

文章编号: 1673 - 193X(2017) - 12 - 0145 - 07

# 基于 DEMATEL - ISM 的地下金属矿山人机系统 事故影响因素分析\*

罗周全 程鹏毅

(中南大学 资源与安全工程学院 湖南 长沙 410000)

**摘要:** 针对地下金属矿山人机系统的复杂性和动态性,基于人、机、环境、管理和信息5类事故致因,充分考虑各个因素之间的交互作用,确定地下金属矿山人机系统安全的15个重要影响因素,结合决策实验室分析法和解释结构模型对影响因素进行处理和分析,实现影响因素的层次划分。结果表明:人机系统中,人员各方面的知识更新慢和认知缺陷是根本原因;安全文化薄弱和非功能性交互是深层次原因;不确定性、信息交互受阻和系统结构脆性属于过渡致因;人为失误、人机约束失效、重复或遗漏控制、物质交互受阻、能量交互受阻和应变能力差是事故的近邻致因;机械物理部件失效和无事故事件通报对金属矿山人机系统安全性的影响相对较弱。

**关键词:** 地下金属矿山; 人机系统; 决策实验室分析法; 解释结构模型

中图分类号: X936 文献标志码: A doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.12.022

## Analysis on factors affecting accidents of man - machine system in underground metal mine based on DEMATEL - ISM

LUO Zhouquan, CHENG Pengyi

(School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410000, China)

**Abstract:** Aiming at the complexity and dynamics of man - machine system in underground metal mine, the interaction between various factors was considered based on five types of accident causes including man, machine, environment, management and information, and 15 important influencing factors for the safety of man - machine system in underground metal mine were determined. The influencing factors were processed and analyzed combining with the Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) and Interpretative Structural Modelling (ISM), so as to achieve the hierarchical division of the influencing factors. The results showed that in the man - machine system, the slow update of knowledge and cognitive defects in various aspects of personnel were the root causes, the weak safety culture and non - functional interaction were the underlying causes, the uncertainty, information interaction blocking and fragility of system structure were the transitional causes, the human error, man - machine constraint failure, repetitive or missing control, material interaction blocking, energy interaction blocking and weak strain capacity were the neighbouring causes of accident, while the failure of mechanical and physical components and the event notification without accident had relatively weak effect on the safety of man - machine system in underground metal mine.

**Key words:** underground metal mine; man - machine system; Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL); Interpretative Structural Modelling (ISM)

## 0 引言

在现代工业中,机械化程度越来越高,人机交互面

成为事故多发面,因此,把人和机器作为一个整体,在设计时充分考虑人的状态,以提高作业的效率、安全性、舒适度等特性,这样的系统称为人机系统。事故具有动态性和复杂性,我国地下金属矿山人机属于复杂的闭环系统,对事故的研究就是找出事故致因,通过技术、管理等手段防范于未然,减少事故的发生。在矿山人机系统中,各个层次结构组成元素之间存在交互作用,会涌现出特有的结构,从而引发新的功能,因此矿山人机系统

收稿日期: 2017 - 07 - 05

作者简介: 罗周全, 博士, 教授。

通讯作者: 程鹏毅, 硕士研究生。

\* 基金项目: 国家“十三五”重点研发计划课题(2017YFC0602901)

因素组成的事故系统不仅需要研究基本的人、机、环 3 大因素, 还需要研究特殊的层次结构和复杂的组元交互。通过对复杂矿山人机系统结构分析, 以及对矿山事故原理进行分析, 可以得出安全人机事故影响因素。

在以往的矿山安全研究中, 主要以研究机械的本质安全为主, 缺乏对整个矿山人机系统的分析计算, 然而系统中的各个因素都是相互作用、相互影响的, 地下金属矿山事故频发是人为原因, 还是机械设备的原因为往往往无法进行单一的解答, 而是需要用安全系统的思维分析矿山事故的诱发因素, 克服分析的片面性, 进而提出切实可行的对策措施<sup>[1]</sup>。

