

文章编号: 1009-6094(2020)06-2091-07

## 航空公司安全风险因素分析的 DEMATEL - ISM 模型研究

岳仁田 韩亚雄

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300)

**摘要:** 为提高航空公司安全管理水平, 利用集成决策实验室分析( DEMATEL) 和解释结构模型( ISM) 方法, 分析航空公司安全风险, 识别航空公司运行中潜在的风险因素, 建立系统因素分析的 DEMATEL - ISM 模型; 采用 DEMATEL 方法计算各因素的影响度、被影响度、中心度和原因度, 确定因素的因果属性, 找出系统中的关键因素; 利用 ISM 方法划分系统层次结构, 建立系统因素的多级递阶层次结构模型; 以国内某航空公司为例, 验证 DEMATEL - ISM 模型的有效性。结果表明, 利用该模型可确定系统中的 5 个关键原因因素和 5 个关键结果因素, 递阶层次结构可将系统因素分为 3 个类别, 即直接因素、间接因素和根本因素。模型分析结果与航空公司运行实际情况一致, 可为航空公司安全风险决策提供理论支持。

**关键词:** 安全管理工程; 航空公司安全; 决策实验室分析( DEMATEL); 解释结构模型( ISM); 递阶层次结构模型

中图分类号: X949 文献标志码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.0799

### 0 引言

民航作为一个高投入、高风险、技术密集型的行业, 安全是其赖以生存及可持续发展的基础。航空公司处于民航安全管理工作的前端, 其安全运行状况不仅关系民航旅客人身安全、影响航空公司生存发展, 也决定着航空公司以至民航安全管理的可持续发展。安全风险作为航空公司安全管理系统的核心, 包括风险识别、风险评估及风险控制 3 个阶段<sup>[1]</sup>。因此, 识别航空公司运行中的潜在风险, 探究风险因素之间的作用、耦合关系, 分析安全风险传递规律, 对于加强航空公司运行安全管理具有重要意义。

目前航空公司安全管理方面的研究较少, 国外

学者 Edkins<sup>[2]</sup> 提出了一项新的主动航空公司安全计划, 通过在澳大利亚一家主要的地区航空公司实施该计划, 证明了该计划可以对航空公司的安全绩效产生积极影响。Liou 等<sup>[3]</sup> 为了定量评估航空公司安全性, 提出了一个用于解决因素之间依赖关系的混合多准则决策模型, 利用 DEMATEL 和 ANP 方法确定因素的相对权重, 以此来显示因素之间的相互依赖和反馈关系。Barak 等<sup>[4]</sup> 提出了一种基于模糊 DEA 和模糊 MADM 的新混合方法对航空公司的安全性进行排序, 结果表明, 这种新的混合方法可以有效克服传统混合 DEA - MADM 模型的缺陷。国内的研究侧重于航空公司安全风险评价。2007 年, 丁松滨等<sup>[5]</sup> 创新性地引入证据理论, 来解决航空公司安全系统风险评价中遇到的不确定性问题, 建立了基于证据理论的航空公司安全系统风险评价模型及算法。文军<sup>[6]</sup> 引入模糊理论, 建立了基于模糊综合评价方法的航空公司安全风险评价模型。文兴忠<sup>[7]</sup> 在模糊综合评价中采用熵权和层次分析法确定指标权重, 建立了航空公司安全风险评价模型。金灿灿等<sup>[8]</sup> 利用模糊综合评价方法量化定性指标, 运用贝叶斯置信网络方法对航空公司安全风险进行了综合评估。唐卫贞<sup>[9]</sup> 考虑航空公司安全风险评价的物元可拓性, 构建了风险评价的多级物元模型。2018 年, 赵焱飞等<sup>[10]</sup> 在确定航空公司风险评价指标体系的基础上, 采用熵权法和超标倍数法综合的赋权法计算各风险指标的权重, 并考虑各风险指标在评估中的不确定性, 首次引入集对分析理论, 建立了基于集对分析的航空公司安全风险评价模型及算法。综上, 现有航空公司安全风险研究侧重于安全风险评价, 通过应用新方法建立相应风险评估模型来分析航空公司安全状况; 而较少以系统的视角来确定系统中的关键因素, 并对系统风险因素的层次性及各层次因素间的结构关联性进行探究。

