

集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统安全 事故致因因素分析

杜纯¹, 王瑛¹, 汪送^{1,2}, 管明露¹

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

(2. 武警工程大学 装备工程学院, 陕西 西安 710086)

摘要: 致因因素间复杂的非线性交互作用是造成复杂系统安全事故成因复杂性的主要原因. 在提取出复杂系统安全事故的致因因素后, 给出了集成 DEMATEL/ISM 方法分析事故致因因素的算法步骤. 基于航空复杂系统实例, 采用集成 DEMATEL/ISM 方法求得了致因因素间的综合影响关系、关键致因因素及致因因素多级递阶结构模型, 通过复杂网络理论分析节点度, 度数大的节点与关键致因因素吻合. 所提方法可以用于提取事故关键致因因素和分析因素间的层次关系.

关键词: 复杂系统; 安全事故; 集成 DEMATEL/ISM 方法; 递阶结构模型; 复杂网络

1 引言

复杂系统事故成因的复杂性既与主观认知能力限制有关也与客观事故本身的复杂性有关, 而这两方面都与系统组元间的各种复杂的非线性交互作用关联. 因此, 探明因素间, 特别是事故致因因素间的关联关系和层次结构是分析复杂系统安全事故的前提和基础, 本文试图采用集成 DEMATEL/ISM 方法来解决该问题.

决策实验室分析法 (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL) 和解释结构模型法 (Interpretive Structural Modeling, ISM) 是对复杂系统进行分析和决策的重要方法, 两种方法均已得到了广泛应用^[1]. 周德群等最早提出了集成 DEMATEL / ISM 构建系统层次结构的方法, 并给出了二者集成的理论依据和算法^[2], 方爱丽等建立了网络化的 DEMATEL 方法模型, 用于产业经济系统分析^[3]. 本文拟采用 DEMATEL 方法分析复杂系统安全事故致因因素间的关联关系, 找出关键致因因素, 并采用 ISM 方法获得致因因素的多级递阶结构模型, 为复杂系统安全事故的分析和预防研究奠定基础.

2 复杂系统安全事故致因因素提取

在复杂系统安全事故分析方面, Leveson^[4] 指出了复杂系统的三类事故致因, 即部件失效 (含物理部件的故障和人为失误)、交互紊乱 (部件间的非功能性交互作用) 和外界环境扰动,

收稿日期: 2012-04-26

资助项目: 国家自然科学基金 (71171199)

当上述三种致因在缺乏约束或约束失效时就可能引发安全事故. 东北大学陈宝智教授的两类危险源理论^[5]考虑约束失效后能量的意外释放引发事故, 注重的是部件失效问题, 如能量载体破裂; 西安科技大学的田水承教授^[6]在此基础上补充了第三类危险源, 即组织管理因素, 实际上只是扩大了系统的分析边界. 而复杂系统作为一种开放的非线性系统, 与外界有着物质、能量和信息的交互, 必然也会产生一定的适应性, 这种适应性既包括系统参数的适应性也包括系统结构的适应性. 在外界环境确定的前提下, 系统结构决定系统功能, 因此结构状态与安全息息相关, 安全性就是系统结构相互作用下的一种整体涌现性. 从以上分析可知, 适应性的衰退也是造成安全事故的重要致因. 此外, 信息缺乏在事故成因中也占据重要地位^[7]. 因此, 部件失效、交互紊乱、环境扰动、适应性衰退和信息缺乏是造成复杂系统安全事故的五个主要致因类.

