

# 基于 DEMATEL 方法的机场飞行区运行安全研究及应用

李虹玮

北京首都国际机场股份有限公司, 北京 100621

**[摘要]** 飞行区作为机场运行的核心区域, 面临诸多安全风险, 其因素类型多样、关系复杂、不易量化。本篇文章依据“人-机-环-管”理论, 选取 20 个运行安全风险因素, 采用 DEMATEL 方法定量化构建了飞行区运行安全风险评价模型。根据某机场飞行区的实际应用, 明确不同风险因素的影响程度, 结果显示评价结果与该机场实际情况基本一致, 表明该模型的适用性, 根据结论为该机场运行安全管理提出建议。

**[关键词]** 机场飞行区; 安全风险; 风险量化

DOI: 10.33142/aem.v6i11.14604

中图分类号: N945.12

文献标识码: A

## Research and Application of Airport Airfield Operation Safety Based on DEMATEL Method

LI Hongwei

Beijing Capital International Airport Co., Ltd., Beijing, 100621, China

**Abstract:** As the core area of airport operations, the airfield faces many safety risks, with diverse types of factors, complex relationships, and difficult quantification. This article selects 20 operational safety risk factors based on the "human machine environment management" theory and uses the DEMATEL method to quantitatively construct an operational safety risk assessment model for the flight zone. Based on the actual application of a certain airport's flight area, the impact degree of different risk factors is clarified. The results show that the evaluation results are basically consistent with the actual situation of the airport, indicating the applicability of the model. Based on the conclusion, suggestions are proposed for the safe management of the airport's operation.

**Keywords:** airport airfield; safety risks; risk quantification

### 引言

国际民航组织一直将安全风险量化评估作为提升机场安全管理水平的重点课题。《民用机场飞行区技术标准》(MH 5001-2021)中规定, 机场飞行区是供飞机起飞、着陆、滑行和停放使用的场地, 是机场运行的重要区域, 面临的风险类型多样、关系复杂不易量化, 造成的后果危害性较大、损失较多。为保障机场飞行区安全运行, 需要从管理角度量化处理运行安全风险, 对机场安全运行、服务提升和民航事业安全、高质量发展有重要意义。

### 1 DEMATEL-ISM 方法

#### 1.1 DEMATEL 方法基本概念

将影响因素专业系统分析的方法称作决策测试分析 (DEMATEL)。DEMATEL 方法运用数学领域中的矩阵理论, 对每一种因素对其他因素的影响程度进行分析, 在此基础上获得不同因素对其他因素的中心性、原因程度。在机场飞行区运行安全研究中运用 DEMATEL 方法, 能够确定对机场飞行区安全影响的因素, 有助于对影响因素彼此间的关系进行定量分析。

#### 1.2 ISM 方法基本概念

解释结构模型法 (ISM) 将复杂系统分解成  $n$  个子系统要素, 以实践经验为依据, 在计算机的支持下, 将复杂系统分解成多层次的结构模型。ISM 方法通常被应用于处理

影响因素多、相互作用关系复杂的问题。在对影响因素进行分层处理的同时, ISM 方法还能够表征影响因素间的作用路径。

## 2 机场飞行区运行安全影响因素

### 2.1 影响因素识别原则

(1) 全面性原则。研究中选取影响因素时, 并不存在特定的标准, 相应的选择范围处于不确定状态。为最大限度上选择具有代表性的影响因素, 应当从全面性角度出发对影响因素进行筛选。

(2) 科学性原则。机场飞行区运行安全影响因素选取应当以科学性原则为指导, 以此确保影响因素客观、实际。

(3) 系统性原则。机场飞行区运行安全影响因素构成内容多样, 因此应当从系统性角度出发对影响因素子部分进行分析, 在此基础上逐渐形成具有完整性的影响因素系统。

(4) 层次性原则。对影响因素进行识别过程中应当遵循层次性原则, 在此基础上清晰划分影响因素的层次, 消除兼容性。

### 2.2 影响因素识别常用方法

对影响因素进行识别的常用方法包括案例分析法、德尔菲法、头脑风暴法、文献分析法、情景分析法。表 1 对比了常用影响因素识别方法。

表 1 影响因素识别常用方法对比

方法	特点	不足	适用范围
案例分析法	收集案例,提取并归类因素	案例收集难度大	成熟案例丰富项目
德尔菲法	匿名征询专家意见并进行打分确立因素	专家资质、水平要求高	因素较为明确项目
头脑风暴法	集体讨论确立因素	意见不全面,逻辑不严谨	影响力较大项目
文献分析法	依据相关性收集文献,提取因素	工作量大	因素多且繁复项目
情景分析法	模拟情景,预测因素	实际操作不方便	持续时间较长项目

