各风险因子的总和风险值 R_j 。将该值输入标准云图, 通过正向云发生器计算其在各等级云中的隶属度, 表达式如式 7 所示。

$$\mu_k(R_j) = \exp\left(-\frac{(R_j - Ex_k)^2}{2En_k^2}\right) \quad (7)$$

式中 $\mu_k(R_j)$ 表示指标 j 在等级 k 下的隶属度; Ex_k 、 En_k 为等级 k 所对应的云模型参数。最终将指标归类至隶属度最大的风险等级, 如式 8 所示。

$$L_j = \arg \max_k \mu_k(R_j) \quad (8)$$

为了增强评估结果的解释力, 通过 MATLAB 生成各指标云图, 展示风险值在各等级云空间中的分布。高密度区域为隶属度高的等级, 边缘则反映风险等级临界状态。通过加权整合子指标云参数生成融合云图, 并与标准等级云计算空间相似度。若综合云与某一等级云的相似度指标 $\lambda \geq 0.85$, 则判定系统属于该风险等级。为验证云模型在风险等级评估中的表达优势, 以“特情预案覆盖率”指标进行对比实验, 分别使用云模型与 FCE 法进行风险等级判定。在相同条件下, FCE 输出结果为“良好”, 但缺乏等级模糊边界的分布信息; 而云模型输出结果为($Ex = 78, En = 2, He = 1$), 表征其处于“较好-一般”边界且具有高波动性, 反映出该指标存在不稳定性 and 评价异议空间。结果说明云模型在等级模糊性表达、随机性建模与可视化方面具有明显优势, 更适用于机场运行系统这类高不确定性环境下的风险分级表达。

3. 实验验证

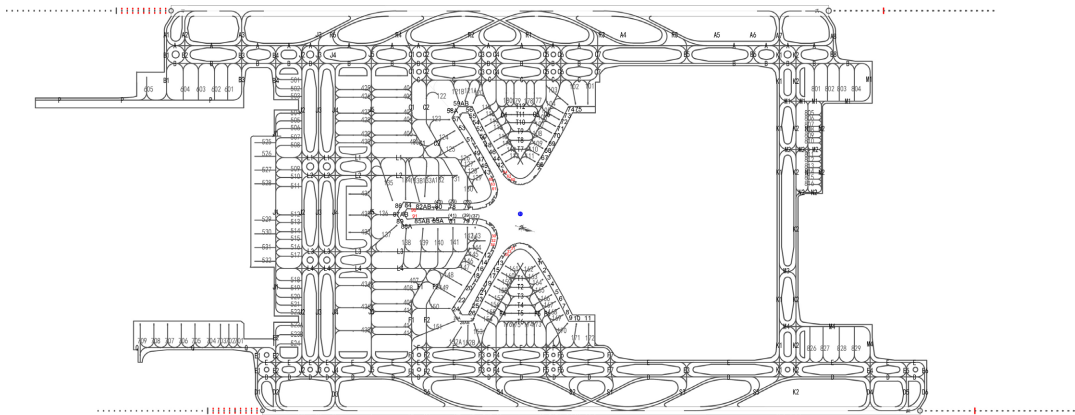


Figure 1. Partial view of the flight area of the new airport
图 1. 新机场飞行区局部图

本文以国内某枢纽机场为研究对象, 基于该机场迁建转场运行实证数据验证上述构建模型在实际迁建机场运行场景中的适用性与有效性。该机场正式关闭民用航空功能时, 新机场即刻启用。该过程采用“零间隔”转场模式, 通过全流程平行演练、双场并行校验及数据无缝切换, 实现“一夜闭场、一夜启场”的超大型机场转场。图 1、图 2 分别为该枢纽机场新旧飞行区局部图。

本实验以该枢纽机场迁建转场阶段实际运行数据与专家德尔菲调查数据为基础, 针对迁建转场过程中运行系统复杂度高、风险耦合性强、不确定性突出的特点, 构建了基于三维风险矩阵、系统耦合分析与云模型映射融合的风险评估方法。