鉴于此, 本文在航空公司安全风险因素指标体系的基础上, 利用集成决策实验室分析( Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL) 和解释结构模型( Interpretative Structural Modeling, ISM) 方法, 建立航空公司安全风险因素分析模型。利用该模型可以定量研究系统因素的层次结构关联性, 实现航空公司安全风险因素分析, 从而为航空公司安全管理提供思路及理论指导。

### 1 航空公司安全风险因素确定

分析航空公司安全风险因素的层次结构是一项

2091

\* 收稿日期: 2019-06-12

作者简介: 岳仁田, 副研究员, 博士, 从事空中交通规划与管理研究, rtyue@cauc.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金民航联合研究项目( U1533112); 国家自然科学基金面上项目( 61571441); 科技部国家重点研发计划基金项目( 2016YFB0502405)

复杂的系统工程,首先需要有效识别系统中的风险因素,建立科学合理的航空公司安全风险因素指标体系。为客观地反映航空公司安全风险内涵及风险因素间的相互作用关系,指标体系的构建需要遵循系统性、全面性、科学性和可行性等基本原则。在分析 2007—2016 年航空安全报告数据<sup>[11]</sup>的基础上,归纳整合航空公司安全评估及审计相关体系<sup>[12-13]</sup>中的航空公司安全风险相关指标,构建航空公司安全风险因素指标体系,见表 1。

## 2 系统因素分析的 DEMATEL - ISM 模型

### 2.1 基于 DEMATEL 的系统因素分析

DEMATEL 方法是由日内瓦研究中心的 Gabus 和 Fontela 于 20 世纪 70 年代提出的面向复杂系统因素分析的算法<sup>[14]</sup>。航空公司安全风险因素体系作为一个典型的“人-机-环-管”系统,利用 DEMATEL 方法分析航空公司安全风险,确定各因素的因果属性,可以帮助管理者及时发现并控制安全隐患,加强航空公司安全管理。

DEMATEL 方法分析系统风险因素的步骤如下。

1) 确定系统中的风险因素  $x_i \in X (i = 1, 2, \dots, n)$ , 其中  $n$  为风险因素的数目,  $X$  为风险因素的集合。

2) 确定系统直接影响矩阵。为量化各因素之间影响关系强弱,设定因素影响关系评价标度,见表 2。

表 2 影响关系评价标度

Table 2 Evaluation scale of influence relationship

影响关系	无	弱	一般	强
标度	0	1	2	3

表 1 航空公司安全风险因素

Table 1 Risk factors of airline safety

目标层	准则层	指标层		
航空公司安全风险	机组因素	机组违规操作情况 $x_1$	机组资源管理能力不足 $x_2$	机组协调决断失误 $x_3$
		机组配合不力程度 $x_4$	机组人员安全意识淡薄 $x_5$	机长心理素质较差 $x_6$
	飞机因素	空中停车情况 $x_7$	飞机系统运行异常情况 $x_8$	维修程序不规范情况 $x_9$
		飞机维护未达标情况 $x_{10}$		
	环境因素	飞行期间天气恶劣程度 $x_{11}$	航路结构复杂程度 $x_{12}$	空管指挥失效情况 $x_{13}$
		机场危险状况 $x_{14}$	气象预报误报情况 $x_{15}$	
	管理因素	技术培训管理不合格 $x_{16}$	管理标准失察程度 $x_{17}$	机构职责关系不合理 $x_{18}$
		签派决策失误情况 $x_{19}$	应急管理培训实施未达标 $x_{20}$	

以上述因素影响关系评价标度为基础,依据专家经验确定系统的直接影响矩阵  $D$ 。

$$D = \begin{pmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

式中  $d_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; i \neq j)$  表示因素  $x_i$  对因素  $x_j$  的直接影响程度,若  $i = j$ , 则  $d_{ij} = 0$ 。

