

中文引用格式:王兴隆,邱鑫,赵俊妮. 机场飞行区运行安全韧性评估与提升[J]. 中国安全科学学报,2025,35(4):18-27.

英文引用格式:WANG Xinglong, QIU Xin, ZHAO Junni. Airport flight zone operational safety resilience assessment and enhancement[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(4): 18-27.

# 机场飞行区运行安全韧性评估与提升\*

王兴隆<sup>1</sup>研究员,邱鑫<sup>1</sup>,赵俊妮<sup>2</sup>

(1 中国民航大学 民航飞联网重点实验室,天津 300300;

2 蚌埠机场建设投资有限公司,安徽 蚌埠 233000)

中图分类号:X949 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.04.1005

基金项目:国家自然科学基金资助(62173332,U2133207);天津多元基金资助(21JCYBJC00700)。

**【摘要】** 为降低机场飞行区规模和航班量持续增长带来的风险,开展机场飞行区的安全韧性评估。首先,通过分析机场飞行区的历史数据来识别风险因素;其次,量化关键风险因素权重,并构建一个基于系统动力学(SD)的机场飞行区安全韧性评估模型,提出安全韧性指标;然后,通过仿真分析评估机场飞行区的安全韧性,并提出针对性提升策略;最后,以国内某大型机场飞行区为研究对象,评估其安全韧性。结果表明:在人员因素中,机组人员的表现对运行安全韧性水平影响最大,通过控制管制空域内的流量、增强安全意识和增加管理投入,飞行区运行安全韧性提升9.11%;在环境、设备因素以及管理因素中,设备更新机制完善程度对运行安全韧性水平影响最大,通过加快设备更新频率、改善设备缺陷以及增加管理投入,飞行区运行安全韧性提升21.49%。

**【关键词】** 机场飞行区; 运行安全韧性; 韧性评估; 提升策略; 运行风险; 系统动力学(SD); 因果关系

## Airport flight zone operational safety resilience assessment and enhancement

WANG Xinglong<sup>1</sup>, QIU Xin<sup>1</sup>, ZHAO Junni<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Internet of Aircrafts for Civil Aviation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2 Bengbu Airport Construction Investment Co., Ltd., Bengbu Anhui 233000, China)

**Abstract:** In order to reduce the risks associated with the continuous growth of airport flight area size and flight volume, the safety resilience assessment of airport flight areas was carried out. First, risk factors were identified by analyzing the historical data of airport flight zones. Second, key risk factor weights were quantified, and a SD-based safety resilience assessment model for airport flight zones was constructed to propose safety resilience indicators. Then, the safety resilience of airport flight zones was assessed through simulation analysis, and targeted enhancement strategies were proposed. Finally, a large domestic airport flight area was taken as the research object to assess its safety resilience. The results show that among the personnel factors, the performance of the flight crew has the greatest impact on the level of operational safety resilience. By controlling the flow in the controlled airspace, enhancing safety awareness and

increasing management inputs, the operational safety resilience of the flight area is improved by 9.11%. Among the environmental, equipment and management factors, the degree of improvement of the equipment updating mechanism has the greatest impact on the operational safety resilience level. By accelerating the frequency of equipment renewal, improving equipment deficiencies and increasing management inputs, the operational safety resilience of the flight area is increased by 21.49%.

**Keywords:** airport flight zone; operational safety resilience; resilience assessment; enhancement strategy; operational risk; system dynamics (SD); causal relationship

## 0 引言

机场飞行区是确保飞机安全起降和地面高效运行的关键区域,由于飞行区规模、航班量和保障任务的持续增加,机场飞行区所面临的风险因素变得错综复杂,致因多源、影响多态、韧性不足等问题日益凸显。如何有效提升机场飞行区面对风险危害的韧性能力是建设安全、高效机场的前提条件和必要手段。

为提升机场飞行区运行安全,已有大量研究提出系统的理论和方法,如 HOLLING<sup>[1]</sup>在生态系统中将韧性概念化,并将其与稳定性区分开来。在交通运输系统的韧性研究领域, MURRAY-TUITE<sup>[2]</sup>提供明确定义,并从 10 个维度进行评估; YANG Zhuyu 等<sup>[3]</sup>综述了关键基础设施韧性评估的现有指标,指出研究中缺乏统一标准和系统性的问题,并强调建立综合性指标体系以改进评估方法的重要性; ZHOU Yaoming 等<sup>[4]</sup>提供了一个全面的概念和方法论综述;唐少虎等<sup>[5]</sup>提出针对暴雨内涝情况下城市轨道交通系统安全韧性的评估模型;任婕等<sup>[6]</sup>深入研究了城市网络韧性的理论,概念辨析城市网络的本体韧性和支撑韧性,并构建一个综合性的分析框架,为城市与区域空间组织的优化提供科学支持;李龙海等<sup>[7]</sup>提出一种基于贝叶斯最佳-最差法和多源异构多准则折衷排序法的机场运行韧性评估方法; TANG Junqing 等<sup>[8]</sup>提出一种改进的韧性三角形度量方法,建立多维度韧性指标量化交通拥堵;采用贝叶斯网络评估北京市道路交通系统韧性<sup>[9]</sup>;王兴隆等<sup>[10]</sup>构建基于贝叶斯网络的层次化模型,定量评估 2010—2019 年中国空中交通运输系统的韧性及其变化趋势;并基于空中交通管理运行下的失效与拥堵规则,计算分析航空相依网络的鲁棒性和拥堵性<sup>[11]</sup>。在航空领域,系统动力学(System Dynamics, SD)是研究大型复杂系统的有效工具,如 STERMAN<sup>[12]</sup>开发的人民航空飞行模拟器; LYNEIS<sup>[13]</sup>在飞机需求预测方面的研究; MILLER