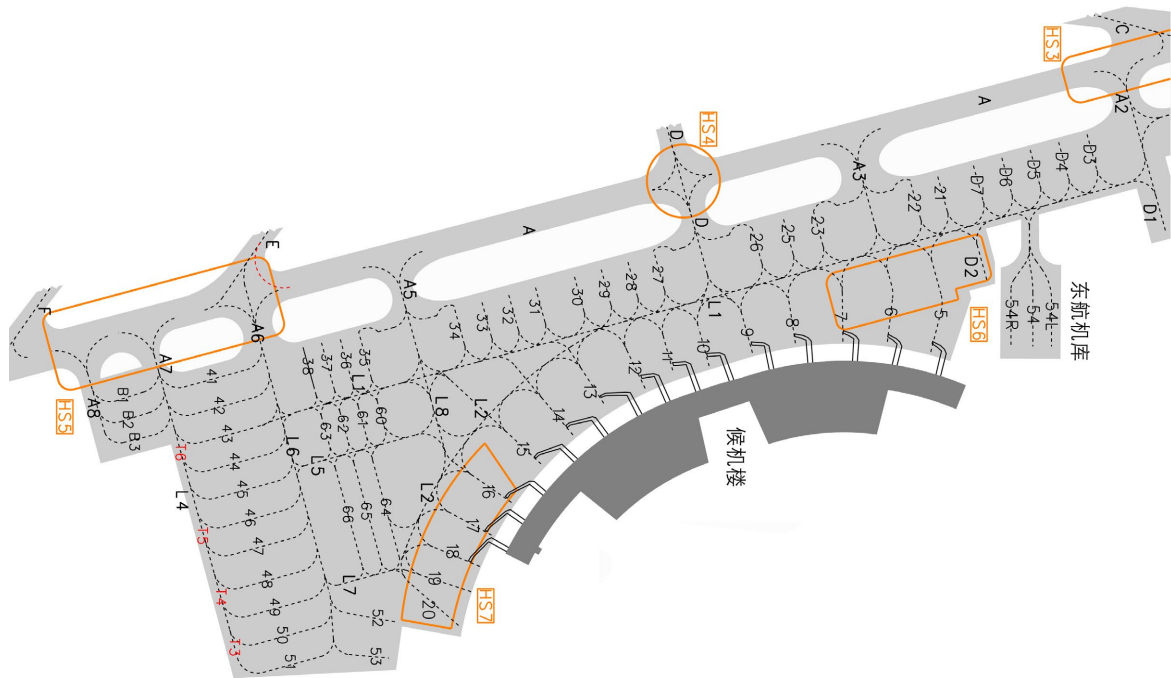


Figure 2. Partial view of the flight area of the old airport
图 2. 旧机场飞行区局部图

3.1. 三维风险指标复制与初步建模

首先, 基于文献调研、运行数据统计和德尔菲问卷调查, 系统识别迁建转场过程中的关键运行风险, 构建多层次指标体系。专家小组成员均具有丰富的迁建项目或安全评估实践经验。问卷采用匿名两轮方式, 共发放 30 份, 回收有效问卷 27 份, Kendall 一致性系数为 0.81 ($p < 0.05$), 表明评分结果高度一致。随后, 专家结合历史数据和运行经验, 对各二级指标进行发生可能性和后果严重性打分, 迁建转场风险发生概率表 5 所示。

Table 5. Probability of occurrence of the airport relocation and transfer operational risks
表 5. 该机场迁建转场运行风险发生概率

风险指标	可能性等级	严重性等级
管制人员资质认证率(MA1)	3	2
消防人员资质认证率(MA2)	2	2
机务人员能力(MA3)	3	1

续表

运控人员应急处置能力(M _{A4})	1	1
高峰期资源调度偏差率(M _{H2})	2	1
实时监控系統覆盖率(航班/设备/人员) (M _{H2})	1	1
导航/助航设施故障率(M _{C1})	2	2
行李系统分拣效率(M _{C2})	2	1
航油供应稳定性(M _{C3})	1	3
安检设备误报率(M _{C4})	3	1
机场航班保障正常率(M _{D1})	3	1
航空器滑行路径优化率(M _{D2})	2	1
旅客登机口周转时间(M _{D3})	4	1
鸟类活动热成像监控覆盖率(M _{D4})	3	2
SMS 建设成熟度(M _{G1})	2	1
特情预案覆盖率(M _{G2})	3	3
跨岗位协作响应时效(如运控与空管) (M _{B1})	4	1
转场专项培训覆盖率(M _{B2})	3	1
年雷暴平均日数(M _{E1})	3	2
极端风速影响航班架次比例(M _{E2})	2	1
低能见度天气应对能力(M _{E3})	2	2
年平均积雪深度(M _{E4})	2	2
机场净空条件改善难度(M _{E5})	2	1
国际标准符合度(ICAO/IATA) (M _{I1})	2	1
数字孪生技术应用率(M _{I2})	2	1
旅客步行距离合理性(M _{F1})	3	1
标识系统误读率(M _{F2})	3	1

