

终端区管制系统风险因素分析的 DEMATEL-ISM 模型^{*}

张兆宁 教授 李文雅

(中国民航大学 空中交通管理学院 天津 300300)

学科分类与代码: 6203070(安全系统工程)

中图分类号: X949

文献标志码: A

基金项目: 国家自然科学基金资助(71701202); 中央高校基金资助(3122017061)。

【摘要】 为提高空管系统安全管理水平,提出基于过程的故障模式及影响分析(FMEA)方法,识别终端区管制系统潜在的风险因素;构建 DEMATEL-ISM 模型,运用决策实验室分析(DEMATEL)模型计算各风险因素的影响度和被影响度,确定要素的因果属性和中心度排序,运用解释结构模型(ISM)构建系统风险递阶结构,表征管制系统中各风险因素的致因属性和层次关系;并以某终端区管制系统为例,验证 DEMATEL-ISM 模型的有效性。结果表明:DEMATEL-ISM 模型可将所论系统的风险因素按致因属性分为 3 个类别,即 6 个直接致因、10 个过渡致因和 3 个本质致因;递阶结构可有效表征终端区管制系统风险的内在关联,实现系统风险分析。

【关键词】 故障模式及影响分析(FMEA); 因果属性; 中心度; 终端区管制;
解释结构模型(ISM); 风险集成

DEMATEL-ISM model for analysis of risk factors in terminal area control system

ZHANG Zhaoning LI Wenya

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

Abstract: To improve the safety management level of the air traffic control system, a process-based FMEA method was worked out for identifying the potential risk factors in the terminal area control system. A DEMATEL-ISM model was built, and the affecting degree and affected degree of each risk factor were calculate by using the decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) model. The causal attribute and centrality order were determined. The ISM was used for constructing the system risk hierarchical structure presenting the attributes of causes of and hierarchical relationships between the various risk factors in the regulatory system. A terminal area control system was taken as an example to verify the effectiveness of the DEMATEL-ISM model. According to the results, the DEMATEL-ISM model can be used to classify the causal properties of risk factors into three categories in the system, respectively, six direct causes, ten transition causes and three essential causes. In addition, the constructed hierarchical structure can be used to effectively characterize the correlations between the risks in the terminal area control system, complete system analysis and provide a decision-making basis for the system's risk management.

Keywords: failure mode and effect analysis (FMEA); causality; centrality degree; terminal area control; interpretative structural model (ISM); risk integration

* 文章编号: 1003-3033(2018)10-0086-06; DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.10.015
收稿日期: 2018-08-10; 修稿日期: 2018-09-12

0 引言

终端区管制系统是民航运输管制系统的一个重要组成部分,在该系统中,航空器的运行空间狭窄,飞行状态复杂,这使其风险水平明显高于其他系统^[1]。因此,开展终端区管制系统风险分析,确定其中的风险因素及风险因素间的相互作用关系和层次结构,是空中交通风险管理必不可少的课题之一。

目前国内外诸多学者对此开展了研究,HSU^[2]探讨了航空安全管理系统的演变,确定了影响应急安全的关键组织因素;FABBRI 等^[3]基于项目成果,提出了风险的独立评估方法;KHARCHENKO 等^[4]研究了不确定条件下,终端管制区的空中交通管制员错误预防应用模型,并分析了威胁和错误管理模型;罗帆等^[5]基于复杂网络元素-耦合模型,研究了空管安全风险因素间的耦合规律;曹海峰等^[6]建立了贝叶斯模型,分析了空管威胁、差错和意外状态数据;王永刚等^[7]运用系统动力学模型,模拟了航空公司不安全事件在动态反馈复杂作用下的形成机制;张兆宁等^[8]运用熵值理论,揭示了进近管制系统风险性增减变化规律。现有文献大多忽略了风险因素的根本属性,因而在系统风险分析方面,层次性和结构性较为缺乏。

鉴于此,笔者拟提出基于过程的故障模式及影响分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)方法,识别系统中的风险因素;运用决策实验室分析(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)模型,讨论系统风险因素的因果属性;并依据解释结构模型(Interpretative Structural Modeling Method, ISM)确定管制系统中的直接、过渡和本质风险因素,建立系统风险递阶结构,将系统中风险因素间的复杂作用关系划分成一定的层次,以期为终端区管制系统的风险管理提供思路和决策支持。