等<sup>[14]</sup>对航空基础设施投资政策的评估; STOJKOVIĆ 等<sup>[15]</sup>提出一个结合 SD 和人工神经网络的评估框架,用于量化水资源系统在洪水和地震等危险事件下的动态韧性,并以塞尔维亚皮罗特水系统为例进行实证研究; WANG Xinfeng 等<sup>[16]</sup>采用 SD,提出一种新的装备系统发展战略风险识别方法,以提高风险管理的准确性和有效性;顾兆军等<sup>[17]</sup>提出一种结合 SD 和关联分析的民航信息物理系统网络安全风险评估方法,以航油自控系统为例,通过 Vensim 软件仿真,有效评估了风险的时间依赖性和耦合效应;沈静瑶等<sup>[18]</sup>应用 SD 原理,构建预测中国民航客运市场需求模型;曹允春等<sup>[19]</sup>基于供应链韧性视角,采用 SD 分析了我国国际航空货运系统,提出提升航空货运业国际竞争力的策略,为航空物流的高质量发展提供理论支持;此外,还深入研究了成都跨境航空物流通道对适空产业发展和聚集的影响,进一步丰富航空物流与区域经济发展相互作用的研究<sup>[20]</sup>。这些研究对机场飞行区的综合应用方面,尤其是对 SD 模型的应用较少,仍存在较大的研究空间。

鉴于此,笔者拟通过构建基于 SD 的机场飞行区安全韧性评估模型,实现对飞行区关键风险因素的精准识别与量化,提出并验证有效的风险管理策略,从而显著提升飞行区面对各种风险挑战时的韧性和安全性。

## 1 飞行区 SD 建模

SD 模型适用于机场飞行区运行安全韧性研究,因为其能适应非线性复杂系统、强调系统模型结构的正确性、对数据依赖性不强、模拟系统随时间变化的动态行为,为提升韧性水平提供依据。飞行区 SD 建模步骤如图 1 所示。

## 2 飞行区运行风险 SD 模型

因果关系图和存量流量图是 SD 模型的核心和理论基础。通过分析国内某大型机场飞行区的历史

不安全事件数据,构建 SD 模型以研究其运行风险。

### 2.1 因果关系模型

因果关系模型是 SD 中的一个概念模型,通过识别系统中各个变量之间的因果关系来表示系统结构。模型通常以因果回路图(Causal Loop Diagram, CLD)的形式呈现,包含正反馈和负反馈回路,正表示随着原因的增加,效果与原因成正比;负表示两者之间成反比。使用 Vensim 软件建立机场飞行区运行风险动力学模型,如图 2 所示。根据对机场飞行区不安全事件中事件主因的分类,将整个系统分为人员、设备与环境、管理 3 个子系统。通过适当处理后得到的数据样例见表 1。

### 2.2 存量流量模型

存量流量模型是 SD 中的一个数学模型,通过描述系统中存量(如资源、信息或物质的累积量)和流量(存量的变化率)之间的关系来模拟系统随时间的动态变化,是进行计算机仿真和预测的基础。存量流量图中的基本要素有状态变量、速率变量、辅助变量和常量。

根据机场飞行区运行风险致因相互作用机制和需要确定的变量构造 SD 模型,设置包括状态变量、速率变量、辅助变量和常量等共 64 个变量,其中,6 个状态变量,12 个速率变量,31 个辅助变量,15 个常量。通过 Vensim 软件建立机场飞行区运行风险存量流量,如图 3 所示。