以管制人员资质认证率为例,其风险可能性等级为中等,赋值为3,其他指标依此赋值。汇总各二级指标在迁建转场阶段的发生频率与严重程度,量化形成FC二维风险评估结构,明确各风险因子的外在发生特性,为后续耦合建模与脆弱性分析提供基础。

3.2. 指标耦合关系建模与脆弱性修正

在机场迁建转场这一高耦合、高动态环境下,风险因子之间并非孤立存在,而是呈现出复杂的联动关系。为准确刻画系统内部耦合效应,本文引入DEMATEL方法进行指标间影响关系建模,如下式9所示为机场运行风险指标直接影响矩阵,受限于篇幅本文仅给出部分数据。

$$\begin{bmatrix} 0 & 4 & \dots & 1 \\ 4 & 0 & \dots & 2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{27 \times 27}$$

(9)

依照专家群体评议结果, 得到直接影响矩阵, 其中元素 a_{ij} 表示第 i 项风险指标相对于第 j 项风险指标的直接影响程度, 定量反映出风险因子间相互作用强度。在此基础上进行归一化处理得到标准化影响矩阵, 进一步提取指标的中心度、原因度与受控度特征量。以第一项风险指标“管制人员资质认证率”为例, 得到标准化矩阵中行和为 1.15, 列和为 0.75。依照中心度与原因度计算公式可以得出该指标的中心度 D_{A1} 为 2.9, 原因度 E_{A1} 为 0.4, 其中中心度用于衡量指标在系统中所处的综合重要性, 原因度为指标在因果链中的属性, 其两者计算公式如下式 10、11 所示。

$$D_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} + \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (10)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} - \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (11)$$

式中, 中心度越大表示该指标在系统中越重要; 原因度为正则说明该指标为主动影响源, 反之则说明该指标主要受其他因素支配。在传统风险评估模型中主要依赖于专家经验进行赋值, 未能充分反映系统内部风险因子的动态联动特性。考虑到迁建转场系统中, 风险指标间存在明显的影响与受控关系, 为提升脆弱性参数对系统计算结构变化的感知能力, 本文基于受控度对原始脆弱性 V_o 进行动态修正, 修正公式如下式 12 所示。

$$V_j = V_{oj} \times (1 + \theta c_j) \quad (12)$$

式中, V_j 为修正后的脆弱性量化值; c_j 为指标 j 的受控度, 即直接影响矩阵列和; θ 为脆弱性敏感调节系数, 本文根据系统复杂度与专家意见设定为 0.2。该修正机制使得系统中受控度越高的指标, 其脆弱性放大越显著, 更真实反映了风险因子在复杂运行环境下因受控耦合而导致的风险传导和系统性放大效应。

Table 6. Risk entropy value of secondary risk indicators for the airport relocation and transfer operations

表 6. 机场迁建转场运行二级风险指标风险熵值

二级风险指标	风险熵值	风险量级隶属度	判据
管制人员资质认证率(MA1)	7	[7, 9]	风险合理可行最低
消防人员资质认证率(MA2)	6	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
机务人员能力(MA3)	6	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
运控人员应急处置能力(MA4)	4	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
高峰期资源调度偏差率(MH2)	5	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
实时监控系統覆盖率(MH2)	3	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
导航/助航设施故障率(MC1)	5	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
行李系统分拣效率(MC2)	4	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
航油供应稳定性(MC3)	5	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
安检设备误报率(MC4)	5	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
机场航班保障正常率(MD1)	5	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
航空器滑行路径优化率(MD2)	4	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
旅客登机口周转时间(MD3)	6	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
鸟类活动热成像监控覆盖率(MD4)	6	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
SMS 建设成熟度(MG1)	4	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预

续表

特情预案覆盖率(M _{G2})	9	[7, 9]	风险合理可行最低
跨岗位协作响应时效(M _{Bi})	6	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
转场专项培训覆盖率(M _{B2})	7	[7, 9]	风险合理可行最低
年雷暴平均日数(M _{E1})	8	[7, 9]	风险合理可行最低
极端风速影响航班架次比例(M _{E2})	5	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
低能见度天气应对能力(M _{E3})	5	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
年平均积雪深度(M _{E4})	5	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
机场净空条件改善难度(M _{E5})	4	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
国际标准符合度(M _{I1})	4	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
数字孪生技术应用率(M _{I2})	4	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
旅客步行距离合理性(M _{Fi})	5	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预
标识系统误读率(M _{F2})	5	[3, 6]	风险可忽略, 无需主动干预