分析表 1 可发现,不同的影响因素识别方法均拥有各自的特点与不足,在研究过程中应当从实际情况出发,选择相应的识别方法,为研究活动顺利开展提供支持。本文采用文献分析法和案例分析法。

## 2 机场飞行区运行安全风险量化体系设计

在文献调查及实地调研的基础上,分析机场飞行区工作内容和安全特征,是确定机场飞行区运行安全风险的维度与因素的首要工作<sup>[1]</sup>。本文从人员风险、管理风险、环境风险、机械设备风险 4 个维度将飞行区运行安全风险因素划分为 20 项,构建出具有等级差异性的飞行区运行安全风险因素体系,表 2 所示为机场飞行区运行安全风险因素体系。

表 2 机场飞行区运行安全风险因素体系

一级指标	二级指标
人员风险因素 C <sub>1</sub>	安全意识 X <sub>1</sub>
	人员身心健康 X <sub>2</sub>
	工作差错 X <sub>3</sub>
	技能水平 X <sub>4</sub>
	疲劳程度 X <sub>5</sub>
管理风险因素 C <sub>2</sub>	安全培训 X <sub>6</sub>
	安全规章制度 X <sub>7</sub>
	安全规章制度 X <sub>8</sub>
	安全管控手段 X <sub>9</sub>
	风险预防措施 X <sub>10</sub>
	监督与绩效评价机制 X <sub>11</sub>
环境风险因素 C <sub>3</sub>	航空器运行流量 X <sub>12</sub>
	道面条件 X <sub>13</sub>
	应急事件 X <sub>14</sub>
	净空条件 X <sub>15</sub>
	鸟防条件 X <sub>16</sub>
	恶劣天气 X <sub>17</sub>
机械设备风险因素 C <sub>4</sub>	保障车辆可靠性 X <sub>18</sub>
	助航设备可靠性 X <sub>19</sub>
X	其他设备可靠性 X <sub>20</sub>

由表 1 可见,人员风险、管理风险、环境风险、机械设备风险 4 个一级指标蕴含的风险因素内容较多,基本涵

盖了机场飞行区运行涉及的风险点。

## 3 飞行区安全风险因素影响程度分析

### 3.1 DEMATEL 分析

DEMATEL 分析能有效梳理复杂系统因素相互关系的逻辑,通过模型解构复杂系统中存在的各项因素,构建多级递阶层次拓扑图,实现风险因素的量化处理。DEMATEL 搭配使用决策实验室分析法,能够较为清晰直观地表明不同影响因素之间的逻辑层次关系,进而识别量化系统中的关系要素和各要素的影响程度,还能通过关系图的导入明确不同风险因素之间的深层次影响,进而从管理层面为后续的安全风险评估、事故预防及控制提供参考,具体步骤包括:

(1) 结合实际工作情况和权重确定的方式,比较不同因素之间的影响程度,确定因素之间的影响成效。按照无影响、弱影响、中等影响、较大影响、强影响五个等级对不同风险因素进行赋值,可得到 A 矩阵如(1)式所示:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & 0 & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

对上式做最大值法的归一化处理后可以对矩阵 A 的规范影响矩阵 B 做规定,见下式:

$$B = \frac{x_{ij}}{\max(\sum_{j=1}^n x_{ij})} \quad (1)$$

式中:  $x_{ij}$  表示为因素 i 对 j 的影响程度,进而建立综合影响矩阵 T 如(2)式所示:

$$T = \lim (B + B^2 + \dots + B^k) = B (I - B)^{-1} = (t_{ij})_{n \times n} \quad (2)$$

式中: I 表示为单位矩阵,  $t_{ij}$  表示为 n 阶矩阵 T 的元素。

上述矩阵搭建完毕后,可以对不同影响因素做集中计算,包括计算影响度、被影响度、中心度和原因度,重复上述步骤直至所有元素计算完毕。在计算的基础上绘制阶梯层次结构图,建立风险因素解析结构模型,能够实现因素的量化分析。