决策实验室分析法 (DEMATEL) 与解释结构模型 (ISM) 可以将复杂的矿山人机系统变成一个多级递阶的系统模型, 将矿山中模糊的思想、现状等转化为直观的、结构关系良好的模型, 得以分析矿山人机系统构成因素间相互联系的程度。因此, 采用此方法可以研究影响因素之间的相互作用及其对地下金属矿山人机系统事故的影响程度, 构建影响因素多级递阶结构模型, 揭示各个因素的中心度和节点度, 明确其中的原因因素和结果因素, 实现对地下金属矿山人机系统的影响因素的层次划分<sup>[2]</sup>。

### 1 地下金属矿山事故影响因素的提取

在地下金属矿山人机安全分析中, 矿山系统的 3 大事故致因分别为人的不安全行为、物的不安全状态和环

境扰动, 3 种致因在约束失效时就可能引发安全事故<sup>[3]</sup>。陈宝智研究的两类危险源理论, 考虑到约束失效后意外释放的能量而引发事故, 注重物的不安全状态, 即机械性能衰退问题, 能量的载体破裂<sup>[4]</sup>; 田水承在此基础上, 补充了第三类危险源管理因素, 对系统分析边界进行扩充, 认为信息缺乏在事故中也占重要地位, 管理也是主要的影响因素<sup>[5]</sup>; Nancy Levisohn 运用系统思维构筑安全系统, 从客观的角度提出一种基于事故模型的危害分析方法—系统理论事故流程分析 (STAMP), 主要考虑了设计失误、部件间交互作用事故和复杂的感知决策失误以及社会、组织和管理等因素, 并面向事故全过程进行因素识别, 注重分析潜在的控制缺陷及由此导致的危险行为。现在通用安全管理中, 广泛应用的有人、机、环、信息、管理 5 大事故致因。地下金属矿山人机系统是一种开放、非线性的系统, 与外界有着物质、能量和信息的交互, 在外界环境一定时, 系统的结构能够决定系统功能, 矿山的结构状态与矿山人机系统相关, 因此地下金属矿山的安全性就是在所有系统影响因素相互协同下的整体涌现性。综合分析, 机械部件失效、人机交互紊乱、环境扰动、适应性衰退和信息缺失均构成了矿山人机系统安全事故, 不仅包括人、机、环、信息、管理等基本要素, 还包括其因素交互面产生的新影响因素, 基于这些原理和方法将影响因素细化为 15 个地下金属矿山人机系统事故致因因素<sup>[6-12]</sup>, 如图 1 所示。

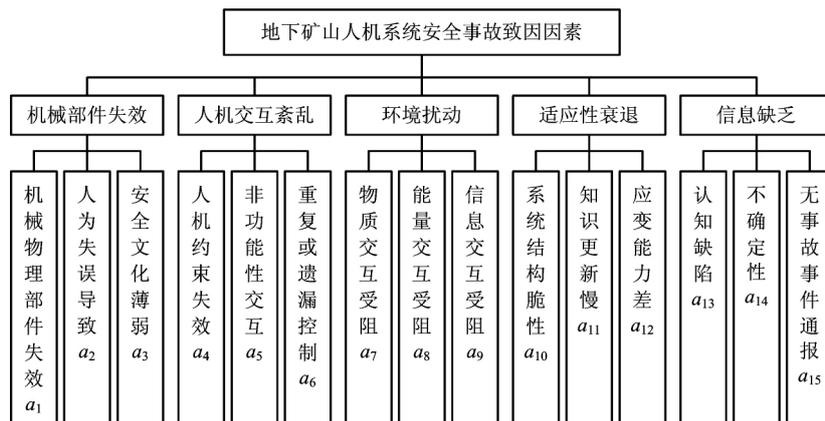


图 1 地下金属矿山人机系统安全事故致因因素

Fig. 1 Underground metal mine man - machine system safety accident causes factors

1) 机械物理部件失效: 矿山接卸构件、软件等的各种失效, 如: 矿山掘进机老化、装药台车故障等。

2) 人为失误导致: 主要指矿山操作人员未按规程进行的错误操作, 但应排除在特定环境下违规操作可以有效避免事故发生的情况, 如: 疲劳工作、上岗操作不熟练等。

3) 安全文化薄弱: 主要指矿山人机安全文化氛围不浓厚, 安全意识差, 安全教育不够深入到位等。

4) 人机约束失效: 指物理部件之间的相互制约关系失效(硬约束), 如: 矿山两铲运机相撞; 也指矿山安全监督关系缺乏(软约束), 如: 缺乏对员工安全行为的监管。