1 终端区管制系统风险因素识别

终端管制区通常设在一个或者几个主要机场附近的空中交通服务航路汇合处,需要同时为 2 个或者 2 个以上机场的进场和离场飞行提供进近管制服务,进离场航线复杂,交通流量大,空域受限多,存在诸多非线性交互的风险因素。管制系统运行流程图 1 所示。

FMEA 是工程系统中识别产品的失效模式和影响因素的常用方法^[9],该方法多用于可靠性分析,

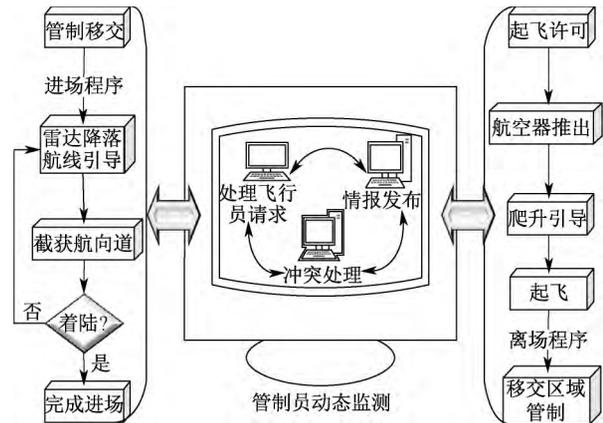


图 1 管制系统运行流程

Fig.1 Operational flow of system

具有较高的层次性,但其描述系统全过程的能力较弱;过程方法是指系统识别和管理组织所应用的过程,特别是识别这些过程之间的相互作用^[10],该方法可全面描述系统运行的过程,但是,单一运用其进行系统分析,其描述往往缺乏条理性。因此,文中结合上述 2 种系统分析方法,提出基于过程的 FMEA 方法,来识别终端区管制系统潜在的风险因素,具体步骤如下:

首先,运用过程方法,分析终端区管制系统的运行过程,将终端区管制系统的运行过程分为管制协调与移交、席位监控、进离场指挥和冲突预测处理 4 个子过程;然后,运用 FMEA,将这 4 个子过程看作 FMEA 的构成单元(部件),并自上而下逐级细分,得到每个构成单元的组成要素(零件);最后,综合考虑人-机-环-管 4 个方面,分析零件的构成要素(风险因素),具体见表 1。

2 系统风险集成分析模型

2.1 基于 DEMATEL 的系统风险分析

DEMATEL 是一种面向复杂系统因素分析的模型^[11],该模型借助矩阵和图论工具判断各因素之间有无关系及关系强弱。

构建 DEMATEL 的步骤如下:

1) 运用基于过程的 FMEA 方法识别终端区管制系统的风险,确定系统中潜在的风险因素 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$), $x_i \in X$, X 为系统风险因素集合。

2) 采用专家打分法,确定系统中各风险因素间的关系。专家打分所运用的语义量化转换见表 2。表 2 中, γ_{ij} 为风险因素 x_i 对风险因素 x_j 的影响程度; γ_{ij}^k ($j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$) 为第 k 个专家给出的风险因素 x_i 对风险因素 x_j 的直接影

表1 终端区管制风险因素

Tab.1 Risk factors of terminal area control

产品	构成单元(部件)	组成要素(零件)	构成要素(风险因素)
终端区管制系统风险	管制协调移交过程	确认管制移交规则	管制协议不合理 x_1
		监控管制移交环境	扇区飞行流量过大流量复杂 x_2 排班不合理 x_3
		管制移交配合	相邻管制室配合有问题 x_4 通话质量差 x_5
	席位监控过程	监控管制信息并发布信息	管制员监视不足 x_6 管制员公布情报数据有误 x_7
		跟踪飞行动态	遗忘飞行动态 x_8
		进场指挥准备	进场排序不合理 x_9 进离场程序的使用出错 x_{10}
	进离场指挥过程	发布指令	通信设备失效 x_{11} 管制员与飞行员间通话出现问题 x_{12}
		雷达引导	未及时检修设备 x_{13} 雷达故障 x_{14}
		观察空域环境	飞行程序设计优劣 x_{15} 空域环境 x_{16} 恶劣气象条件 x_{17}
	冲突预测处理过程	确定潜在冲突及冲突处理	特殊情况的处理不合理 x_{18} 心理素质差经验不足 x_{19}

度; m 为参与打分的专家人数。当 $i=j$ 时,有 $\gamma_{ij} = 0$ 。由此得到直接耦合矩阵 Y 其表达如下式:

表2 语义量化转换

Tab.2 Semantic quantization conversion

语义	分值 γ_{ij}
风险因素 x_i 对风险因素 x_j	没有影响—0
	弱的影响—1
	一般影响—2
	强的影响—3
	较强影响—4

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} \\ \gamma_{21} & 0 & \cdots & \gamma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

3) 计算综合影响矩阵 T 。将直接耦合矩阵 Y 规范化处理,得到规范化直接耦合矩阵 Y' ,其表达如下:

$$Y' = \frac{1}{\max_{i \in [1, n]} (\sum_{j=1}^n \gamma_{ij})} Y \quad (2)$$

式中 $\max_{i \in [1, n]} (\sum_{j=1}^n \gamma_{ij})$ 为矩阵 Y 中每一行求和的最大值。

经规范化处理后, $\gamma'_{ij} \in [0, 1]$ 。直接耦合矩

阵只考虑了各因素之间的直接影响,并未考虑间接影响。因此,借助 Matlab 软件,根据式(3)对综合影响矩阵 T 编程求解。 T 表示风险因素间的直接耦合和间接耦合的累加,表达式如下:

$$T = Y' + Y'^2 + \cdots + Y'^n = Y' \frac{1 - Y'^{n-1}}{1 - Y'} = Y' (1 - Y')^{-1} \quad (3)$$

4) 计算风险因素的中心度 e_i 和原因度 f_i 。 e_i 为 T 的行和与列和之和; f_i 为 T 的行和与列和之差。 e_i 和 f_i 的计算如下式:

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

$$f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} - \sum_{j=1}^n t_{ji}$$

式中 t_{ij} 为 T 中的元素。

e_i 的值越大,表示该风险因素的重要程度越高。若 f_i 为正,则表明该风险因素耦合其他风险因素,称为原因因子;若 f_i 为负,则表明该风险因素受其他因素的耦合,称为结果因子。

5) 绘制风险因素因果图。以风险因素的中心度 e_i 为横坐标,原因度 f_i 为纵坐标,绘制风险因素因果图。

2.2 DEMATEL-ISM 风险集成分析模型

ISM 常用于分析因素众多而层次结构混乱的系

统^[12]。文中集成 DEMATEL 和 ISM 这 2 种模型, 来确定系统的层次结构。基于 DEMATEL-ISM 的风险集成分析步骤如下:

1) 计算风险因素的可达矩阵。矩阵 Z 为综合影响矩阵 T 与单位矩阵 I 之和, 即: $Z = T + I$ z_{ij} 为可达矩阵中 Z 中元素。由式(5) 计算风险因素的可达矩阵 D 。

$$\begin{cases} d_{ij} = 1 & z_{ij} \geq \varepsilon \\ d_{ij} = 0 & z_{ij} < \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式中 d_{ij} 为可达矩阵中 D 中的元素。

根据风险因素的节点度数大小确定阈值 ε , 节点度数为可达矩阵 D 中风险因素 x_i 所在的行和列之和。 ε 的选取遵循节点度数适中, 不会过大或过小的原则, 进行多次计算分析, 得到合适取值。

2) 确定各个风险因素 x_i 的可达集 U_i 和前项集 V_i :

$$\begin{aligned} U_i &= \{x_j \mid x_j \in X, d_{ij} \neq 0\} \\ V_i &= \{x_j \mid x_j \in X, d_{ji} \neq 0\} \end{aligned} \quad (6)$$

3) 划分可达矩阵的层次, 若 U_i 和 V_i 满足下式:

$$U_i = U_i \cap V_i \quad (7)$$

则说明 U_i 中对应的风险因素 x_i 均能在 V_i 中找到前因, 该风险因素称为位于高层级的因素。然后在可达矩阵 D 中划除 i 行与 j 列。

4) 循环执行步骤 2)、3), 直到所有因素都被划除。

5) 根据风险因素被划除的顺序, 绘制系统风险因素间相互关联的递阶层次结构。

3 算例分析

以某终端区管制系统为例, 分析并验证 DEMATEL-ISM 模型的有效性和可行性。收集专家打分结果, 进行平均计算, 确定直接耦合矩阵 Y ; 根据式(2)、式(3), 得到综合影响矩阵 T ; 在此基础上计算各风险因素的中心度和原因度。计算结果见表 3。