3) 规范化处理直接影响矩阵  $D$ , 得到规范化直接影响矩阵  $B$ 。

$$B = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n d_{ij}} D \quad (1)$$

式中  $B = (b_{ij})_{n \times n}$ ,  $b_{ij} \in [0, 1]$  且  $\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n b_{ij} = 1$ 。

4) 计算综合影响矩阵  $C (C = (c_{ij})_{n \times n})$ 。综合影响矩阵  $C$  作为直接影响和间接影响的累加,其计算式为

$$C = \lim_{k \rightarrow \infty} (B + B^2 + \dots + B^k) = \lim_{k \rightarrow \infty} B \frac{1 - B^{k+1}}{1 - B} = B (I - B)^{-1} \quad (2)$$

式中  $I$  为单位矩阵。

5) 计算各因素的影响度  $f_i$  与被影响度  $e_i$ 。 $f_i$  为  $C$  中因素  $x_i$  的行和,  $e_i$  为  $C$  中因素  $x_i$  的列和。 $f_i$  和  $e_i$  的计算式为

$$f_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} \quad (3)$$

$$e_i = \sum_{j=1}^n c_{ji} \quad (4)$$

6) 计算各因素的中心度  $m_i$  和原因度  $n_i$ 。  $m_i$  为因素  $x_i$  的  $f_i$  与  $e_i$  之和  $n_i$  为因素  $x_i$  的  $f_i$  与  $e_i$  之差。  $m_i$  和  $n_i$  的计算式为

$$m_i = f_i + e_i \tag{5}$$

$$n_i = f_i - e_i \tag{6}$$

$m_i$  越大, 表示风险因素  $x_i$  的影响重要性程度越高, 反之亦然。  $n_i$  为正值, 表示  $x_i$  易影响其他风险因素, 称  $x_i$  为原因因素;  $n_i$  为负值, 表示  $x_i$  易受其他风险因素影响, 称  $x_i$  为结果因素。

7) 绘制系统因素因果图。在笛卡尔坐标系中, 以  $m_i$  为横坐标、 $n_i$  为纵坐标, 绘制风险因素  $x_i$  的因果图; 分析因果关系图, 确定各因素的因果属性, 找出系统中的关键因素。

### 2.2 集成 DEMATEL/ISM 的系统层次结构划分

ISM 是一种适用于层次结构复杂且影响因素众多系统的分析方法<sup>[15]</sup>。在 2.1 节利用 DEMATEL 方法分析系统风险因素步骤的基础上, 采用 ISM 方法确定航空公司安全风险因素的层次结构。

集成 DEMATEL/ISM 的系统层次结构划分步骤如下。

1) 计算整体影响矩阵  $Z$  ( $Z = (z_{ij})_{n \times n}$ ), 计算式为

$$Z = C + I \tag{7}$$

式中  $I$  为单位矩阵。

2) 设定阈值  $\lambda$  根据整体影响矩阵  $Z$ , 确定可达

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

矩阵  $K$  ( $K = (k_{ij})_{n \times n}$ ) 的元素  $k_{ij}$  为

$$\begin{cases} k_{ij} = 1 & z_{ij} \geq \lambda \\ k_{ij} = 0 & z_{ij} < \lambda \end{cases} \tag{8}$$

3) 确定因素  $x_i$  的可达集  $R_i$  和前项集  $A_i$ , 分别为

$$R_i = \{x_j \mid x_j \in X, k_{ij} \neq 0\} \tag{9}$$

$$A_i = \{x_j \mid x_j \in X, k_{ji} \neq 0\} \tag{10}$$

4) 可达矩阵  $K$  的层次划分。依据公式  $R_i = R_i \cap A_i$  确定系统各层次的因素集  $L_k$ 。

5) 重复步骤 3) 和步骤 4), 确保因素集  $X$  中的因素都被划分到系统各层次的因素集  $L_k$  中。

6) 在系统各层次因素划分的基础上, 在可达矩阵  $K$  中提取骨架矩阵, 绘制系统因素的递阶层次结构图。

## 3 实例分析

### 3.1 模型应用

为验证所建系统因素分析 DEMATEL - ISM 模型的有效性, 以国内某航空公司的运行风险状况为考察对象, 选择航空公司安全运营管理人员及局方有关安全监管人员等 20 人作为专家小组, 以表 2 的影响关系评价标度为依据, 对表 1 的航空公司安全风险因素指标体系中的因素进行两两比较判断。通过汇总、统计各专家的意见, 最终得到系统的直接影响矩阵  $D$  为