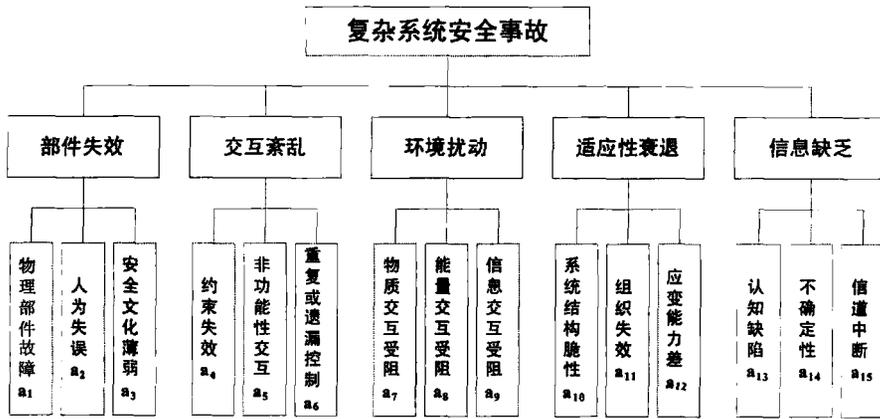


图 1 复杂系统安全事故致因因素

基于文献调研及作者从事安全事故分析的经验, 对上述五个主要致因类进行细分, 得到如图 1 所示的复杂系统安全事故致因因素图, 图中虽然提取出了 15 个重要的致因因素, 但是对于因素间重要性及结构层次并未清晰. 因此, 下文将采用集成 DEMATEL/ISM 方法来解决该问题.

3 DEMATEL 方法及其与 ISM 方法的集成

3.1 DEMATEL 方法及步骤

DEMATEL 方法最初是由美国学者 Gabus A 和 Fontela E 在 20 世纪 70 年代初期提出的^[8], 该方法运用图论与矩阵论原理进行系统因素分析的方法, 通过系统中各因素之间的逻辑关系构建直接影响矩阵, 计算各因素对其他因素的影响程度以及被影响度, 从而计算各因素的中心度与原因度. 根据因素所对应的中心度和原因度, 即可得出该因素所属种类 (原因因素还是结果因素)^[2,9]. 该方法自被提出后在很多领域得到的广泛的应用, 并与其他方法取得了较好的结合^[10-11].

DEMATEL 方法分析复杂系统安全事故的步骤如下:

步骤 1 确定复杂系统安全事故致因因素 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \alpha_i \in A (i = 1, 2, \dots, n)$, 其中 n 因素的数目, A 为致因因素的集合;

步骤 2 设定影响关系评价标度 (如根据较强、强、一般、弱、无五个等级分别赋值 4,3,2,1,0), 根据专家经验获得因素间的直接影响矩阵 $B(B = [\beta_{ij}]_{n \times n})$, β_{ij} 表示致因因素 α_i 对 α_j 的直接影响程度, 因为因素间的相互影响关系并非等同, 因此一般情况 $\alpha_{ij} \neq \alpha_{ji}$, 当 $i = j$ 时, 取 $\alpha_{ij} = 0$;

步骤 3 规范化直接影响矩阵, 得到规范化直接影响矩阵 $C(C = [c_{ij}]_{n \times n})$

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

式中 $\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n \beta_{ij}$ 为行和的最大值, 通过规范化处理可使 c_{ij} 处于 $[0,1]$ 区间内.

步骤 4 计算综合影响矩阵 $T(T = [t_{ij}]_{n \times n})$. 综合影响矩阵表示因素间关系直接影响和间接影响的综合累加, 以确定每一个因素相对于系统中最高水平的因素的最后影响, 即

$$T = C + C^2 + \dots + C^n = C \frac{I - C^{n-1}}{I - C} \quad (2)$$

由于 $0 \leq c_{ij} \leq 1$, 因此, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $C^{n-1} \rightarrow 0$, 有

$$T = C \frac{I}{I - C} = C(I - C)^{-1} \quad (3)$$

步骤 5 计算各致因因素的影响度 f_i 和被影响度 e_i . 对综合影响矩阵 T 中元素按行相加得到相应因素的影响度 f_i , 对综合影响矩阵 T 中元素按列相加得到相应因素的被影响度 e_i .

$$f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$e_i = \sum_{j=1}^n t_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

步骤 6 计算中心度 M_i 和原因度 N_i . 致因因素的影响度和被影响度相加得到其中心度, 致因因素的影响度和被影响度相减得到其原因度.

$$M_i = f_i + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$N_i = f_i - e_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

中心度 M 为综合影响矩阵 T 中的行和与列和之和, 表示该致因因素在系统中的重要性程度, 中心度越大, 因素重要度越高. 原因度 N 为综合影响矩阵 T 中的行和与列和之差, 表示该致因因素与其他致因因素的因果逻辑关系程度, 若为正, 表示该致因因素对其他致因因素的影响大, 称为原因因素; 若为负, 则表示该致因因素受其他致因因素的影响大, 称为结果因素.