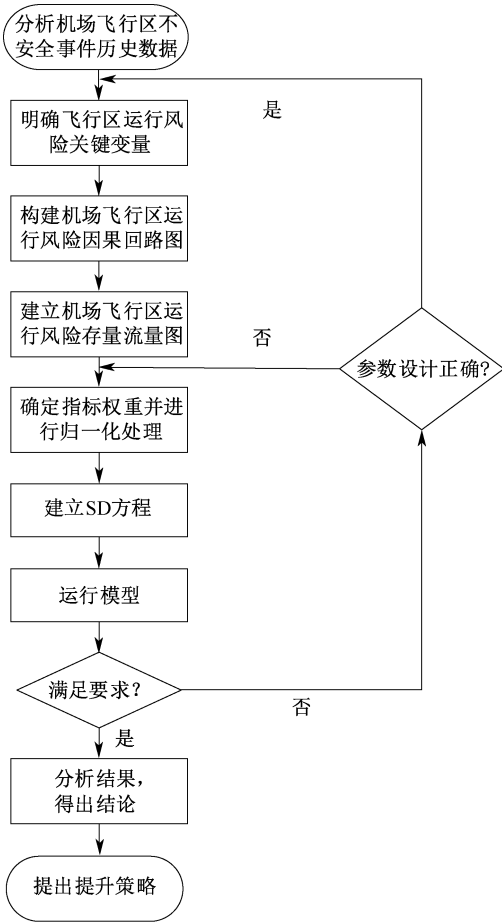


图 1 飞行区 SD 建模步骤

Fig.1 Flight zone SD modelling steps

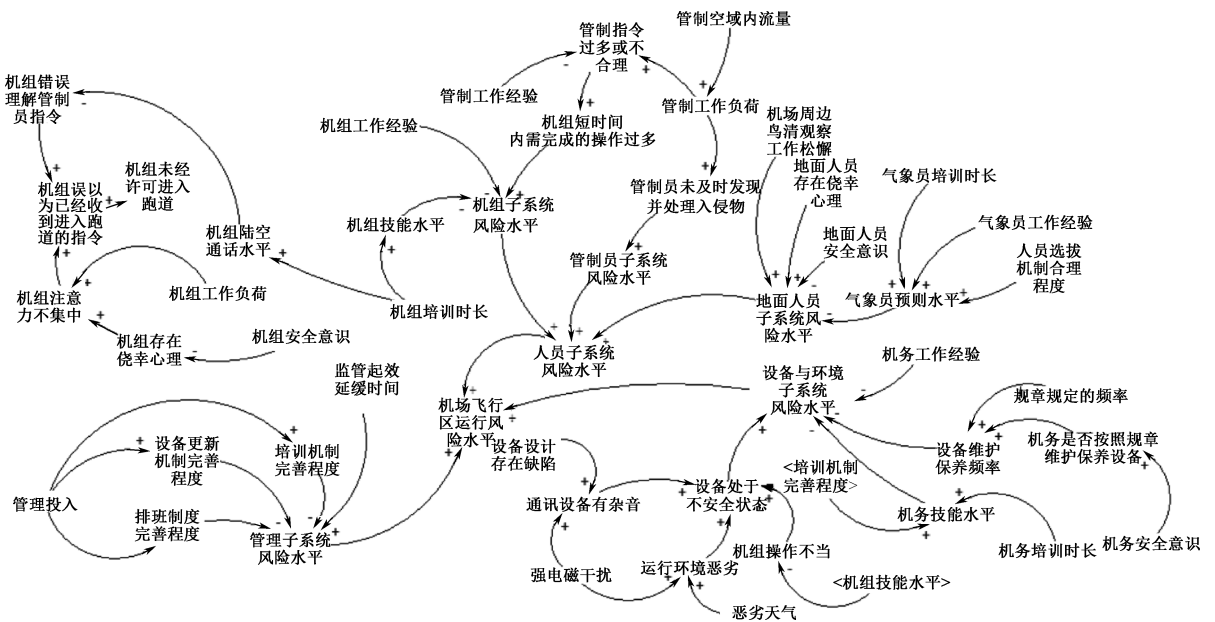


图 2 机场飞行区运行风险因果回路

Fig.2 Airfield area operation system risk cause-and-effect loop diagram



表 2 页面排行算法得分

Table 2 Page ranking algorithm score

序号	节点名称	节点得分
1	设备故障	1.00
2	设备可靠性低	0.87
3	机组误以为已收到进入跑道指令	0.86
4	鸟击	0.64
5	设备处于不安全状态	0.58
6	跑道入侵	0.55
7	设备维护保养不当	0.52
8	起飞许可过期	0.47
9	机组短时间内需完成操作过多	0.45
10	管制指令过多或者不合理	0.43
⋮	⋮	⋮
45	通信设备有杂音	0.11
46	气象员培训时长	0.02

再结合表 2 中的各风险致因节点得分,使用 Vensim 软件中的 DYNAMO 语言建立模型中各因素之间的 SD 方程。SD 方程在模型中的作用是量化描述机场飞行区运行风险因素之间的动态相互作用,为评估和提升飞行区的安全韧性提供数学基础和模拟工具。构建完方程后,需要进行模型校准、仿真运行、结果分析和模型验证,以确保模型能够准确模拟系统行为并为决策提供支持。

1) 状态变量方程是描述系统状态随时间变化的基本关系。速率变量方程是定义状态变量变化的速率。辅助变量方程是提供额外的信息,帮助计算或描述系统的动态特征。得到的变量方程见表 3。