若系统层次划分后的要素集为  $X = \{L_1, L_2, L_3, \dots, L_k\}$  根据式(9)和(10)及  $R_i = R_i \cap A_i$  可确定  $k = 4$ , 即将系统因素划分为 4 个层次。系统因素的详细层次划分结果为

$$L_1 = \{x_3, x_4, x_8\}$$

$$L_2 = \{x_1, x_2, x_6, x_7, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{19}\}$$

$$L_3 = \{x_5, x_9, x_{14}, x_{15}, x_{18}, x_{20}\}$$

$$L_4 = \{x_{11}, x_{16}, x_{17}\}$$

在可达矩阵  $K$  的基础上, 提取骨架矩阵, 绘制航空公司安全风险因素的多级递阶层次结构图, 见图 2。

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 系统关键因素分析

因素的中心度越大, 则表示该因素的影响重要性程度越高。由表 3 可知, 航空公司安全风险因素的重要性程度从大到小依次为机组协调决断失误 ( $x_3$ )、飞行期间天气恶劣程度 ( $x_{11}$ )、签派决策失误情况 ( $x_{19}$ )、飞机系统运行异常情况 ( $x_8$ )、机组违规操作情况 ( $x_1$ )、管理标准失察程度 ( $x_{17}$ )、技术培训管理不合格 ( $x_{16}$ )、空中停车情况 ( $x_7$ )、维修程序不规范情况 ( $x_9$ )、空管指挥失效情况 ( $x_{13}$ )、机场危险状况 ( $x_{14}$ )、机组配合不力程度 ( $x_4$ )、机组资源管理能力不足 ( $x_2$ )、机组人员安全意识淡薄 ( $x_5$ )、气象预报误报情况 ( $x_{15}$ )、飞机维护未达标情况 ( $x_{10}$ )、机长心理素质较差 ( $x_6$ )、应急管理培训实施未达标 ( $x_{20}$ )、机构职责关系不合理 ( $x_{18}$ )、航路结构复杂程度 ( $x_{12}$ )。因素的原因度为正, 表示该因素易影响其他因素; 因素的原因度为负, 则表示该因素易受其他因素影响。由图 1 可知,  $x_2, x_5, x_6, x_7, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{20}$  等因素位于坐标系的第一象限, 属于原因因素, 其在整个航空公司安全风险因素体系

中容易影响其他因素;  $x_1, x_3, x_4, x_8, x_9, x_{10}, x_{14}, x_{19}$  等因素位于坐标系的第四象限, 属于结果因素, 这些因素在影响因素体系中易受原因因素及结果因素中其他因素的影响。

综合考察各因素的中心度及原因度的绝对值, 确定系统中的 10 个关键因素, 包括 5 个关键原因因素和 5 个关键结果因素。关键原因因素有飞行期间天气恶劣程度 ( $x_{11}$ )、管理标准失察程度 ( $x_{17}$ )、技术培训管理不合格 ( $x_{16}$ )、空中停车情况 ( $x_7$ )、空管指挥失效情况 ( $x_{13}$ )、关键结果因素有机组协调决断失误 ( $x_3$ )、签派决策失误情况 ( $x_{19}$ )、飞机系统运行异常情况 ( $x_8$ )、机组违规操作情况 ( $x_1$ )、维修程序不规范情况 ( $x_9$ )。

通过专家小组对上述关键因素辨识结果的分析, 该结果较符合航空公司日常运行中面临的实际风险状况。对于关键原因因素来说, 需要航空公司在日常安全管理工作中提高对关键原因因素的重视, 注意切断其在不同因素间影响的传递过程, 以达到控制风险的目的; 对于关键结果因素来说, 需要航空公司管理者在控制原因因素的同时, 注意防止结果风险因素之间的互相干扰而导致风险涌现性增大。