### 3.2 DEMATEL 量化模型权重结果及分析

结合文献资料、工作体验和实地访谈可知,对其他因素具有综合影响的风险因素包括安全意识、恶劣天气、航空器运行流量、安全规章制度等,具有显著的延伸性特征,当这一因素的确定值不断上涨时,能够显著影响其他因素的指数变化<sup>[2]</sup>。按照上述公式结合 DEMATEL 模型综合处理各影响因素后,可得到如表 2 数据内容。其中,数据的中心度集中反映为风险因素在飞行区中的权重,权重从小到大前五项排序依次为:保障车辆可靠性、航空器运行流量、恶劣天气、应急事件、监督与评价机制,管理人员需要注重对上述因素的集中处理。表 3 所示为机场飞行区 DEMATEL 分析结果。

**表 3 机场飞行区 DEMATEL 分析结果**

因素	影响度	被影响	中心度	原因度
安全意识 $X_1$	1.367	0.241	1.251	0.789
人员身心健康 $X_2$	0.562	0.854	1.254	0.650
工作差错 $X_3$	0.611	0.700	1.301	0.023
技能水平 $X_4$	0.786	0.000	3.667	0.839
疲劳程度 $X_5$	0.652	2.635	1.730	1.041
安全培训 $X_6$	0.576	2.254	1.214	-0.294
现场指挥协调 $X_7$	0.351	1.257	2.147	-0.100
安全规章制度 $X_8$	1.735	0.442	1.113	-1.192
安全管控手段 $X_9$	1.552	0.125	1.274	1.730
风险预防措施 $X_{10}$	0.635	0.763	1.053	0.658
监督与绩效评价机制 $X_{11}$	0.933	0.362	0.551	-0.264
航空器运行流量 $X_{12}$	1.025	0.233	0.211	-0.100
道面条件 $X_{13}$	0.451	0.346	0.851	1.912
应急事件 $X_{14}$	1.233	0.852	0.217	0.751
净空条件 $X_{15}$	1.008	0.774	1.175	-0.247
鸟防条件 $X_{16}$	0.601	0.638	0.798	0.214
恶劣天气 $X_{17}$	1.025	0.351	0.214	-0.055
保障车辆可靠性 $X_{18}$	1.058	0.649	0.023	0.012
助航设备可靠性 $X_{19}$	0.261	0.684	1.250	-0.085
其他设备可靠性 $X_{20}$	0.093	0.664	1.740	-0.031

### 3 DEMATEL 方法的机场飞行区运行安全应用——以 A 机场为例

#### 3.1 项目概况

A 机场为 4F 级民用机场,承担客货运航班保障业务。本次研究中将 A 机场飞行区划分为 3 个区域,分别记为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ ,将实际测量数据作为样本,在此基础上对飞行区安全风险进行分析。

#### 3.2 实测值

以机场飞行区可拓性为依据,结合《民用机场飞行区技术标准》(MH 5001-2021),按照由高至低的顺序将机场

飞行区划分为 5 个安全等级,依次记作 I、II、III、IV、V,安全经典域相关信息通过专家咨询法获得。表 4 所示为 A 机场飞行区实测值与安全等级经典域范围。

#### 3.3 内部影响因素

通过(1)式构建影响矩阵,使用语义变量标度法,影响程度由弱到强依次表示为 0、1、2、3、4,按照影响度、被影响度、中心度、原因度对内部影响因素进行分析,分析结果为 DEMATEL 结果。A 机场飞行区 DEMATEL 结果如表 5 所示。