表 3 变量方程

Table 3 Variable equation

变量类型	变量名称	方程
状态变量	人员子系统风险水平	人员子系统风险水平增长率-人员子系统风险水平衰减率
	管制员子系统风险水平	管制员子系统风险水平增长率-管制员子系统风险水平衰减率
	机组人员子系统风险水平	机组子系统风险水平增长率-机组子系统风险水平衰减率
	地面人员子系统风险水平	地面人员风险水平增长率-地面人员风险水平衰减率
	设备与环境子系统风险水平	设备与环境子系统风险水平增长率-设备与环境子系统风险水平衰减率
	管理子系统风险水平	管理子系统风险水平增长率-管理子系统风险水平衰减率
速率变量	机场飞行区运行风险水平	$\max(\text{人员子系统风险水平}+\text{设备与环境子系统风险水平}+\text{管理子系统风险水平},0)$
	人员子系统风险水平增长率	$\max(\text{地面人员风险水平增长率}+\text{机组子系统风险水平增长率}+\text{管制员子系统风险水平增长率},0)$
	人员子系统风险水平衰减率	$\max(\text{地面人员风险水平衰减率}+\text{机组子系统风险水平衰减率}+\text{管制员子系统风险水平衰减率},0)$
	管制员子系统风险水平增长率	管制员未及时发现并处理入侵物+管制指令过多或不合理
	管制员子系统风险水平衰减率	$0.5 \times \text{管制工作经验}+\text{管制技能水平}$
	机组子系统风险水平增长率	机组未经许可进入跑道+机组短时间内需完成的操作过多
	机组子系统风险水平衰减率	$0.5 \times (\text{机组工作经验}+\text{机组技能水平})$
	地面人员子系统风险水平增长率	机场周边鸟清观察工作松懈
地面人员子系统风险水平衰减率	气象员预测水平	
辅助变量	管制工作负荷	$\text{if then else}(\text{管制空域内流量}>10, \text{管制空域内流量}, \text{random normal}(\text{管制空域内流量}-3, \text{管制空域内流量}+3, \text{管制空域内流量}, 1, 0)) \times \text{if then else}(\text{排班制度完善程度}<2, 2, 1)$
	管制员未及时发现并处理入侵物	$\text{if then else}(\text{管制工作负荷}<10, 1, \text{管制工作负荷})$
	管制指令过多或不合理	管制工作负荷/管制工作经验 $\times 15$
	管制技能水平	$\text{smooth}(\text{管制培训时长}, \text{管制培训时长}, 2) \times \text{if then else}(\text{培训机制完善程度}<10, 0.5, 1)$
	机务技能水平	$\text{smooth}(\text{机务培训时长}, \text{机务培训时长}, 2) \times \text{if then else}(\text{培训机制完善程度}<10, 0.5, 1)$
	机组工作负荷	$5 \times \text{if then else}(\text{排班制度完善程度}<2, 2, 1)$
	机组注意力不集中	$\text{if then else}((\text{机组存在侥幸心理}>5); \text{or}; (\text{机组工作负荷}>10), \text{机组工作负荷}+\text{机组存在侥幸心理}, \max(\text{机组存在侥幸心理}, \text{机组工作负荷}))$
	排班制度完善程度	管理投入 $\times 0.1 \times \text{random normal}(0.8, 1.2, 1, 0.1, 0)$
气象员预测水平	人员选拔机制合理程度 $\times (\text{smooth}(\text{气象员培训时长}, \text{气象员培训时长}, 2) + \text{气象员工作经验}) \times \text{if then else}(\text{培训机制完善程度}<10, 0.5, 1)$	

2) 常量。模型中的其余变量均为常量,具体数值取决于所研究机场飞行区运行的实际情况,将其代入 SD 模型中,评估所研究的机场飞行区运行韧性水平。同时,采用控制变量法调整模型中的关键变量,分析不同情境下飞行区运行韧性变化情况。由于航空领域的特殊性以及相关数据的限制,模型中所使用的常量可能存在一定的偏差和不足。为尽可能减少这些偏差,需要查阅民航相关资料并咨询专家及一线工作者,以确保模型的可靠性和适用性。从而更准确地反映实际情况,并提高模型的预测能力和解释性。

### 3.3 运行安全韧性指标

机场飞行区作为一个复杂的运行系统,面对人员、设备、环境和管理等多方面因素的影响,其反应和恢复能力各异。轻微干扰可能导致性能下降,而关键风险因素可能引发系统性故障。通过应急响应和韧性特性,系统能够逐步恢复正常运行。综合多学科视角,将机场飞行区运行安全韧性定义为:在干扰发生至结束后,系统保持功能或快速恢复的能力,强调其在全过程中的承受、吸收、恢复和适应的综合表现,如图 4 所示。

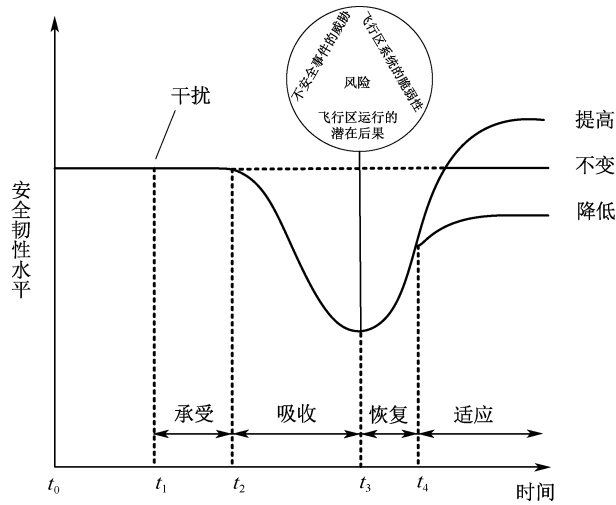


图 4 机场飞行区运行安全韧性模型

Fig. 4 Operational safety resilience model in airfield area

当  $t_0 < t < t_1$  时为系统初始稳定阶段,此时系统未受到外界干扰;当  $t_1 < t < t_2$  时为外界干扰下系统的承受阶段,韧性水平维持稳定直至超过自身承受水平;当  $t_2 < t < t_3$  时为吸收阶段,  $t_2$  时刻韧性水平开始下降,  $t_3$  时刻达到最低值;当  $t_3 < t < t_4$  时为恢复阶段,韧性水平开始逐渐恢复,并随时间变化;当  $t > t_4$  时为适应阶段,韧性水平达到新的稳定状态,其与初始水平不一定相同,可能提高、不变或降低。