步骤 7 绘制原因 — 结果图. 以致因因素的中心度为横坐标, 原因度为纵坐标作笛卡尔坐标系, 标出各致因因素在坐标系上的位置, 分析各个因素的重要性, 得出关键致因因素.

3.2 集成 DEMATEL/ISM 方法

关于集成 DEMATEL/ISM 方法的理论依据可见文献 [2]. 具体步骤是在上述 7 步骤的基础上, 进行:

步骤 8 计算整体影响矩阵 $H(H = [h_{ij}]_{n \times n})$

$$H = I + T \quad (8)$$

式中, I 为单位矩阵.

步骤 9 给定阈值 λ , 计算可达矩阵 $K(K = [k_{ij}]_{n \times n})$

$$k_{ij} = 1, \text{ if } h_{ij} \geq \lambda(i, j = 1, 2, \dots, n) \tag{9}$$

$$k_{ij} = 0, \text{ if } h_{ij} < \lambda(i, j = 1, 2, \dots, n) \tag{10}$$

λ 的值直接影响可达矩阵构成及后续层次结构划分, 具体取值可根据经验进行多次取值分析, 以获得满意结果.

步骤 10 确定各致因因素的可达集合以前项集合. 如致因因素 α_i 的可达集合 R_i 以及前项集合 S_i 的计算式为:

$$R_i = \{\alpha_j | \alpha_j \in A, k_{ij} \neq 0\}, (i = 1, 2, \dots, n) \tag{11}$$

$$S_i = \{\alpha_j | \alpha_j \in A, k_{ji} \neq 0\}, (i = 1, 2, \dots, n) \tag{12}$$

式中 A 为致因因素的集合.

步骤 11 验证公式 $R_i = R_i \cap S_i, (i = 1, 2, \dots, n)$ 是否成立. 若成立则说明致因因素 α_i 为底层因素. 在矩阵 K 中划除第 i 行和第 i 列.

步骤 12 重复步骤 10 和步骤 11, 直到所有的因素均被划除.

步骤 13 根据被划除出因素的顺序, 绘制致因因素递阶结构图.

4 实例分析

在提取完复杂系统事故致因因素后, 采用集成 DEMATEL/ISM 方法既可用于对复杂系统安全事故的事后调查分析, 也可用于事故预防分析中确定潜在关键致因因素. 下面将给出用于事故预防分析中确定潜在关键致因因素的实例.

表 1 直接影响矩阵

F	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}	α_{15}
α_1	0	2	0	3	2	1	2	2	2	3	0	2	1	1	2
α_2	3	0	0	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	1
α_3	0	2	0	1	1	2	0	0	1	2	2	2	2	2	0
α_4	3	2	0	0	4	3	2	2	2	3	1	1	1	3	1
α_5	1	1	0	4	0	2	3	3	3	1	1	1	1	2	2
α_6	3	1	0	2	2	0	1	1	2	1	2	1	1	3	0
α_7	1	1	1	0	1	2	0	3	3	2	2	2	1	2	0
α_8	1	1	0	0	1	1	2	0	1	0	0	2	2	1	2
α_9	0	2	2	2	2	3	1	1	0	2	3	3	3	4	0
α_{10}	1	2	3	1	1	1	2	2	2	0	3	2	2	3	1
α_{11}	1	2	4	2	2	2	1	1	1	2	0	2	1	2	0
α_{12}	0	3	1	1	2	2	1	1	1	1	1	0	3	3	0
α_{13}	3	4	2	3	3	3	2	2	2	3	2	3	0	3	1
α_{14}	2	2	0	2	3	2	1	1	1	2	1	1	3	0	0
α_{15}	0	1	1	1	1	1	0	0	4	0	0	2	2	2	0

为对某一航空复杂系统(考虑人、机、环、管等因素)的安全状况进行分析,提取了如图 1 所示的 15 个致因因素,分别记为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{15}$. 邀请航空领域权威专家对以上 15 个因素根据较强、强、一般、弱、无五个等级分别赋值 4,3,2,1,0 来确定因素间的影响关系,得到直接影响矩阵,见表 1(为得到较客观的评价结果,此处可采用多人打分取平均值得到最终的直接影响矩阵).