根据上述求解结果, 绘制终端区管制系统风险因素因-果图, 如图 2 所示。

图 2 中, $x_1, x_2, x_3, x_{11}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{17}$ 为原因致因风险因素, 在系统中易影响到其他风险因素, 在控制风险时, 需要重点切断其传递过程; $x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{16}, x_{18}, x_{19}$ 为结果致因风险因素, 易受其他风险因素的影响, 在系统中, 需要防止其受其

表 3 DEMATEL 计算结果

Tab.3 Calculation results of DEMATEL

风险因素	中心度	原因度	中心度排序	因素属性
x_1	2.409 0	2.079 0	13	原因
x_2	4.315 3	1.259 8	8	原因
x_3	1.955 4	1.354 1	16	原因
x_4	5.421 1	-1.516 3	3	结果
x_5	3.313 6	-1.182 3	11	结果
x_6	5.305 5	-1.668 1	4	结果
x_7	4.915 6	-1.761 5	6	结果
x_8	5.597 3	-0.697 8	1	结果
x_9	5.264 3	-1.247 7	5	结果
x_{10}	5.441 4	-0.583 2	2	结果
x_{11}	1.994 5	1.582 3	15	原因
x_{12}	3.706 7	-0.350 9	10	结果
x_{13}	1.421 9	1.342 5	19	原因
x_{14}	1.452 7	0.990 8	18	原因
x_{15}	2.179 1	2.103 9	14	原因
x_{16}	4.504 7	-0.347 8	7	结果
x_{17}	1.682 4	1.682 4	17	原因
x_{18}	4.195 9	-1.965 3	9	结果
x_{19}	3.040 0	-1.073 9	12	结果

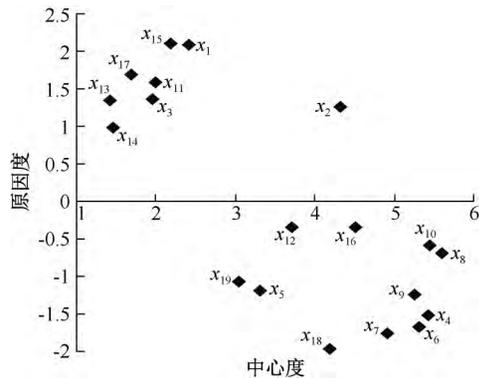


图 2 风险因素原因-结果

Fig.2 Risk factor causes-result

他因素干扰导致系统风险涌现性增大。

根据式(5) 计算系统的可达矩阵 D , 选取阈值 ε 为 0.12、0.18、0.19 和 0.2, 分别计算风险因素节点度, 结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, $\varepsilon = 0.19$ 时, 节点度数的范围较合适。

根据可达矩阵 D 和确定的阈值 ε , 结合式(6)、式(7) 计算结果, 绘制终端区管制系统的风险因素递阶层次结构, 如图 4 所示。

由图 4 可知: $x_5, x_{13}, x_{14}, x_{17}, x_{18}, x_{19}$ 这 6 个风险因素为直接致因, 在系统风险水平较高时, 采取有效措施控制这些风险因素, 会有立竿见影的效果; $x_3, x_4, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{16}$ 这 10 个风险因素为

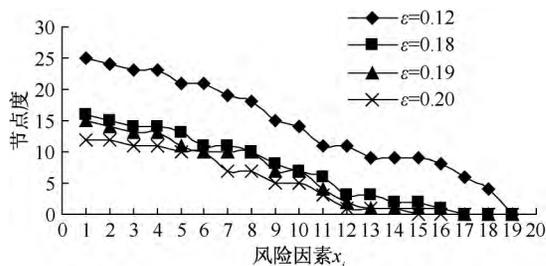


图3 不同阈值节点度对比

Fig.3 Different threshold comparisons

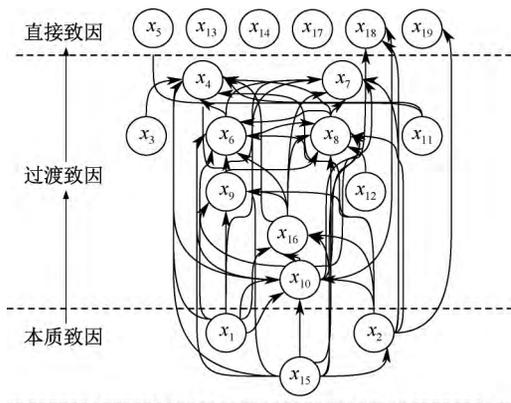


图4 风险因素递阶层次结构

Fig.4 Hierarchical structure of risk factors

过渡致因, 这些风险因素虽然不是事故的直接原因,

但是其复杂的线性作用关系, 会导致系统处于不稳定的风险状态, 需要重点关注; x_1, x_2, x_{15} 这3个风险因素为本质致因, 本质致因属于系统中低层次的风险因素, 控制这些风险因素, 不会立即取得明显的成效, 但它们对系统风险有本质的影响, 属于根本因素。