机场飞行区运行安全韧性受多种因素的影响,并提出安全韧性指标,针对系统风险值分析机场飞行区运行安全韧性表征和度量标准,建立指标如下:

$$R_i = \frac{1}{V_i} \quad (2)$$

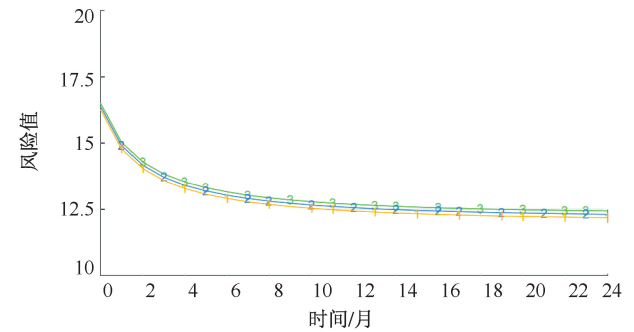
式中:  $R$  为机场飞行区运行的安全韧性水平;  $V$  为在时刻  $i$  处机场飞行区运行所遭受的风险值。安全韧性水平取决于风险值因素,因此,验证所建立的机场飞行区运行风险 SD 模型准确性,即验证安全韧性评估的准确性。

## 4 安全韧性评估模型实例分析

### 4.1 安全韧性评估模型有效性检验

在仿真模拟机场飞行区运行风险的 SD 模型前,通过运行检验来验证模型的有效性。如果模型对参数的变化过于敏感或不敏感,表明模型构建存在问题,需要重新估计参数或重建模型。

设备状态风险值如图 5 所示。在第 10 个月,设备处于不安全状态的风险值为 12.5;将恶劣天气发生比重增加 5% 后的风险值为 12.9;将恶劣天气发生比重增加 10% 后的风险值为 13.3。在不同风险水平下,风险值的整体变化趋势相同,且风险值随着恶劣天气发生比重的增加而增大。模型的灵敏度符合仿真要求,即模型结果在参数变化时的变化程度是合理的。



设备处于不安全状态: 原始状态  
设备处于不安全状态: 恶劣天气发生比重增加5%  
设备处于不安全状态: 恶劣天气发生比重增加10%

图 5 设备状态风险值

Fig. 5 Equipment condition risk values

### 4.2 运行安全韧性评估

根据飞行区运行风险动力学模型选取控制要素,分别针对人员、设备与环境、管理 3 个因素进行仿真分析。通过对比各因素的风险值,完成对其安全韧性的评估。

1) 人员因素安全韧性评估。攻击人员因素的风险水平变化趋势如图 6 所示。人员子系统主要包

括地面人员、机组人员以及管制员。

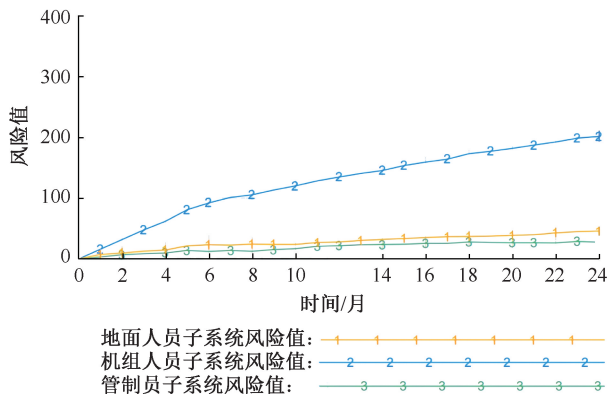


图6 人员因素风险分析

Fig. 6 People subsystem risk analysis

图6中,随着仿真时间的推进,风险值整体呈上升趋势。其中,标注2机组人员子系统的风险值增长速度特别快,明显高于地面人员和管制员子系统的风险值。这一趋势表明:在人员子系统中,机组人员因素对于整体风险变化影响较大。机组人员的表现更可能成为引发风险的关键因素。

2) 设备与环境因素安全韧性评估。当考虑设备因素的风险时,设备更新机制完善程度和机务技能水平产生显著影响,如图7中标注1曲线和标注3曲线所示;当分析环境因素对运行风险的影响时,设备处于不安全状态和运行环境恶劣排在前列,如图7中标注2曲线和标注4曲线所示。

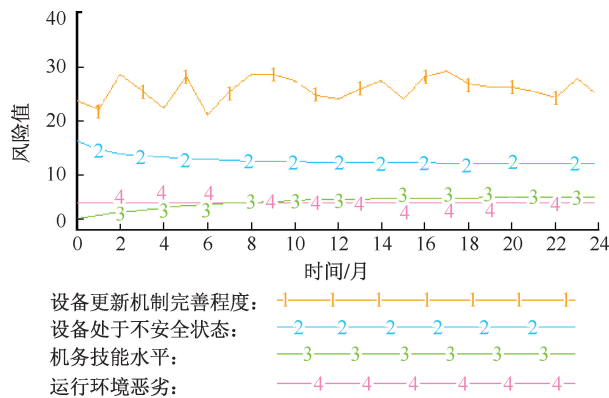


图7 设备与环境因素风险分析

Fig. 7 Equipment and environment subsystem risk analysis

由图7可知:在设备与环境子系统中,设备更新机制完善程度的风险值在整个仿真周期内一直较高且波动较大;在仿真初期,由于设备具备一定的适应性,设备处于不安全状态的风险值略有下降,之后保持稳定状态;随着仿真周期的增加,机务技能水平的风险值呈现上升趋势,并最终保持在一个稳定的水