#### 3.2.2 系统因素递阶层次结构分析

由系统安全的事故致因理论, 可将该系统因素的递阶层次结构分为直接因素 ( $L_1$ )、间接因素 ( $L_2$ ) 和根本因素 ( $L_3$  和  $L_4$ )。由图 2 可知, 系统的直接因素包括机组协调决断失误 ( $x_3$ )、机组配合不力程度 ( $x_4$ )、飞机系统运行异常情况 ( $x_8$ ) 等因素, 当系统的风险水平处于较高水平时, 对这些因素进行有效控制, 会有明显的效果。系统中的间接因素包括机组违规操作情况 ( $x_1$ )、机组资源管理能力不足 ( $x_2$ )、机长心理素质较差 ( $x_6$ )、空中停车情况 ( $x_7$ )、飞机维护未达标情况 ( $x_{10}$ )、航路结构复杂程度 ( $x_{12}$ )、空管指挥失效情况 ( $x_{13}$ )、签派决策失误情况 ( $x_{19}$ ) 等因素, 这些因素通过作用上一层因素而间接对系统风险产生影响。影响系统安全风险的根本因素, 即基础性因素, 包括机组人员安全意识淡薄 ( $x_5$ )、维修程序不规范情况 ( $x_9$ )、机场危险状况 ( $x_{14}$ )、气象预报误报情况 ( $x_{15}$ )、机构职责关系不合理 ( $x_{18}$ )、应急管理培训实施未达标 ( $x_{20}$ )、飞行期间天气恶劣程度 ( $x_{11}$ )、技术培训管理不合格 ( $x_{16}$ )、管理标准失察程度 ( $x_{17}$ ) 等因素, 这些因素属于系统中低层次的因素, 对系统

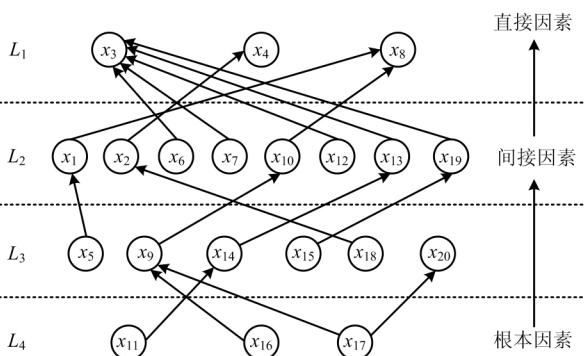


图 2 风险因素递阶层次结构

Fig.2 Hierarchical structure of risk factors

安全风险的影响往往是潜移默化的。

对于直接或间接因素的管控在短时间内可能得到立竿见影的效果,但往往控制的难度较大。因此,航空公司管理者需要在日常安全管理工作中,加强技术培训管理,严守航空安全管理标准,以从根本上消除安全隐患,切断底层因素向更高层风险因素传递作用的路径。在专家对直接、间接和根本因素所含风险因素分析讨论的基础上,得出了该系统因素划分结果与航空公司运行实际情况相符、可为航司相关安全风险决策提供理论支持的结果,进而表明了该集成 DEMATEL/ISM 方法在航空公司或其他复杂安全系统安全风险决策中的有效性和适用性。

#### 4 结 论

1) 针对航空公司安全风险因素辨识问题,建立系统因素分析的 DEMATEL - ISM 模型。模型验证结果表明,递阶层次结构可有效表征航空公司安全风险因素间的内在关联,实现系统风险分析。

2) 相比于单独应用 ISM 方法确定系统层次结构,集成 DEMATEL/ISM 方法可以有效降低可达矩阵计算的复杂度,使可达矩阵计算过程简单化,便于理解。同时,利用该方法分析系统风险,既能确定系统因素的因果属性,又能找出系统中的关键因素。