5) 非功能性交互: 指可预期的交互作用外的非线性

耦合作用,一般指超过了矿山机械设备设计者的预期,导致事故的发生,一般指本质安全薄弱。

6) 重复或遗漏控制: 矿山系统控制结构复杂,重叠区域的多次控制或者边缘区域的遗漏控制,如: 人机交互界面,人和机方面都没有进行控制,或人和机 2 方面都进行了控制。

7) 物质交互受阻: 指物质无法正常交互,如: 矿山设备无正常油料供应。

8) 能量交互受阻: 指能量无法正常应用,如: 矿山设备无动力输出,装药机无法正常装药,掘进机无法掘进,属于设备本身出现的故障。

9) 信息交互受阻: 指急需的信息无法得到及时提供,如: 矿山事故发生时,无法将信息传送到相关人员等。

10) 系统结构脆性: 指地下矿山人机系统与生俱来的容易崩溃的性质,与人机系统所受的内外界的干扰和冲击强度有关,是系统的本质属性。

11) 知识更新慢: 指矿山员工安全认知能力提高缓慢,新的安全知识无法及时被接受;随着矿山新技术的引进,其安全控制手段没有被及时更新、采纳。

12) 应变能力差: 指矿山员工及安全管理人员在突发状况下,不能采取及时有效的纠正措施,不能根据实际环境修正规则制度所确定的行为。

13) 认知缺陷: 矿山员工、安全监督管理人员不能及时发现系统的安全隐患,对矿山事故机理缺乏准确的认知,即安全技术管理水平弱。

14) 不确定性: 因矿山信息缺乏,进而导致各种难以做出正确决策的情况。

15) 无事故事件通报: 一个人机子系统发生事故后,对另一子系统不通报,或者对事故通报视而不见。

## 2 集成 DEMATEL - ISM 方法

### 2.1 方法和模型介绍

基于前文对地下金属矿山人机系统辨析的 15 个事故影响因素,提出集成 DEMATEL 与 ISM 方法,划分系统层次结构,以此来降低 ISM 方法中计算可达矩阵的复杂度、减少可达矩阵的计算量,使得可达矩阵的计算过程简化,更易于分析矿山人机系统事故的影响因素<sup>[13-16]</sup>,具体步骤如图 2 所示。

### 2.2 DEMATEL - ISM 方法步骤

地下金属矿山人机系统集成 DEMATEL - ISM 方法,分析事故因素相互影响关系的基本步骤如下:

1) 确定矿山人机环系统安全事故致因因素  $a_1, a_2, \dots, a_n, a_i \in A (i = 1, 2, \dots, n)$ , 其中  $n$  为人机环系统事故因素的数目,  $A$  是矿山人机环系统事故因素的总集合。

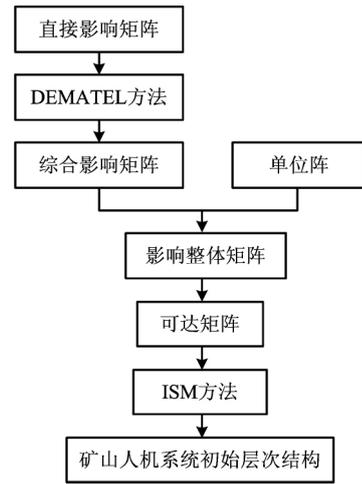


图 2 集成 DEMATEL - ISM 划分矿山人机结构

Fig. 2 Integrated DEMATEL - ISM division of mine man - machine structure

2) 产生矿山人机环系统初始直接影响矩阵,根据矿山专家及现场技术人员  $k (k = 1, 2, \dots, m)$  的经验,获得因素间的直接影响矩阵  $B^k (B^k = [\beta_{ij}^k]_{n \times n})$ ,  $\beta_{ij}^k$  表示第  $k$  位专家给出的事故因素  $a_i$  对  $a_j$  的直接影响程度,  $m$  为参与评价的专家数量。由于各个地下金属矿山人机环系统因素之间的相互影响关系不一定相同,一般情况下,也就是  $a_{ij} \neq a_{ji}$ , 当  $i = j$  时,取  $a_{ij} = 0$ ; 设  $B (B = [B_{ij}]_{n \times n})$  为初始直接影响矩阵,有:

$$\beta_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \beta_{ij}^k (k = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式(1)是采用取平均的方法对多位矿山专家的评价结果进行集结,从而使获得的初始直接矩阵得以消除专家的个体知识差异。取平均求得初始直接影响矩阵如下:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \beta_{12} & \dots & \beta_{1n} \\ \beta_{21} & 0 & \dots & \beta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} = (\beta_{ij})_{n \times n} \quad (2)$$

式中:  $\beta_{ij}$  为事故因素  $a_i$  对  $a_j$  的平均直接影响强度。

3) 对地下金属矿山人机环系统直接影响矩阵规范化,得到新的矩阵  $C (C = [c_{ij}]_{n \times n})$ , 即为规范化直接影响矩阵:

$$C = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n \beta_{ij}} B \quad (3)$$

式中: 每一行相加得到和的最大值为  $\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n \beta_{ij}$ , 规范化处理的结果为  $0 \leq c_{ij} \leq 1$ 。

4) 计算综合影响矩阵  $T (T = [t_{ij}]_{n \times n})$ 。综合影响矩阵表示对矿山人机环系统各因素间的直接影响和间接影响进行综合累加,以确定每个因素相对于人机环系

统中最高水平因素对系统的最终影响:

$$T = C^1 + C^2 + \dots + C^n = \sum_{i=1}^n C^i \quad (4)$$

$0 < c_{ij} < 1$  因此,当  $n \rightarrow \infty$  时,  $C^{n-1} \rightarrow 0$ ,可采用下式进行近似计算:

$$T = C(1 - C)^{-1} \quad (5)$$

5) 计算各事故因素的影响  $f_i$  和被影响度  $e_i$ 。基于式(4)综合影响矩阵  $T$ ,将元素每行的数值相加得到因素影响度  $f_i$ ,影响度  $f_i$  表示元素  $c$  对除自身外,所有元素的综合影响度,其中包含直接的和间接的影响,如式(6)所示;基于综合影响矩阵  $T$ ,将元素每列的数值相加得到因素被影响度  $e_i$ ,被影响度  $e_i$  表示元素  $i$  除自身外,所有元素的综合影响度,如式(7)所示。

$$f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$e_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} (j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

6) 计算中心度  $M_i$  和原因度  $N_i$ 。影响度  $f_i$  和被影响度  $e_i$  相加得到元素  $i$  的中心度,影响度  $f_i$  和被影响度  $e_i$  相减得到元素  $i$  原因度。

$$M_i = f_i + e_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

$$N_i = f_i - e_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

7) 绘制原因结果图,以中心度为横坐标,原因度为纵坐标绘制,标出各事故因素在笛卡儿坐标系上的位置,就可以在图上分析地下金属矿山人机环系统安全事故因素的重要度和属性。

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

$$H = I + T \quad (10)$$

式中:  $I$  为单位矩阵。

9) 为得到标准化的可达矩阵,需要对整体影响矩阵中的元素进行处理,给定阈值  $\lambda$ ,计算可达矩阵  $K(K = [k_{ij}]_{n \times n})$ :

$$k_{ij} = 1 \text{ if } h_{ij} \geq \lambda (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

$$k_{ij} = 0 \text{ if } h_{ij} < \lambda (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

$\lambda$  的取值直接影响可达矩阵构成及后续的矿山层次结构划分,在经验的基础上,对取值参数进行优化。

10) 对可达矩阵  $K$  进行级间划分,即将不同事故因素划分到不同层次,其中可达集合、前因集合、最高级要素集等主要名词的概念表述如下:

①可达集合:表示在可达矩阵  $K$  的第  $i$  行中,将所有元素为 1 的列对应的要素所组成的集合,定义为事故因素  $a_i$  的可达集合,用  $R_i$  表示。

②前因集合:表示在可达矩阵  $K$  第  $i$  列中,将所有元素为 1 的行所对应的要素组成的集合,定义为事故因素  $a_i$  的前因集合,用  $S_i$  表示。