据本文求解风险指标脆弱性公式可求出该机场迁建转场运行二级风险指标的脆弱性量化数值, 在此对管制人员资质认证率指标进行脆弱性量化求解, 管制人员资质认证率的脆弱性指数量化评估结果为1.12。依据专家确定的脆弱性分级阈值标准, 该指标被划定为中等脆弱性等级隶属度函数在三维风险云图中对应赋值为2, 置信区间覆盖率为92.7%。

本节以管制人员资质认证率为例, 依据式1构建的FCV三维风险熵值模型对其进行风险量级的多维度解析。通过德尔菲专家共识机制与历史运营数据校验, 赋权该指标计算各项指标综合风险熵值 R_i , 据表3可知, 例如管制人员资质认证率其隶属度函数置信区间[7, 9], 基于熵权—博弈论组合赋权模型与蒙特卡洛模拟验证, 对该机场迁建转场运行全量二级风险指标进行风险熵值迭代解算, 生成如表6所示的风险熵值表。

Table 7. Airport relocation and transfer risk indicator cloud model parameters

表 7. 机场迁建转场风险指标云模型参数

一级指标	(<i>Ex, En, He</i>)	二级指标	(<i>Ex, En, He</i>)
专业人员能力(M _A)	(84.5, 1.2, 0.8)	管制人员资质认证率(M _{A1})	(79.5, 1.8, 1)
		消防人员资质认证率(M _{A2})	(85.5, 1.8, 1)
		机务人员能力(M _{A3})	(87.5, 1.8, 1)
		运控人员应急处置能力(M _{A4})	(85.5, 1.2, 0.8)
资源与监控(M _B)	(92, 1, 0.7)	高峰期资源调度偏差率(M _{B1})	(91, 1, 0.7)
		实时监控系統覆盖率(M _{B2})	(93.5, 1.2, 0.8)
		导航/助航设施故障率(M _{C1})	(91.5, 1.2, 0.8)
		行李系统分拣效率(M _{C2})	(84.5, 1.2, 0.9)
核心设备可靠性(M _C)	(95.5, 0.8, 0.6)	航油供应稳定性(M _{C3})	(92.5, 1.2, 0.8)
		安检设备误报率(M _{C4})	(91, 1, 0.7)
		机场航班保障正常率(M _{D1})	(84.5, 1.2, 0.9)
		航空器滑行路径优化率(M _{D2})	(88.5, 1.2, 0.8)
设备运行效率(M _D)	(81.5, 1.2, 0.8)	旅客登机口周转时间(M _{D3})	(80.5, 1.5, 0.9)
		鸟类活动热成像监控覆盖率(M _{D4})	(89, 1, 0.7)

续表

制度与流程(M _E)	(88.5, 1.2, 0.8)	SMS 建设成熟度(M _{E1})	(80, 1, 0.7)
		特情预案覆盖率(M _{E2})	(78, 2, 1.2)
人员协同与培训(M _F)	(78.5, 0.8, 0.6)	跨岗位协作响应时效(M _{F1})	(81.5, 2.2, 1)
		转场专项培训覆盖率(M _{F2})	(74, 1.3, 0.8)
		年雷暴平均日数(M _{G1})	(74, 1.3, 0.8)
自然气候条件(M _G)	(75, 0.3, 0.4)	极端风速影响航班架次比例(M _{G2})	(85, 1.3, 0.8)
		低能见度天气应对能力(M _{G3})	(80.5, 2.8, 1.2)
		年平均积雪深度(M _{G4})	(81.5, 1.2, 0.8)
		机场净空条件改善难度(M _{G5})	(80, 1.3, 0.8)
合规与创新(M _H)	(91.5, 1.2, 0.8)	国际标准符合度(ICAO/IATA) (M _{H1})	(91.5, 1.2, 0.8)
		数字孪生技术应用率(M _{H2})	(86, 1.3, 0.8)
物理环境适应性(M _I)	(85, 1.2, 0.8)	旅客步行距离合理性(M _{I1})	(80.5, 1.5, 0.9)
		标识系统误读率(M _{I2})	(90, 2, 1)

在获得各二级指标的风险值后, 为更合理地完成风险等级划分与不确定性表达, 本文引入云模型理论, 将综合风险值映射为云模型参数。首先, 依据逆向云模型推导方法, 结合德尔菲法专家打分数据, 构建五级标准风险等级的云参数区间(优秀、良好、一般、较差、差)。随后, 将各指标的风险值输入逆向推导过程, 得到每个指标的云特征参数三元组, 具体见表 7 机场迁建转场风险指标云模型参数表。