文献[13]中, 通信中断和设备故障率达50%以上, 说明通信质量和设备故障风险是影响系统安全水平的关键因素, 这与文中风险分析结果基本一致, 表明DEMATEL-ISM模型具备一定的有效性。

4 结论

1) 针对终端区管制系统的风险辨识问题, 提出基于DEMATEL-ISM的风险集成分析模型, 该模型将系统的风险因素分为3种致因属性, 包括6个直接致因、10个过渡致因和3个本质致因; 其中的递阶结构可有效表征终端区管制系统风险的内在关联, 实现系统风险分析。

2) 运用该模型分析系统风险, 既能划分出风险的因果属性, 又可确定系统中的关键风险因素。

3) 文中主要研究了风险因素的属性, 下一步研究的重点, 可针对不同属性的风险因素提出相应的风险控制措施。

参考文献

[1] 张兆宁, 金伟伟, 崔文建. 终端区管制系统运行风险的解释结构模型研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(7): 798-803.
ZHANG Zhaoning, JIN Weiwei, CUI Wenjian. Research on interpretive structure modeling for operation risk of air control system in terminal area[J]. China Science Paper, 2016, 11(7): 798-803.

[2] HSU Y L. From reactive to proactive: using safety survey to assess effectiveness of airline SMS[J]. Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, 2008, 40(1): 41-48.

[3] FABBRI L, CONTINI S. Bench marking on the evaluation of major accident-related risk assessment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(2): 1 465-1 476.

[4] KHARCHENKO V, CHYNCHENKO Y. Models of air traffic controllers errors prevention in terminal control areas uncertainty conditions[J]. Proceedings of the National Aviation University, 2017, 70(1): 7-13.

[5] 罗帆, 刘堂卿. 基于N-K模型的空中交通安全耦合风险分析[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2011, 33(2): 267-279.
LUO Fan, LIU Tangqing. Analysis of coupled risk of air traffic safety based on N-K model[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information and Management Engineering, 2011, 33(2): 267-279.

[6] 曹海峰, 李彤. 空管威胁、差错与意外状态的贝叶斯模型分析研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(8): 85-89.
CAO Haifeng, LI Tong. Study on threat, error and undesired states in air traffic control based on Bayesian method[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(8): 85-89.

- [7] 王永刚,王灿敏,郑红运,等. 基于系统动力学的航空公司不安全事件致因复杂性研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(8): 71-77.
WANG Yonggang, WANG Canmin, ZHENG Hongyun, et al. Study on complex causing mechanism of airline unsafe events based on system dynamics[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(8): 71-77.
- [8] 张兆宁,金伟伟. 基于灰色关联熵的进近管制系统风险性研究[J]. 安全与环境工程 2015, 22(5): 168-172.
ZHANG Zhaoning, JIN Weiwei. Study on approach control risk based on gray relational entropy[J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(5): 168-172.
- [9] 葛运朋,张敏. 基于 FMEA 法的复杂系统风险因素识别研究[J]. 价值工程 2018, 21(3): 21-23.
GE Yunpeng, ZHANG Min. A method of distinguishing the risk factors of complex system based on FMEA[J]. Value Engineering, 2018, 21(3): 21-23.
- [10] 柴邦衡. ISO 9000 质量管理体系[M]. 北京: 机械工业出版社 2002: 95.
- [11] 孙永河,韩玮,段万春. 复杂系统 DEMATEL 算法研究进展评述[J]. 控制与决策 2017, 32(3): 385-392.
SUN Yonghe, HAN Wei, DUAN Wanchun. Review on research progress of DEMATEL algorithm for complex systems[J]. Control and Decision, 2017, 32(3): 385-392.
- [12] 周德群. 系统工程方法与应用[M]. 北京: 电子工业出版社 2015: 120-128.
- [13] 单晶晶. 民航不安全事件数据的预测推理与风险识别[D]. 北京: 北京交通大学 2016.
SHAN Jingjing. Data based inference and risk recognition for civil aviation unsafe events[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.



作者简介: 张兆宁 (1964—),男,河北滦南人,博士,教授,主要从事空中交通规划与管理方面的研究。E-mail: zzhaoning@263.net。