③最高级要素集:若  $R_i = R_i \cap S_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ,

则  $R_i$  为最高级要素。由此定义可知,当  $R_i$  为最高级要素集时,  $a_i$  影响的要素(构成  $a_i$  的可达集合)完全包含在影响  $a_i$  的要素(构成  $a_i$  的前因集合)中,这说明,  $R_i$  中的要素均能在  $S_i$  中找到  $a_i$  的前因,也即其他因素可以到达因素  $a_i$ ,而因素  $a_i$  则不能到达其他因素,因此因素  $a_i$  是位于高层级的因素。

④可达集合和前因集合可按下式进行计算:

$$R_i = \{a_j | a_j \in A, k_{ij} \neq 0\} (j = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

$$S_i = \{a_i | a_i \in A, k_{ij} \neq 0\} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

11) 验证公式  $R_i = R_i \cap S_i (i = 1, 2, \dots, n)$  是否成立。若成立,则因素  $a_i$  为最高级因素,这是在矩阵  $K$  中划出第  $i$  行和第  $i$  列。

12) 重复 10) 和 11),直到划出所有因素。

13) 根据事故因素被划出的顺序,绘制因素递阶层次图。从矿山网络的视角,将事故因素当成网络节点;因素间的关联关系视为网络的边;针对可达矩阵  $K$ ,将事故因素  $a_i$  第  $i$  行中元素为 1 的列,所对应的事故因素间的连接视为节点  $a_i$  的出边,表示因素  $a_i$  对其他因素的影响;事故  $a_i$  第  $i$  列中元素为 1 的行,所对应的事故因素间的连接视为节点  $a_i$  的入边,表示因素  $a_i$  受其他因素的影响。

但随着事故因素的增多,级间划分工作量增大,操作和使用复杂性增加,于是采用因素驱动力和依赖性来进行层级划分<sup>[17]</sup>。将可达矩阵  $C$  中行元素之和定义为元素驱动力  $Q_i$ ,表示影响度,可达矩阵  $K$  中的列元素之和定义为元素依赖  $Y_i$ ,表示元素被影响度:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n k_{ij} (j = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

$$Y_i = \sum_{i=1}^n k_{ij} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

计算  $Q_i$  与  $Y_i$  的数值后,可以将可达矩阵  $K$  按照各行的因素驱动力大小,将因素按“从小到大、从上到下”的原则进行排序,再将列因素也按行因素的排列原则进行排序,从而得到重排序的可达矩阵  $K'$ ,在  $K'$  中将驱动力相同的因素作为同一个递阶结构层级因素,获得因素的递阶层次结构。

### 3 实例分析

为了对某地下金属矿山人机系统的安全状况进行分析,采用预先事故分析法,使用设计好的调查问卷表,对该矿的矿长、安全管理人员、安全技术人员、一线矿工进行问卷调查,按较强、强、一般、弱、无 5 个等级分别赋值 4、3、2、1、0 来进行相互影响关系评判,得到 4 个初始直接影响矩阵,通过对 4 位专家所给的铅锌矿直接影响矩阵进行平均求和,消除个体的数据差异,得到矩阵  $B$ ,即最终的初始直接影响矩阵,如表 1 所示。