经计算的 $\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n \beta_{ij} = 36$, 根据公式 (1) 可求得规范化矩阵 C, 进而根据公式 (2) 求得综合影响矩阵 T. 基于 DEMATEL 方法得到如表 2 所示的计算结果和图 2 所示的因果图.

表 2 DEMATEL 方法求解结果

致因因素	影响度	被影响度	中心度	原因度
α_1	1.7942	1.5795	3.3737	0.2147
α_2	1.8286	2.0276	3.8562	-0.1990
α_3	1.3849	1.0569	2.4418	0.3280
α_4	2.1625	1.9291	4.0916	0.2334
α_5	1.9239	2.1566	4.0805	-0.2327
α_6	1.5992	2.1186	3.7178	-0.5194
α_7	1.6106	1.5419	3.1525	0.0687
α_8	1.0981	1.6084	2.7065	-0.5103
α_9	2.2045	2.0236	4.2281	0.1809
α_{10}	1.9881	1.8101	3.7982	0.1780
α_{11}	1.7691	1.5968	3.3659	0.1723
α_{12}	1.6155	1.9636	3.5791	-0.3481
α_{13}	2.7517	1.9476	4.6993	0.8041
α_{14}	1.7241	2.5527	4.2768	-0.8286
α_{15}	1.2473	0.7893	2.0366	0.4580

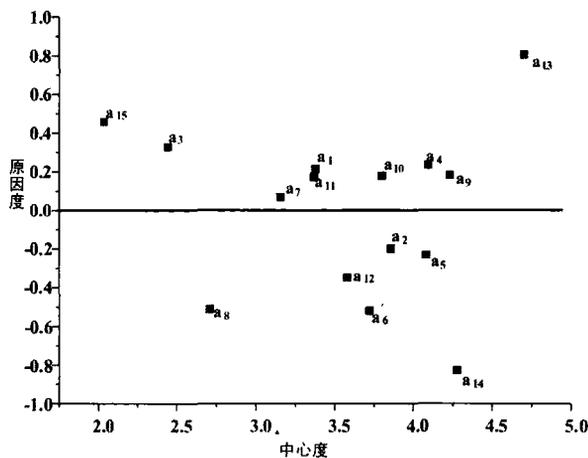


图 2 因果图

从以上计算结果可知, 认知缺陷 (α_{13})、不确定性 (α_{14})、信息交互受阻 (α_9)、约束失效 (α_4) 和非功能性交互 (α_5) 是最可能导致复杂系统安全事故的致因因素, 也是复杂系统运行时需要重点预防的潜在事故因素.

根据公式 (8) 通过计算 H, 取阈值 $\lambda = 0.15$, 可得到如表 3 所示的可达矩阵.

表 3 可达矩阵

F	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}	α_{15}
α_1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
α_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_4	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0
α_5	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
α_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_7	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
α_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
α_9	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0
α_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
α_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
α_{12}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
α_{13}	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0
α_{14}	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
α_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

根据公式

$$R_i = R_i \cap S_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

经计算分析得到第一级致因因素集为

$$L_1 = \{\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_8, \alpha_{14}\}$$

同理可得

$$L_2 = \{\alpha_2, \alpha_{11}\}, L_3 = \{\alpha_{10}, \alpha_{12}\}, L_4 = \{\alpha_4, \alpha_9\}, L_5 = \{\alpha_7, \alpha_{15}\}$$

和

$$L_6 = \{\alpha_{13}\}$$

根据以上分层结果及可达到矩阵得到如图 3 所示的复杂系统安全事故致因因素多级递阶结构模型.

基于复杂网络理论^[3], 如果将事故致因因素视为网络节点, 致因因素间的关系视为网络的边, 则图 3 所示的多级递阶结构模型就可视为一个复杂网络. 网络中节点度较大的因素如 α_{13} 、 α_{14} 、 α_9 、 α_4 和 α_5 正好是 DEMATEL 因果图中所确定出来的关键因素. 节点的度较大意味着与之相连的边的数目越多, 进而也就与其他节点发生复杂的非线性交互的可能性越大, 从而增大酿成事故的可能.