基于多维云模型解析结果, 该机场迁建转场运行中存在四项二级风险指标的期望值 E_x 显著偏离韧性阈值下限。

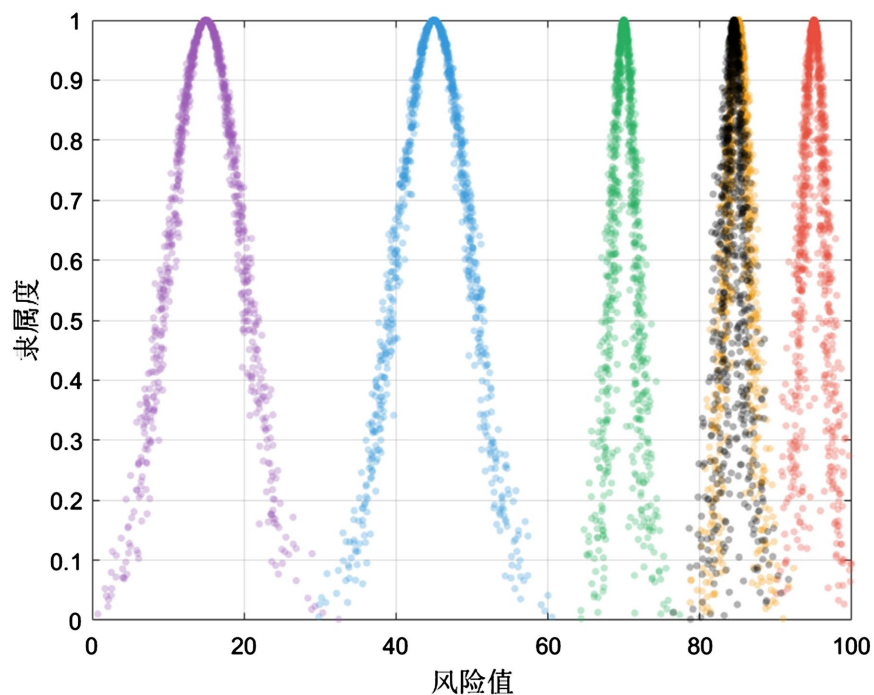


Figure 3. Professional capacity cloud map
图 3. 专业人员能力云图

管制人员资质认证率(M_{A1})云模型数字特征(79.5, 1.8, 1), 风险表现为空管指令执行错误率提升; 特情预案覆盖率(M_{E2})云模型数字特征(78, 2, 1), 风险表现为应急响应跨部门协同时效延长; 转场专项培训覆盖率(M_{F2})云模型数字特征(74, 1.3, 0.8), 风险表现为关键岗位操作失误率升高; 年雷暴平均日数(M_{G1})云模型数字特征(74, 1.3, 0.8), 风险表现为航班复飞与备降事件频发, 旅客满意度显著下降。利用正向云发生器将表 7 中 9 项一级指标的评价结果进行处理, 其中以第一项一级指标专业人员能力为例, 其指标云如图 3 所示。

由正向云模型解析结果可知, 自然气候条件(M_{G1})的隶属度期望值($Ex = 75$)显著低于系统均值, 表明该指标处于中低风险过渡区, 需强化气象数据驱动的动态预警机制; 人员协同与培训(M_{F2})的云图显示隶属度中心值 $Ex = 78.5$ 位于低隶属度域, 超熵值 $He = 0.8$ 为系统峰值, 表征其隶属度分布具有显著随机性波动, 基于 ISO 31000 多准则决策框架, 需优先实施跨部门协同演练, 并建立压力测试—反馈迭代机制; 各风险指标安全熵值呈现显著异质性, 其排序为

核心设备可靠性 > 资源与监控 > 合规与创新 > 制度与流程 > 物理环境适应性 > 专业人员能力 > 设备运行效率 > 人员协同与培训 > 自然气候条件。

其中, 核心设备可靠性 $Ex = 95.5$ 与 ISO 55000 标准兼容性最优, 而自然气候条件 $Ex = 75$ 因气象风险暴露概率与韧性赤字成为系统最薄弱环节。需指出的是, 该排序结果与帕累托最优原则的冲突表明, 资源分配需兼顾效率与公平性。