表 1 初始直接影响矩阵  $B$   
Table 1 Initial direct impact matrix  $B$

$B$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$	$\alpha_9$	$\alpha_{10}$	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{14}$	$\alpha_{15}$
$\alpha_1$	0.00	1.50	0.75	1.75	1.25	1.00	1.25	0.75	2.00	1.00	1.00	1.50	1.00	0.75	1.00
$\alpha_2$	1.25	0.00	1.00	1.25	1.00	1.50	1.25	1.75	1.50	1.50	0.75	1.25	1.25	1.00	1.00
$\alpha_3$	1.50	3.25	0.00	2.50	2.00	1.75	3.00	2.25	1.75	2.75	1.75	3.00	2.25	2.75	2.50
$\alpha_4$	3.00	1.25	1.25	0.00	3.25	2.25	1.50	1.00	2.50	3.00	1.75	1.75	1.00	1.50	1.75
$\alpha_5$	1.25	1.25	0.50	3.75	0.00	2.75	2.75	2.25	2.00	2.00	2.50	1.00	1.25	3.00	1.75
$\alpha_6$	2.75	1.25	0.75	2.00	2.00	0.00	2.00	1.75	2.50	1.00	1.75	1.25	1.75	2.75	0.75
$\alpha_7$	0.75	1.50	2.00	0.50	1.25	2.00	0.00	3.25	3.25	2.25	1.00	2.00	1.25	1.75	0.00
$\alpha_8$	1.00	2.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	0.00	1.00	0.25	0.25	1.50	1.25	1.00	1.50
$\alpha_9$	0.25	2.00	2.00	1.50	2.00	2.75	1.25	1.50	0.00	1.75	1.75	3.25	2.50	2.50	0.00
$\alpha_{10}$	1.75	2.25	3.25	1.50	1.00	2.25	2.00	2.75	1.75	0.00	3.25	2.00	1.25	2.50	1.50
$\alpha_{11}$	1.50	2.00	3.75	2.00	2.50	2.25	1.75	1.25	1.00	3.25	0.00	2.25	1.00	2.75	0.75
$\alpha_{12}$	0.75	2.25	1.00	1.75	2.00	2.50	1.00	1.50	1.00	2.00	1.00	0.00	2.75	3.00	0.00
$\alpha_{13}$	2.50	3.50	2.00	2.75	3.00	3.00	1.25	2.25	2.00	2.25	2.00	3.00	0.00	2.25	1.00
$\alpha_{14}$	2.75	2.25	2.50	2.50	2.25	2.00	1.50	2.75	2.25	2.25	1.75	2.00	2.50	0.00	2.00
$\alpha_{15}$	1.00	1.00	1.75	1.00	1.75	2.00	0.00	0.00	2.50	0.00	0.00	2.00	1.50	1.50	0.00

根据集成 DEMATEL - ISM 方法,在表 1 直接影响矩阵  $B$  中,行和的最大值 33.00,进而根据 3) 步,求得规范化直接影响矩阵  $C$ ;应用 4) 步,计算得到综合影响矩阵  $T$ ;再根据 5) 和 6) 步,计算得出影响度、被影响度、中

心度、原因度、中心度排序,推出各因素属性,计算结果如表 2 所示,原因结果图如图 3 所示。

根据 9) 步,取  $\lambda = 0.23$ ,求得可达矩阵如表 3 所示。

表 2 地下金属矿山人机环系统的 DEMATEL 方法计算结果  
Table 2 DEMATEL method of manhole ring system for underground metal mine

	事故因素	影响度	被影响度	中心度	原因度	中心度排序	因素属性
$\alpha_1$	机械物理部件故障	1.664	2.311	3.975	-0.647	14	结果因素
$\alpha_2$	人为失误	1.766	2.849	4.615	-1.083	12	结果因素
$\alpha_3$	安全文化薄弱	3.331	2.347	5.678	0.984	3	原因因素
$\alpha_4$	人机约束失效	2.732	2.579	5.311	0.153	8	原因因素
$\alpha_5$	非功能性交互	2.810	2.678	5.488	0.132	6	原因因素
$\alpha_6$	重复或遗漏控制	2.507	3.027	5.534	-0.520	5	结果因素
$\alpha_7$	物质交互受阻	2.404	2.367	4.771	0.037	11	原因因素
$\alpha_8$	能量交互受阻	1.584	2.637	4.220	-1.053	13	结果因素
$\alpha_9$	信息交互受阻	2.667	2.765	5.432	-0.098	7	结果因素
$\alpha_{10}$	系统结构脆性	2.988	2.616	5.604	0.372	4	原因因素
$\alpha_{11}$	知识更新慢	2.979	2.097	5.076	0.882	10	原因因素
$\alpha_{12}$	应变能力差	2.446	2.830	5.276	-0.384	9	结果因素
$\alpha_{13}$	认知缺陷	3.455	2.376	5.831	1.079	2	原因因素
$\alpha_{14}$	不确定性	3.186	2.993	6.179	0.193	1	原因因素
$\alpha_{15}$	无事故事件通报	1.702	1.749	3.451	-0.047	15	结果因素