**表 5 A 机场飞行区 DEMATEL 结果**

指标	影响度	被影响度	中心度	原因度
$X_1$	1.255	0.001	1.256	1.254
$X_2$	0.778	0.113	0.891	0.665
$X_3$	0.661	0.155	0.816	0.506
$X_4$	0.443	0.198	0.641	0.245
$X_5$	0.081	0.711	0.792	-0.630
$X_6$	0.368	0.278	0.646	0.090
$X_7$	0.157	0.531	0.688	-0.374
$X_8$	0.077	0.423	0.5	-0.346
$X_9$	0.284	0.587	0.871	-0.303
$X_{10}$	0.042	0.413	0.455	-0.371
$X_{11}$	0.001	0.462	0.463	-0.461
$X_{12}$	0.001	0.457	0.458	-0.456
$X_{13}$	0.081	0.421	0.502	-0.34
$X_{14}$	0.078	1.055	1.133	-0.977
$X_{15}$	0.054	0.867	0.921	-0.813
$X_{16}$	0.406	0.001	0.407	0.405
$X_{17}$	1.171	0.001	1.172	1.17
$X_{18}$	0.377	0.092	0.469	0.285
$X_{19}$	0.532	0.234	0.766	0.298
$X_{20}$	0.432	0.273	0.705	0.159

**表 4 A 机场飞行区实测值与安全等级经典域范围**

指标	飞行区实测值			安全等级经典区域				
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	I	II	III	IV	V
$X_1$	1801	1751	2002	(2501, 4001]	(1501, 2501]	(1002, 1501]	(801, 1001]	[600, 800]
$X_2$	2.7	3.6	4.3	[48, 61]	(36, 47]	(13, 35]	(7, 13]	[4, 5, 8]
$X_3$	31	22	41	(86, 101]	(71, 84]	(56, 71]	(41, 54]	[0, 103]
$X_4$	81	74	91	(252, 301]	(211, 252]	(182, 211]	(132, 182]	[0, 41]
$X_5$	222	186	217	(86, 101]	(72, 86]	(56, 71]	(42, 56]	[0, 41]
$X_6$	87	87	93	(86, 101]	(72, 86]	(56, 71]	(42, 56]	[0, 41]
$X_7$	85	68	78	(86, 101]	(72, 86]	(56, 71]	(42, 56]	[0, 41]
$X_8$	88	72	83	(86, 101]	(72, 86]	(56, 71]	(42, 56]	[0, 41]
$X_9$	91	68	85	(86, 101]	(72, 86]	(56, 71]	(42, 56]	[0, 41]
$X_{10}$	75	82	85	(71, 86]	(54, 71]	(41, 56]	(0, 41]	[0, 103]
$X_{11}$	78	64	77	(86, 101]	(71, 86]	(56, 71]41, 56	(103, 111]	[111, 122]

通过对表 4 中数据进行分析发现,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_6$ 、 $X_{16}$ 、 $X_{17}$ 、 $X_{18}$ 、 $X_{19}$ 、 $X_{20}$  作为原因因素对其他因素产生影响,  $X_1$ 、 $X_{14}$ 、 $X_{17}$ 、在中心度排名中位列前 3 名, 在 A 机场飞行区安全中具有主导作用, 是影响飞行区安全的关键因素, 值得高度重视。

本次研究中运用 ISM 制作多级层次结构图将内部因素彼此间的关系清晰展现出来, 整体影响矩阵计算如(3)式所示, 矩阵中元素计算如(4)式所示:

$$Z = T + I \quad (3)$$

$$h_{ij} = \begin{cases} 1, z_{ij} > \lambda \\ 0, z_{ij} < \lambda \end{cases}, ij = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中:  $z$ -整体影响矩阵;  $T$ -综合影响矩阵;  $h_{ij}$ -矩阵中元素。

对阈值  $\lambda$  进行赋值, 依次赋值为 0.07、0.08、0.09、0.10、0.11、0.12。将  $X_1$ - $X_{20}$  共划分为 4 个等级, 即根本因素、中间因素、直接因素, 分别记作  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  与  $C_4$ , 中间因素为影响 A 机场飞行区安全的间接因素, 在结构模型当中起到过度作用。越靠近底层的因素, 其根本性作用越强。图 1 所示为 A 机场飞行区 ISM 结构模型。