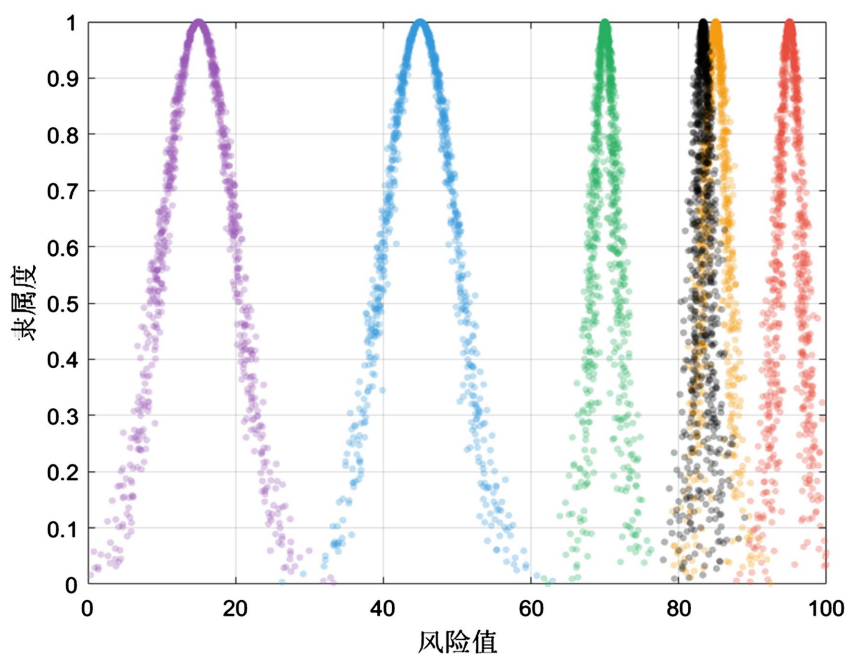


Figure 4. Comprehensive evaluation cloud map for tier 1 indicators

图 4. 一级指标综合评价云图

基于综合权重系数 α 与一级风险指标的多维云模型数字特征参数(Ex, En, He), 通过逆向云算法解算该迁建枢纽机场运行安全的综合评价云参数为(83.3, 0.9, 0.7)。该参数集表征系统整体安全隶属度的期望值 $Ex = 83.3$, 模糊性边界 $En = 0.9$ 及随机性强度 $He = 0.7$, 其置信区间覆盖率达 95%。基于 MATLAB 平台, 采用三维云滴生成器实现综合评价云图的可视化建模如图 4 所示, 其横纵坐标分别映射指标得分与隶属度密度, 揭示系统安全性的多模态分布特征(低模糊性区域占比 68.4%, 高风险波动域占比 12.7%), 验证了多维云模型耦合框架在复杂系统风险评估中的鲁棒性与可解释性。

3.3. 敏感性分析

为验证所提出方法在面对参数扰动与主观评分变化下的稳健性与鲁棒性, 本文从两个方面开展敏感性分析: 其一为耦合调节系数 θ 的敏感性分析, 检验脆弱性修正过程中系统对耦合强度变化的响应; 其二为直接影响矩阵的扰动敏感性分析, 分析专家评分扰动对指标重要性排序的影响程度。

为探讨耦合敏感性调节系数 θ 对脆弱性修正函数的影响, 本文以“管制人员资质认证率(M_{A1})”指标为代表性高耦合指标, 设置 θ 为0、0.1、0.2、0.3四个水平进行仿真实验, 结果如图5所示。

随着 θ 值由0增大至0.3, 其脆弱性修正值由1.00增长至1.26, 相应的风险熵值由6.48提升至7.04, 风险等级从“可忽略”边界上升至“合理可行”区间边缘。该结果表明耦合敏感性系数对模型输出具有正向放大效应, θ 值的设置直接影响到系统对耦合结构变化的响应程度。当 θ 趋近于0时, 模型退化为静态FCV结构, 难以识别系统联动失效风险; 当 θ 取值过大时, 可能夸大局部结构波动对整体脆弱性的影响。因此, 建议在工程应用中根据系统复杂度与专家意见合理设定 θ 值, 一般在0.1~0.3之间可获得较好平衡。