3) 完整的因果关系不仅要考虑因素的影响关系,也要考虑到因素的权重;因而未来有必要结合网络层次分析法(ANP)构建集成 DEMATEL - ISM - ANP 方法的多级递阶层次网络结构模型,开展航空公司安全或其他存在反馈和依赖关系的复杂系统的分析和决策。

#### References(参考文献):

- [1] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Safety management manual (SMM)* [M]. Chicago: ICAO, 2009.
- [2] EDKINS G D. The INDICATE safety program: evaluation of a method to proactively improve airline safety performance [J]. *Safety Science*, 1998, 30(3): 275 - 295.
- [3] LIU J J H, TZENG G H, CHANG H C. Airline safety measurement using a hybrid model [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2007, 13(4): 243 - 249.
- [4] BARAK S, DAHOEIJ H. A novel hybrid fuzzy DEA-fuzzy MADM method for airlines safety evaluation [J]. *Journal of*

*Air Transport Management*, 2018, 73: 134 - 149.

- [5] DING Songbin(丁松滨), SHI Rong(石荣), SHI Heping(施和平). Airline safety system risk assessment based on evidence theory [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*(交通运输系统工程与信息), 2007, 7(2): 77 - 82.
- [6] WEN Jun(文军). Fuzzy comprehensive evolution of risk in airline safety system [J]. *Journal of Safety Science and Technology*(中国安全生产科学技术), 2010, 6(1): 44 - 48.
- [7] WEN Xingzhong(文兴忠). Airline safety risk assessment based on the entropy weight and fuzzy theory [J]. *Journal of Safety and Environment*(安全与环境学报), 2012, 12(1): 250 - 254.
- [8] JIN Cancan(金灿灿), ZUO Hongfu(左洪福), ZHANG Ying(张莹), et al. Research on risk evaluation for airlines based on BBN [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报), 2013, 34(3): 588 - 596.
- [9] TANG Weizhen(唐卫贞). Comprehensive evaluation for the airline flight safety risk based on the matter-elements model [J]. *Journal of Safety and Environment*(安全与环境学报), 2015, 15(2): 25 - 29.
- [10] ZHAO Yifei(赵巍飞), WAN Junqiang(万俊强). Airline safety risk assessment based on the set pair analysis [J]. *Journal of Safety and Environment*(安全与环境学报), 2018, 18(5): 1711 - 1715.
- [11] Civil Aviation Administration of China(中国民用航空局). *2016 Aviation safety report of CAAC*(2016年中国民航航空安全报告) [R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2017.
- [12] Aviation Safety Office of Civil Aviation Administration of China(中国民用航空局安全办公室). *Aviation safety assessment system of airline*(航空公司安全评估指标体系) [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2000.
- [13] Flight Standards Department of Civil Aviation Administration of China(中国民用航空局飞行标准司). *Security audit system of airline*(航空公司安全审计体系) [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2007.
- [14] SUN Yonghe(孙永河), HAN Wei(韩玮), DUAN Wanchun(段万春). Review on research progress of DEMATEL algorithm for complex systems [J]. *Control and Decision*(控制与决策), 2017, 32(3): 385 - 392.
- [15] ZHOU Dequn(周德群), ZHANG Ling(章玲). Establishing hierarchy structure in complex systems based on the integration of DEMATEL and ISM [J]. *Journal of Management Sciences in China*(管理科学学报), 2008, 11(2): 20 - 26.

## On the DEMATEL – ISM model for analyzing the safety risk-involving factors of the airline companies

YUE Ren-tian , HAN Ya-xiong

( College of Air Traffic Management , Civil Aviation University of China , Tianjin 300300 , China)