平;运行环境恶劣的风险值在整个仿真过程中波动不大。综上,设备更新机制完善程度是机场飞行区安全管理的关键,需要重点关注,并采取措施加以改进。

3) 管理因素安全韧性评估。在管理子系统中,攻击排名靠前的设备更新机制完善程度、排班制度完善程度、培训机制完善程度。管理因素风险分析如图8所示。

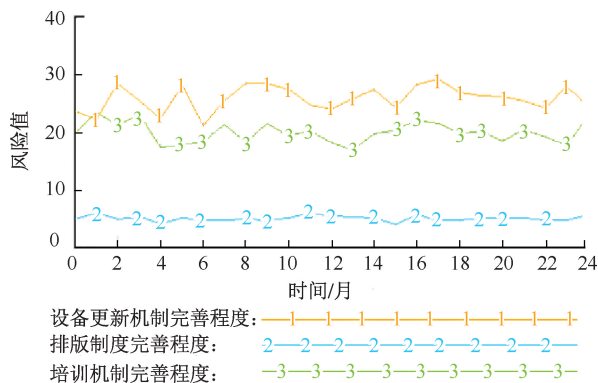


图8 管理因素风险分析

Fig. 8 Management subsystem risk analysis

由图8可知:设备更新机制完善程度的风险值相对较高,且波动较大;相比之下,培训机制完善程度的风险值虽然也受管理投入影响,但波动相对较小;排班制度完善程度的风险值水平相对较低,且整体波动不大。这表明:设备更新机制的完善程度对于机场飞行区运行安全至关重要。

## 5 运行安全韧性提升

基于飞行区运行安全韧性评估结果提出相应的提升策略。通过进行仿真分析,验证策略的可行性和有效性,确保其能够应用于实际中,从而提升飞行区的安全韧性。

1) 人员因素安全韧性提升。在人员因素风险仿真分析中,机组人员的表现是引发风险的关键因素,分析发现,机组未经许可进入跑道的风险值最高,主要原因是管制员因工作繁忙导致管理不足,因此,需要采取策略以降低风险并提升飞行区的安全韧性。在其他条件不变的情况下,提出3种提升策略。策略研究分析见表4,仿真情况如图9所示。

由图9可知:在未采取任何提升策略的情况下,安全韧性的快速下降和随后缓慢且不完全的自我恢复过程,最终恢复到新的稳定状态需要19个月。在仿真初期,仅采取控制流量策略可有效降低运行风险,并减缓安全韧性的下降速度,将恢复时间缩短

表 4 人员因素安全韧性提升策略研究

Table 4 Research on safety resilience enhancement strategies for human factors

策略	效果分析	潜在挑战	限制因素
控制管制空域内流量	减少冲突:通过控制流量,可减少空中交通的密度,降低飞机之间的潜在冲突。 降低管制员工作负荷:较少的飞机数量意味着管制员需要处理的信息量减少,从而降低工作压力,提高工作效率,保证工作质量	航班延误:流量控制可能导致航班延误,影响航空公司和旅客的满意度。 资源利用不足:限制流量可能未能充分利用空域资源,导致经济效益下降	天气条件:恶劣天气可能迫使飞机绕飞,增加管制空域内的流量,难以实施流量控制。 需求波动:旅游高峰期等时段的航班需求增加,限制流量可能不现实
提高安全意识	减少人为错误:提高安全意识可以减少由于人为疏忽或错误导致的事故和事故征候。 增强应急响应:员工对安全风险有更高的警觉性,可以更快地识别和响应潜在的安全隐患	文化阻力:改变员工的安全文化可能遭遇阻力,特别是在长期形成的工作习惯和态度中。 培训效果:安全意识的提升需要有效的培训和教育,但培训效果可能因个体差异而异	资源投入:提高安全意识需要持续的培训和宣传,这可能需要额外的资源和时间。 度量难度:安全意识的提升难以量化,评估其效果和影响可能具有挑战性
增加管理投入	改善决策:增加管理投入可以带来更有效的决策支持系统,提高管理效率和质量。 优化资源配置:通过更好的资源规划和管理,可以更合理地分配人力和物资资源,提高整体运营效率	成本增加:增加管理投入通常意味着更高的成本,包括人力资源、技术系统和培训费用。 变革管理:实施新的管理策略可能需要改变现有的组织结构和流程,这可能面临员工的抵触	组织文化:组织文化和管理层的支持程度会影响管理投入的效果和可持续性。 技术限制:先进的管理系统可能需要依赖特定的技术,而这些技术的引入和维护可能存在限制

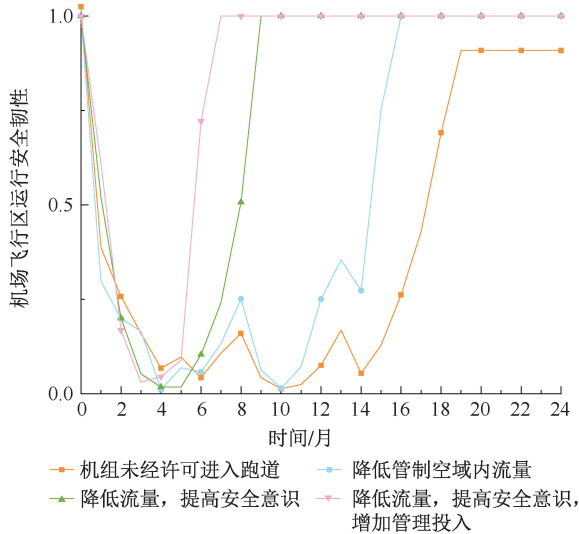


图 9 机场飞行区运行安全韧性人员因素

Fig. 9 Diagram of human factors in airport flight area operational safety resilience