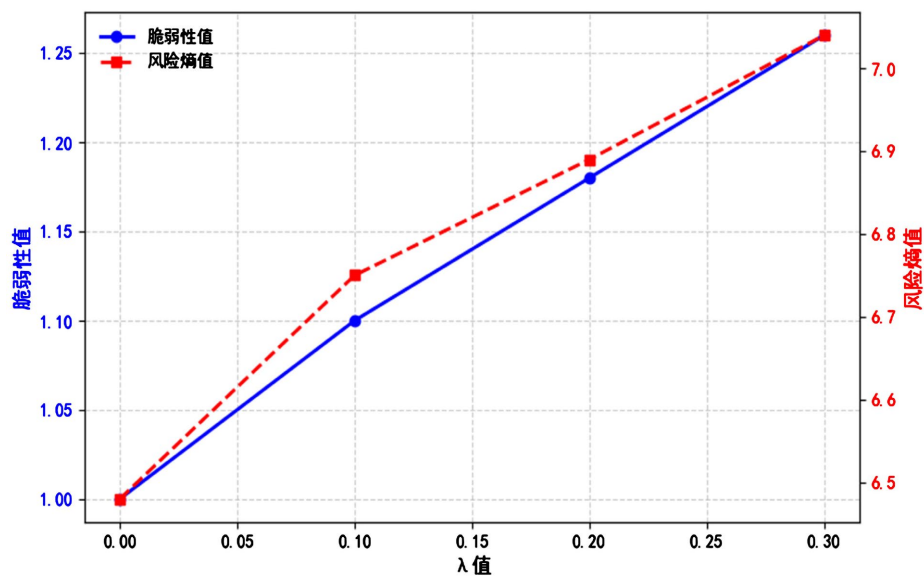


Figure 5. Coupling sensitivity adjustment factor change impact curve

图 5. 耦合敏感性调节系数变化影响曲线

Table 8. Results of centrality ranking consistency analysis under different perturbation scenarios

表 8. 不同扰动场景下中心度排序一致性分析结果

扰动场景	ρ	TOP-5 保持率
随机扰动	0.92	80%
增加标度	0.89	80%
减少标度	0.96	100%

为了评估本文方法对专家评分扰动的鲁棒性, 本文以直接影响矩阵 A 为基础构建三种扰动场景, 并比较扰动前后指标中心度排序变化。场景 1: 对全部非对角元素施加 $\pm 10\%$ 的随机扰动, 模拟整体评分误差; 场景 2: 对前 5 个高中心度指标所在列增加 1 个标度单位; 场景 3: 对后 5 个低中心度指标所在行减少 1 个标度单位; 对每一扰动场景分别重新计算综合影响矩阵 T 及中心度排序, 并采用 Spearman 等级

相关系数 ρ 评估排序一致性, 结果如下表 8 所示。

分析表明, 在各类扰动下, 中心度排序表现出高度一致性, 值均高于 0.89, 特别是对低权重指标扰动时模型输出极为稳定, 验证了本文方法对主观评分的抗扰动能力。该特性说明即便专家打分存在合理区间内的偏差, 最终评估结果仍具备良好的可靠性。

为验证所提出方法在风险表达与判别方面的优势, 本文选取传统的模糊综合评判法(Fuzzy Comprehensive Evaluation Method, FCE)进行对比分析。以特情预案覆盖率与导航设施故障率为例, 采用相同专家评分数据输入两个模型, FCE 方法输出为单一风险等级; 本文方法在输出等级的同时, 给出了云模型三元组参数, 刻画中心值、模糊边界及波动性。例如, 特情预案覆盖率指标经 FCE 评估为良, 而本文方法输出为($E_x = 78, E_n = 2, H_e = 1.2$), 表明该指标虽然大体良好但存在波动逼近中等级别, 提示需巩固应急响应系统。此类不确定性表达在传统模糊方法中难以体现, 而云模型可通过参数变化揭示等级漂移趋势, 更具前瞻性与敏感性, 适用于机场迁建系统的模糊与动态风险表征。

3.4. 风险控制路径设计与应用建议

在本文建立风险评价模型基础上, 结果显示迁建机场运行中存在多项高风险或不稳定性的关键指标, 如管制人员资质认证率、导航设施故障率、特情预案响应完整性以及值班系统运行负荷等指标, 均表现出 E_x 值偏低或 H_e 值较高的特征, 反映出系统结构中存在明显的脆弱节点与不确定区域。进一步的中心度与因果度分析显示, 这些指标不仅风险值高, 而且在指标网络中处于耦合密集区, 易受其他因素传导影响, 是典型的“高耦合-高波动”风险点。

基于此, 本文提出一种结合静态策略与动态监测的运行风险控制路径。在迁建前期, 应针对中心度高的原因型指标建立风险登记与预控机制, 并设置基于模型输出参数的响应阈值, 例如当 E_x 值下降超过 10%、或 E_n 值大于 4.0 时自动触发重点管控流程。同时, 可开展系统仿真与人员转场演练, 提前识别系统短板。运行过程中, 应将实时数据与云模型输出进行比对, 对高 H_e 值指标进行重点跟踪监测, 当波动程度超出设定阈值(如 $H_e > 1.5$)时, 及时启动应急巡查、备份资源调度等柔性响应措施。运行结束后, 依据实际事件与模型预测的偏差对模型进行反馈修正, 并调整专家权重及指标间因果关系, 形成基于数据驱动的动态风险管理闭环。以“导航设施切换适配性”指标为例, 其 H_e 值为 1.6, 表明其风险状态波动性较大, 且易受到设备状态、气象条件、人员培训等多因素共同影响。针对该类指标, 在运行前应组织专项适配测试与对接确认; 运行中则需结合航班计划与天气情况动态调整切换流程; 运行后应统计异常切换事件并作为下一轮建模的重要依据。