**Abstract:** The given paper is aimed at identifying and examining the potential risk factors of the airline company safety by building up an indicating system of the airline safety risk factors involved. And , then , we have built up a DEMATEL – ISM model to improve and heighten the safety management level of the airline through analyzing the airline safety risk factors and the risk factors of the airline safety by integrating the DEMATEL and ISM methods. To achieve the above said purposes , it would be necessary to calculate and determine the direct influential matrix of the system factors and determine the causative attributes of the factors by finding out the key factors in the system of the comprehensive influential matrix by calculating the affecting and affected degrees , the centrality and the influential degree of each factor by using the DEMATEL method. Actually , the overall influential matrix of the system can be calculated and determined based on the comprehensive influence matrix and the reachable matrix by choosing an appropriate threshold. And , finally , the system hierarchical structure can be made to build up a multi-level hierarchical structure model of the risk factors with the ISM method by taking an airline in China as a case study sample to verify the effectiveness and efficiency of the said model. Thus , in accordance with the results of the above calculation , it would be possible to determine the causative attributes of each factor by identifying the key causative factors and key consequential factors in the said model. And , so , the system factors of the hierarchical structure can be divided into 4 layers , whereas the system factors can be divided into 3 categories , namely , the direct factors , the indirect factors and the fundamental factors on account of the accident causative theory of the system security. What is more important , the model analysis results prove to be consistent with the actual operation routine of the airline so as to be able to provide a theoretical support for the airline safety risk management related decisions.

**Key words:** safety control; airline safety; decision making trial and evaluation laboratory ( DEMATEL ); interpretative structural modeling ( ISM ); hierarchical structure model

**CLC number:** X949 **Document code:** A

**Article ID:** 1009-6094( 2020) 06-2091-07

文章编号: 1009-6094( 2020) 06-2097-06

## 注空气采油过程中油田伴生气临界氧体积分数试验研究\*

张成博<sup>1</sup> , 李鹏亮<sup>2</sup> , 栾睿智<sup>1</sup> , 程涛<sup>3</sup> , 扈福堂<sup>3</sup>

( 1 中国石油天然气股份有限公司辽河油田分公司  
钻采工艺研究院 辽宁盘锦 124010;

2 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室 北京 100081;

3 中国石油天然气股份有限公司青海油田分公司  
钻采工艺研究院 甘肃敦煌 736200)

**摘 要:** 在注空气采油过程中 , 井筒内油田伴生气的存在可能导致油井发生爆炸事故。避免此类事故发生的最有效方法是控制注气作业过程中的氧体积分数 , 因此需要对井筒高温高压条件下可燃气体的临界氧体积分数进行研究。本文通过理论分析和试验测试对油田伴生气的临界氧体积分数进行了研究 , 初始温度为 40 ℃ 和 80 ℃ , 初始压力为 1 ~ 15 MPa。结果表明 , 相较于温度 , 压力对临界氧体积分数的影响更为显著 , 临界氧体积分数随初始压力的升高而降低 , 且压力的影响逐渐减弱; 依据试验结果提出了临界氧体积分数的经验计算公式; 结合现场工艺提出了相关监控指标和方法 , 为注空气采油过程的安全防护提供了一定的技术依据。

**关键词:** 安全工程; 注空气采油; 高温高压; 临界氧体积分数

**中图分类号:** X932 **文献标志码:** A

**DOI:** 10. 13637/j. issn. 1009-6094. 2019. 1503

## 0 引言

注空气采油技术是一种重要的油田开采方法 , 它综合了物理降黏、化学降黏及能量补充等机理 , 而且气源广、成本低 , 具有广阔的应用前景。注空气采油技术由来已久 , 早在 1917 年 , Lewis 发现在地层中注入空气之后 , 生产井内的氧气体积分数减少 , 并产生了较多体积分数的二氧化碳 , 由此推测原油与空气在地层中发生了化学反应<sup>[1]</sup>。随后 , 注空气采油技术就在油田中逐渐推广起来。但在注空气驱油过程中 , 在井筒内会形成挥发性轻质烃类气体和空气的混合物 , 当氧气体积分数高于临界氧体积分数且可燃气体体积分数在爆炸极限范围之内时 , 若在井筒内存在能量高于可燃气体最小点火能的点火源 , 则有发生爆炸的危险<sup>[2-4]</sup>。目前 , 注空气采油过程

\* 收稿日期: 2019 - 04 - 05

作者简介: 张成博 , 工程师 , 从事采油工艺研究 ,  
zhangchengbo1@petrochina. com. cn.