表 3 λ = 0.23 时所得的可达矩阵  
Table 3 the reach of the matrix when λ = 0.23

K	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	α <sub>3</sub>	α <sub>4</sub>	α <sub>5</sub>	α <sub>6</sub>	α <sub>7</sub>	α <sub>8</sub>	α <sub>9</sub>	α <sub>10</sub>	α <sub>11</sub>	α <sub>12</sub>	α <sub>13</sub>	α <sub>14</sub>	α <sub>15</sub>
α <sub>1</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α <sub>2</sub>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α <sub>3</sub>	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0
α <sub>4</sub>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α <sub>5</sub>	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
α <sub>6</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
α <sub>8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
α <sub>9</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
α <sub>10</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
α <sub>11</sub>	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0
α <sub>12</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
α <sub>13</sub>	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
α <sub>14</sub>	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
α <sub>15</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

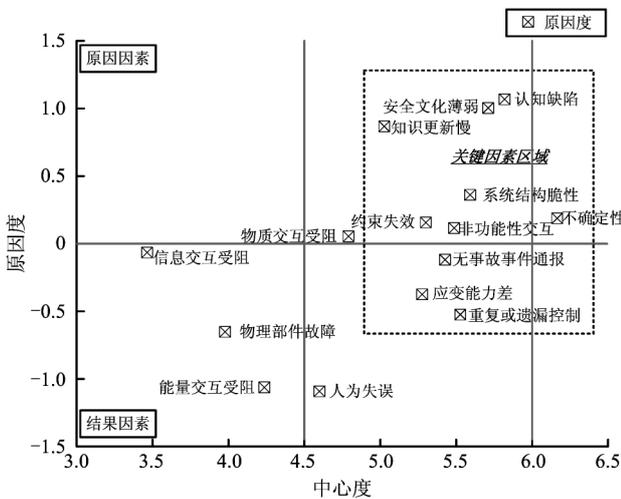


图 3 地下金属矿山人机系统安全事故因素区域

Fig. 3 Underground metal mine man - machine system safety accident factor area map

根据 11) 步, 计算可得依次分出的层次为:

$K_1 = \{ \alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_{12}, \alpha_{15} \}$ ;  $K_2 = \{ \alpha_9, \alpha_{10} \}$ ;  $K_3 = \{ \alpha_{14} \}$ ;  $K_4 = \{ \alpha_3, \alpha_5 \}$ ;  $K_5 = \{ \alpha_{11}, \alpha_{13} \}$ 。根据所划分出的因素层次, 可绘制图 4 所示的事故因素递阶层次结构。

### 4 结论

地下金属矿山人机系统是矿山安全中的重要一环, 科学辨识事故影响因素, 分析影响程度, 并采用 DEMET-

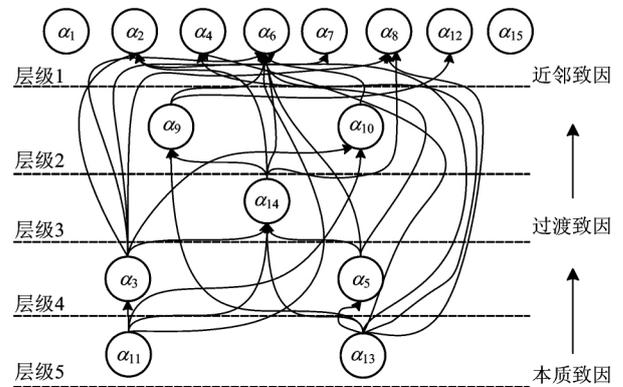


图 4 地下金属矿山人机系统事故安全影响因素模型  
Fig. 4 Model of factors affecting the accident safety of man - machine systems in underground metal mines

AL - ISM 方法对影响因素之间的关系以及各自对地下金属矿山事故的影响程度进行研究, 得到如下结论:

1) 根据地下金属矿山人机系统事故影响因素是否对其他因素造成影响, 可以将其分为原因因素和结果因素。在实际生产中对原因因素进行关注和改进能够快速有效地改善人机系统的安全性。

2) 通过对地下金属矿山人机系统事故影响因素的分析, 发现影响因素呈现多级递阶状分布, 其中人员的知识更新慢和认知缺陷是最本质的原因, 而且通常很容易被忽视; 此外, 安全文化薄弱和非功能性交互也是比较深层次的原因; 人为失误、人机约束失效、重复或遗漏控制、物质交互受阻、能量交互受阻和应变能力差是事