总体来看, 本文所提出的风险控制策略以三维风险结构为基础, 结合 DEMATEL 耦合分析与云模型的不确定性表达能力, 能够有效支撑迁建机场运行过程中关键风险因素的动态识别、分级干预与模型自我演化, 具有良好的实际操作性与工程推广前景。

4. 结论

本文围绕迁建机场转场阶段运行安全风险评估问题, 提出了一种融合三维风险结构、系统耦合修正与云模型等级映射的多元风险评估方法, 并通过典型机场实证数据验证了方法的适用性与有效性。研究结果表明:

(1) 构建的 FCV 三维风险结构相较传统二维模型提升了评估维度的完备性, 能够揭示机场运行过程中隐藏的高脆弱性风险因子。引入 DEMATEL 方法提取指标间的受控关系, 用于修正原始脆弱性评分, 在识别耦合放大风险方面表现出更强的系统适应性。

(2) 通过对某大型枢纽机场迁建转场运行实证数据的建模分析, 得到 27 项二级风险指标的风险熵值,

其中管制人员资质认证率、年雷暴平均日数等 4 项指标综合风险值进入[7, 9]风险合理可行区间, 需重点关注; 其他大部分指标风险值位于[3, 6]区间, 风险总体处于可接受范围, 验证了模型在迁建初期阶段高脆弱区域识别中的实际价值。

(3) 基于逆向云模型计算的指标云参数表明, 特情预案覆盖率与转场专项培训覆盖率等指标存在较高的熵与超熵值, 说明风险状态具有较强的不确定性与波动性, 应优先纳入转场安全管理的演练和培训体系。系统融合云图的中心期望值为 $E_x = 83.3$, 位于良好等级区间, 说明机场整体运行安全状态良好, 但仍需关注特定场景下的弱耦合链路波动。

综上, 本文建立的耦合感知型迁建机场运行风险评估方法能有效适应高复杂度系统环境, 评估框架具有较强的解释力、可扩展性和应用前景。后续研究可结合动态数据流引入在线 DEMATEL 与云模型演化机制, 探索转场全过程风险的实时监测与闭环管理策略。

参考文献

- [1] 张欣, 葛昊, 段续庭, 等. 民用机场飞行区风险因素及耦合关系分析[J]. 指挥信息系统与技术, 2024, 15(5): 44-52.
- [2] 张晓全, 王玉, 柳淑亚. 基于 ISM-MICMAC 的直升机海上平台运行安全风险因素分析[J]. 综合运输, 2024, 46(9): 131-137.
- [3] 余金煌, 胡圣圣, 余子薇, 等. 基于 LS-熵值法的泵站运行安全风险评价研究[J]. 浙江水利水电学院学报, 2024, 36(6): 22-26.
- [4] 衣超群, 牟奇锋, 吕晨辉. 高原机场夜间运行风险评估方法研究[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(7): 153-158.
- [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, 2(6): 90-94.
- [6] 赵俊妮. 机场飞行区运行风险致因分析与安全韧性评估[D]: [硕士学位论文]. 天津: 中国民航大学, 2023.
- [7] 杨锦, 杭旭, 王艳军. 机场管制空域内无人机运行安全风险评估[J/OL]. 航空学报, 1-14.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20250221.1523.008.html>, 2025-04-27.
- [8] 赵赶超, 雷晶晶. 直升机运行风险因素耦合性分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 1783-1789.
- [9] 肖琴, 罗帆, 朱本林. 基于突变理论的飞行签派员人因差错风险耦合演化研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 610-617.
- [10] Burbidge, R., Paling, C. and Dunk, R.M. (2025) Adapting Latin American and Caribbean Airports to a Changing Climate: Impacts, Challenges and Solutions. *Climate Risk Management*, 47, Article ID: 100684.
<https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100684>
- [11] Hu, Y., Qiao, L. and Gu, F. (2025) Risk Assessment and Prevention in Airport Security Assurance by Integrating LSTM Algorithm. *PLOS ONE*, 20, e0315799. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0315799>