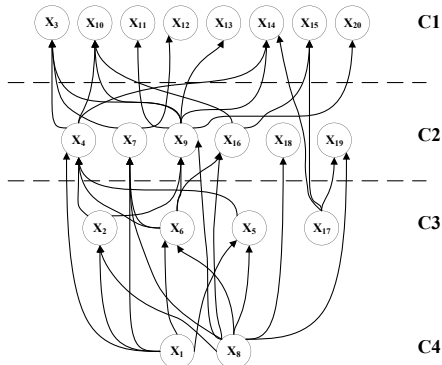


图 1 A 机场飞行区 ISM 结构模型

### 3.4 关联度

对  $X_1$ - $X_{20}$  的等级关联度进行计算, 如(5)式、(6)式、(7)式所示:

$$K_j(V_j) = \begin{cases} \frac{-D(v_n, V_{jn})}{|V_{in}|} \\ \frac{D(v_n, V_{jn})}{D(v, V_{pm}) - D(v_n, V_{jn})} \end{cases} \quad (5)$$

$$D(v_n, V_{jn}) = \left| v_n - \frac{a_{jn} + b_{jn}}{2} \right| - \frac{(b_{jn} - a_{jn})}{2} \quad (6)$$

式中:  $D(v, V_{pm})$ 、 $D(v_n, V_{jn})$ -实测值  $n$  至经典域各级的距离。

将某区域  $X_n$  指标代入式中, 可计算得到关联度, 以最大关联度原则为依据, 可明确  $X_n$  对应的安全水平等级。

### 3.5 结果分析

将  $X_1$ - $X_{20}$  的代入(6)式中, 计算得到安全等级  $V$ , 通过对图 1 进行分析发现,  $X_3$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{13}$ 、 $X_{14}$ 、 $X_{15}$ 、

$X_{20}$  的安全性一般,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_8$ 、 $X_{17}$  是影响 A 机场飞行区安全的关键因素, 其中  $X_1$  和  $X_8$  为根本因素, 对 A 机场整个飞行区的安全产生决定性影响, A 机场飞行区不同区域安全等级不同, 相应的关联度存在一定差异。因此, 针对该机场提出如下建议:(1) 提升员工安全意识。从管理层面入手, 营造良好的飞行区安全文化和安全氛围, 做好各级员工思想教育, 采用多手段、多途径加强安全理论与实操教育培训, 固化员工安全思维。通过飞行区日常工作的“以练代战”, 将安全意识转变为优良的技能水平, 将管理理念转变为实际行动, 从个人角度提升飞行区安全管理水平。(2) 持续完善安全规章制度。安全规章制度对安全工作的开展具有指导性, 做好安全管理工作首先要有完善的安全规章制度, 根据飞行区运行的实际情况和管理需求, 持续做好标准制度对标管理和优化, 促使飞行区现场与规章制度文文相符、文实相符, 为提供安全可靠的运行环境做好支持。

## 4 结论

(1) 立足于机场飞行区实际情况对安全风险因素做量化处理, 利用构建 DEMATEL 评价模型的方式划分风险因素与风险指标。随后分析飞行区面临的主要风险因素并分析因素的内涵特征, 搭建一套安全风险量化评估体系。(2) 阐述了飞行区内部风险因素的影响关系和关联性。利用 DEMATEL 方法对 20 个主要安全风险指标做量化处理, 分析不同指标间存在的相互影响, 计算各风险指标的风险等级评估飞行区的安全风险。(3) 对 A 机场飞行区的安全风险进行分析, 基于 DEMATEL 和 ISM 方法量化各风险因素, 确定了该机场飞行区的风险等级以及关键风险因素, 与该机场面临的情况基本一致。同时, 从提升员工安全意识、持续完善安全规章制度两方面提出安全建议。

### [参考文献]

[1]潘丹, 罗帆, 李永周, 等. 基于 DW-MEE 的不停航施工情境下机场安全风险预警[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(4): 780-791.  
 [2]郭雷, 程仁双. 机场场道工程对飞行安全的影响分析及风险控制策略研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(31): 46-48.  
 [3]栾沛然, 阳杰, 赵凡, 等. 基于 SMS 和双重预防机制的机场集团安全治理体系研究[J]. 交通工程, 2024, 24(6): 60-67.  
 [4]杨晓勇, 刘尚豫, 张辉, 等. 基于 Logistic 回归的民航 ASIS 风险辨识仿真[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 63-67.  
 [5]潘丹, 罗帆, 李永周, 等. 基于动态权和物元可拓的不停航施工情境下机场安全风险预警[J]. 北京航空航天大学学报, 2024(11): 1-14.  
 作者简介: 李虹玮(1995.11-), 男, 中国矿业大学(北京), 安全科学与工程, 北京首都国际机场股份有限公司, 助理工程师。