3 个月。然而,随着时间的推移,由于人员安全意识等内部因素的变化,这一策略的长期效果并不明显。在采取控制流量的基础上进一步提升安全意识策略,不仅遏制了风险的增长,还显著加快了安全韧性的恢复速度,将恢复时间缩短 10 个月。增加管理投入后的全面策略结合了控制流量、提高安全意识和增加管理投入,不仅将安全韧性水平提升 9.11%,还将恢复至最高韧性所需的时间减少 12 个月。

2) 环境与设备因素安全韧性提升。在环境与设备因素中,针对设备更新机制完善程度问题,在其他条件不变的情况下,提出 3 种提升策略。策略研究分析见表 5,仿真情况如图 10 所示。

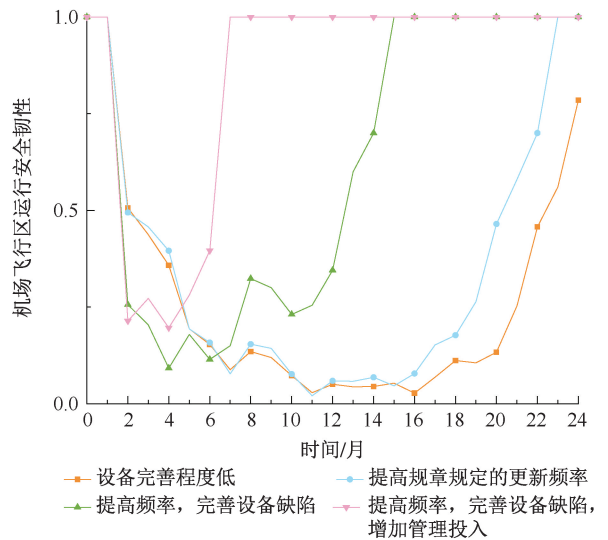


图 10 机场飞行区运行安全韧性环境与设备因素示意图

Fig. 10 Diagram of environmental and equipment factors in airport flight area operational safety resilience

由图 10 可知:在未采取任何提升策略的情况下,系统安全韧性水平迅速下降,恢复速度缓慢,且在整个仿真周期内未能恢复到稳定状态。仅提高规章规定的更新频率的策略在仿真初期有效降低运行

表5 环境与设备因素安全韧性提升策略研究

Table 5 Research on safety resilience enhancement strategies for environmental and equipment factors

策略	效果分析	潜在挑战	限制因素
提高规章规定的更新频率	及时适应变化:通过提高规章更新频率,可以更快地适应新的安全要求和技术进步,提高飞行区的运行安全。 减少违规操作:更新的规章能够减少因不了解最新规定而产生的操作失误	实施难度:频繁的规章更新可能导致员工难以及时掌握和适应,增加了培训和管理难度。 资源消耗:频繁更新规章需要更多的资源来支持培训和文档更新	员工接受度:员工可能对频繁变化的规章感到不满,影响其执行的积极性。 成本效益比:需要评估更新频率提高带来的安全效益是否超过其成本
完善设备缺陷	降低故障率:通过及时发现和修复设备缺陷,可以显著降低设备故障率,提高运行的可靠性。 增强安全保障:设备缺陷的减少直接提高飞行区的安全性	检测难度:一些设备缺陷可能难以在早期被检测到,需要高级的检测技术和设备。 成本问题:完善设备可能需要大量的资金投入,尤其是在更新换代时	技术限制:现有技术可能无法完全检测或修复某些复杂的设备缺陷。 维护周期:设备的维护周期可能限制缺陷发现和修复的及时性
增加管理投入	提高管理效率:增加管理投入可能引入更先进的管理工具和技术,提高管理效率和决策质量。 优化资源配置:通过更好的管理,可以更合理地分配资源,提高资源利用率	成本增加:增加管理投入通常意味着更高的成本,这可能会对预算造成压力。 变革阻力:改变现有的管理结构和流程可能会遇到员工的抵触	组织文化:组织的文化和态度可能会影响管理投入的效果,特别是在抵抗变革的文化中。 技术适应性:新引入的管理技术和工具需要时间让工作人员适应,这可能会影响短期内的工作效率

风险并减缓安全韧性的下降速度,但随着时间的推移,设备缺陷问题使得这一策略的效果逐渐减弱,导致风险值再次上升。进一步采取完善设备缺陷的措施显著降低运行风险,并将恢复时间缩短 8 个月。增加管理投入后的全面策略不仅提升 21.49% 的安全韧性水平,还将恢复至最高韧性所需的时间减少 16 个月。

通过对比未采取策略与采取全面策略的情况,明显看出,综合提升策略在提升机场飞行区运行安全韧性方面的效果显著,确保系统安全韧性能够快速恢复,保证工作质量,减少损失。

## 6 结 论

1) 飞行区运行安全韧性评估模型综合了人员、设备、环境和管理等多个维度,采用 SD 全面分析和量化了飞行区运行中的风险因素。模型的有效性通

过敏感性分析和案例研究得到验证。

2) 在人员因素中,机组人员的表现对运行安全韧性水平影响最大。对此,通过仿真控制管制空域内的流量、增强安全意识和增加管理投入的策略,飞行区运行安全韧性提升 9.11%;在环境和设备因素以及管理因素中,设备更新机制的完善程度对运行安全韧性水平影响最大。对此,通过仿真加快设备更新频率、改善设备缺陷以及增加管理投入的策略,飞行区运行安全韧性提升 21.49%。上述策略为安全管理提供新的视角和方法。

3) 未来的研究应验证这些策略在实际机场环境中的有效性和可行性,并探索不同策略组合的潜在效益。同时,研究应考虑如何将安全韧性评估模型与其他机场管理系统整合,以实现更全面的运行管理。此外,研究新兴技术如无人机和自动化系统对飞行区安全韧性的影响也是未来研究的关键方向。

## 参 考 文 献

[1] HOLLING S C. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.