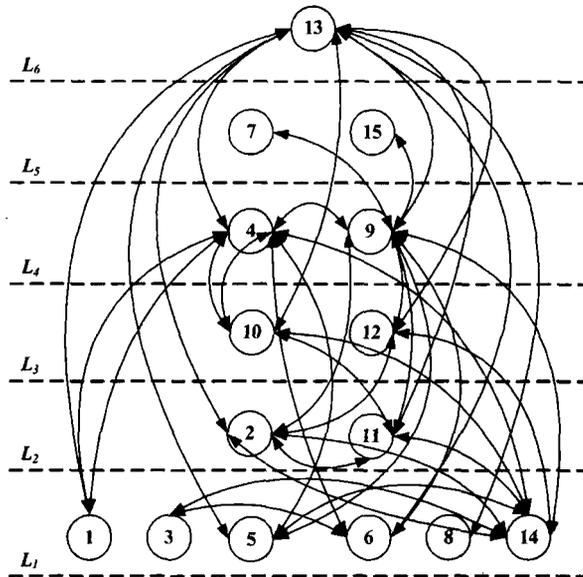


图3 复杂系统安全事故致因因素多级递阶结构模型

5 结论

为分析复杂系统安全事故的致因, 本文提取了 15 个安全事故致因因素, 分别采用 DEMATEL 方法获取了关键事故致因因素, 采用 ISM 方法构建了复杂系统安全事故致因因素多级递阶结构模型。基于复杂网络理论所得的读数大的节点恰好就是 DEMATEL 方法所确定的关键节点。本文所提方法在复杂系统安全事故的调查分析和事前预防分析中, 提取关键事故致因因素和分析致因因素间的层次关系。

参考文献

- [1] 吴彪, 许洪国, 戴彤焱. 基于 DEMATEL—ISM 的高速公路作业区交通安全影响因素辨识 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(5): 130-136.
- [2] 周德群, 章玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究 [J]. 管理科学学报, 2008, 11(2): 20-26.
- [3] 方爱丽, 高齐圣, 张嗣瀛. 网络化 DEMATEL 方法在产业经济系统分析中的应用 [J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(5): 78-83.
- [4] Nancy G. Leveson. Applying systems thinking to analyze and learn from events[J]. Safety Science, 2011(49): 55-64.
- [5] 陈宝智. 安全原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [6] 田水承. 第三类危险源辨识与控制研究 [J]. 北京理工大学学报, 2001, 7: 20-21.
- [7] Hollnagel, E. CREAM-Cognitive Reliability and Error Analysis Method. 2006. http://www.ida.liu.se/~eriho/CREAM_M.htm
- [8] Fontela E, Gabus A. The DEMATEL Observer, DEMATEL 1976 Report[R]. Switzerland: Geneva, Battelle Geneva Research Center, 1976.
- [9] 金卫健, 胡汉辉. 模糊 DEMATEL 方法的拓展应用 [J]. 统计与决策, 2011, 23: 170-171.
- [10] WeiWen Wu. Choosing knowledge management strategies by using a combined anp and dematel approach[J]. Expert Systems with Applications, 2008(35): 828-835.

- [11] Jianmin Hou, Dequn Zhou. Study on Influence Factors of Distributed Energy System Based on DEMATEL and ISM[J]. International Journal of Nonlinear Science, 2011, 12(1): 36-41.

Analysis of Safety Accident Influence Factors of Complex System Based on the Integration of DEMATEL and ISM

DU Chun¹, WANG Ying¹, WANG Song^{1,2}, GUAN Ming-lu¹

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

(2. The Equipment Engineering, Engineering University of Armed Police Force of China, Xi'an 710086, China)

Abstract: The complex non-linear interactive action between causation factors is the main cause of the causation complexity of complex system safety accident. After distilling the causation factors of complex system safety accident, offered the arithmetic steps of integration of DEMATEL and ISM. Based on the example of aviation complex system, used the integration of DEMATEL and ISM method gained the compositive influence relationship between causation factors, key causation factors and multi-level step-up structural model, analyzed the degree of node by complex network theory, and the high degree node matched well with the key causation factors. The proposed method can be used to find the accident key causation factors and analysis the hiberarchy of causation factors.

Keywords: complex system; safety accident; integration of DEMATEL and ISM; step-up structural model; complex network