故的近邻致因;机械物理部件失效和无事故事件通报对金属矿山人机系统安全性的影响相对较弱。

3) 认知缺陷、安全文化薄弱、非功能性交互、不确定性、系统结构脆性、重复或遗漏控制等因素是 DEMATEL 方法确定的关键节点,但是关键节点的分布在因素递阶层次结构图每一层都有,这说明在该矿山人机系统中,事故的控制不能只抓近邻致因,只关注一个层级的因素,而应综合考虑对处于地下金属矿山中各个层级的关键因素进行有针对性的重点控制,防止因管理片面出现地下金属矿山人机事故。

#### 参考文献

- [1] 罗春红,谢贤平. 事故致因理论比较分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 3(5): 111-115.  
LUO Chunhong, XIE Xianping. Comparison study of accident-causing theories[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2007, 3(5): 111-115.
- [2] 杜纯,王瑛,汪送等. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统安全事故致因因素分析[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(22): 143-150.  
DU Chun, WANG Ying, WANG Song, et al. Analysis of causes of safety accidents in complex system with integrated DEMATEL / ISM [J]. Journal of Mathematics, 2012, 42(22): 143-150.
- [3] 罗云,黄西菲,许铭. 安全生产科学管理的发展与趋势探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(10): 5-11.  
LUO Yun, HUANG Xifei, XU Ming. Research on the development trend of scientific production of safety production [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(10): 5-11.
- [4] 陈宝智. 安全原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [5] 田水承,李红霞,王莉等. 从三类危险源理论看煤矿事故的频发[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 10-15, 177, 179.  
TIAN Shuicheng, LI Hongxia, WANG Li, et al. Discussion on frequent occurrence of coal mine accident from three kinds of dangerous sources [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2007, 17(1): 10-15, 177, 179.
- [6] 任玉辉. 煤矿员工不安全行为影响因素分析及预控研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- [7] 左红艳. 地下金属矿山开采安全机理辨析及灾害智能预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [8] 汪送,王瑛. 基于脆性结构崩溃的复杂系统安全事故致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2011(5): 138-142.  
WANG Song, WANG Ying. Caused by complex systems based on accidents due to the collapse of the fragile structure analysis [J]. China Safety Science Journal, 2011(5): 138-142.
- [9] 薛明月. 矿工不安全行为发生机理及影响因素研究[D]. 西安科技大学, 2013.
- [10] 邓彬,施式亮. 基于 LOPA 与轨迹交叉理论的系统安全性[J]. 矿业工程研究, 2013(1): 62-66.  
DENG Bin, SHI Shiliang. Study on system security based on lopa and trajectory cross theory [J]. Mining Engineering Research, 2013(1): 62-66.
- [11] 翟国栋. 综采工作面人机环境系统安全研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2011.
- [12] 于洋. 企业安全生产标准化管理模式研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(12): 171-178.  
YU Yang. Research on standardized management mode of enterprise safety production [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(12): 171-178.
- [13] 马强. DEMATEL 方法的矿山安全管理影响因素[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014(7): 912-916.  
MA Qiang. Influencing factors of mine safety management based on DEMATEL method [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2014(7): 912-916.
- [14] 谢文. 基于模糊物元的人-机-环境系统安全评价方法的研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2011.
- [15] 程琛. 综放工作面人-机-环境系统相融性与安全高效开采研究[D]. 廊坊: 华北科技学院, 2015.
- [16] 原润萍. 煤矿安全生产中人-机-环境系统探索[J]. 科技信息, 2013(9): 421-422.  
YUAN Runping. Evaluation of human-machine-environment system in coal mine safety production [J]. Science and Technology Information, 2013(9): 421-422.
- [17] 郝世绵,程淑平,胡月英. 基于 DEMATEL 的机械生产人员行为形成关键因子分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(2): 187-192.  
HAO Shimian, CHENG Shuping, HU Yueying. An key factor analysis of mechanical production personnel formation based on DEMATEL [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(2): 187-192.

(责任编辑:李群)