[2] MURRAY-TUITE P M. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions[C]. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, 2006: 1 398-1 405.

[3] YANG Zhuyu, BARROCA B, WEPPE A, et al. Indicator-based resilience assessment for critical infrastructures: a review[J]. Safety Science, 2023, 160: DOI:10.1016/j.ssci.2022.106049.

[4] 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.

- [5] 唐少虎,朱伟,程光,等. 暴雨内涝下城市道路交通系统安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 2022,32(7): 143-150.  
TANG Shaohu, ZHU Wei, CHENG Guang, et al. Safety resilience assessment of urban road traffic system under rainstorm waterlogging[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(7): 143-150.
- [6] 任婕,颜文涛,李子豪,等. 城市网络韧性的理论缘起、概念辨析与分析框架[J/OL]. 国际城市规划: 1-14[2024-07-24]. <https://doi.org/10.19830/j.upi.2024.075>.  
REN Jie, YAN Wentao, LI Zihao, et al. Urban network resilience: theoretical origins, concept discrimination, analytical framework[J/OL]. Urban Planning International: 1-14[2024-07-24]. <https://doi.org/10.19830/j.upi.2024.075>.
- [7] 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.
- [8] TANG Junqing, HEINIMANN H R. A resilience-oriented approach for quantitatively assessing recurrent spatial-temporal congestion on urban roads[J]. PLoS One, 2018, 13(1): DOI:10.1371/journal.pone.0190616.
- [9] TANG Junqing, HEINIMANN H R, HAN Ke. A Bayesian network approach for assessing the general resilience of road transportation systems: a systems perspective[C]. 19<sup>th</sup> COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP), 2019: 4 481-4 492.
- [10] 王兴隆,赵俊妮,贺敏. 基于贝叶斯网络的空中交通运输系统韧性评价[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6):1 121-1 130.  
WANG Xinglong, ZHAO Junni, HE Min. Resilience evaluation on air transportation system based on Bayesian network [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 1 121-1 130.
- [11] 王兴隆,潘维煌,赵末. 航空相依网络的鲁棒性与拥堵性分析[J]. 中国安全科学学报, 2018,28(2):110-115.  
WANG Xinglong, PAN Weihuang, ZHAO Mo. Analysis of both robustness and congestion of aeronautical interdependent network[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2): 110-115.
- [12] STERMAN J D. Using computer simulation to teach economics: the case of PEOPLEXPRESS[C]. National Educational Computing Conference 1989, 1989: 290-299.
- [13] LYNEIS J M. System dynamics for market forecasting and structural analysis[J]. System Dynamics Review, 2000, 16(1): 3-25.
- [14] MILLER B, CLARKE J P. The hidden value of air transportation infrastructure[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2004, 74(1): 18-35.
- [15] STOJKOVIĆ M, MARJANOVIĆ D, RAKIĆ D, et al. Assessment of water resources system resilience under hazardous events using system dynamic approach and artificial neural networks[J]. Journal of Hydroinformatics, 2023, 25(2): 208-225.
- [16] WANG Xinfeng, WANG Tao, ZHOU Xin, et al. Research on strategic risk identification method of equipment system development based on system dynamics [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2023, 34 ( 5 ): 1 225-1 234.
- [17] 顾兆军,姚峰,张一诺,等. 基于系统动力学的民航 CPS 网络风险评估[J]. 系统工程学报, 2023,38(2):245-253.  
GU Zhaojun, YAO Feng, ZHANG Yinuo, et al. Cyber risk assessment of civil aviation cyber-physical system based on system dynamics[J]. Journal of Systems Engineering, 2023, 38(2): 245-253.
- [18] 沈静瑶,曾小舟,邬国祥. 中国民航客运市场需求预测的系统动力学模型研究[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(4):57-66.  
SHEN Jingyao, ZENG Xiaozhou, WU Guoxiang. Research on dynamics model of China's civil aviation passenger transport market demand forecast[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(4): 57-66.
- [19] 曹允春,赵柯焱. 完善我国国际航空货运系统的仿真研究:基于供应链韧性视角下的分析[J]. 价格理论与实践, 2022(7):143-147.  
CAO Yunchun, ZHAO Keyan. Simulation research on improving China's international air cargo system-analysis from the perspective of supply chain resilience[J]. Price: Theory & Practice, 2022(7): 143-147.
- [20] 曹允春,刘朝颖. 成都跨境航空物流通道优化研究:基于系统动力学视角[J]. 物流科技, 2024,47(3):35-37,41.  
CAO Yunchun, LIU Zhaoying. Research on optimization of Chengdu's cross-border air logistics channel-from the perspective of system dynamics[J]. Logistics Sci-Tech, 2024, 47(3): 35-37,41.

作者简介: 王兴隆 (1979—),男,黑龙江北安人,硕士,研究员,主要从事复杂网络、安全韧性、民航飞联网等方面的研究。E-mail:xinglong1979@163.com。