

基于犹豫度改进的 DEMATEL-ISM 水电工程施工安全人因分析

解文婧, 孙开畅, 马文俊

(三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为有效降低事故发生的概率, 引入决策评价试验法(DEMATEL) 与解释结构模型(ISM) 相结合的风险分析方法, 对水电工程高危施工作业中的人为影响因素进行分析。采用修正过的人为因素分类分析系统(HFACS) 识别出高危施工作业中 12 个主要人为影响因素; 针对专家在决策时的犹豫心理, 引入犹豫度改进 DEMATEL 方法得出因素间的因果关系; 将 DEMATEL 与 ISM 相结合, 对因素间的复杂逻辑关系进行层级划分。该方法可以有效识别施工过程中风险关键因素和作用路径, 为水电工程施工期事故风险分析提供了新的解决思路。

关键词: 水电工程; 施工安全; 人为因素; 犹豫度; DEMATEL; ISM; 分析

Human Factor Analysis of Hydropower Project Construction Safety Based on DEMATEL-ISM Improved by Hesitance

XIE Wenjing, SUN Kaichang, MA Wenjun

(School of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: In order to effectively reduce the probability of accidents, a risk analysis method combining decision evaluation test (DEMATEL) and interpretative structure model (ISM) is introduced to analyze the human factors of high-risk operations in the construction of hydropower projects. The modified human factor classification and analysis system (HFACS) is used to identify 12 key human factors in high-risk operations. Aiming at the hesitation psychology of experts in decision-making, the concept of hesitation fuzzy set is introduced, and the causal relationship between factors is obtained by using the hesitation fuzzy DEMATEL method. The DEMATEL is combined with ISM to classify the complex logical relations among factors. This method can effectively identify the key risk factors and action paths in the construction process, and provides a new solution for the safety risk analysis of accidents during the construction period of hydropower projects.

Key Words: hydraulic engineering; construction safety; human factor; hesitance; DEMATEL; ISM; analysis

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2021)05-0083-05

0 引言

水电工程有着建设周期较长、施工期间环境复杂、作业任务交叉、参与主体多等多方面风险因素影响, 具有事故高发和高危的特性。因此, 为了降低水电工程高危施工作业事故发生率, 针对水电工程施工的安全风险分析十分必要。近年来, 随着水电工程施工规模的逐渐扩大, 其施工安全管理也被国家及各地政府对给予了更高的重视度, 科学工作者们对水电工程施工安全风险也采取了不同的方法分析。曾凡飞从保护层分析方法(LOPA) 和综合危险与可操作性研究方法(HAZOP) 的基础上辨识出水电工程施工中的空间冲突风险, 评估分析了水电工程

施工过程中空间冲突^[1]。李蓉等参考近些年来各行业中经常采用的安全风险评价方法后, 提出基于风险度的水利安全综合评估方法, 建立了评估指标体系和模型^[2]。沈晓钧等以风险事件为基础, 以引汉济渭工程泄水系统风险防控为目标, 基于故障树对风险的成因进行分析, 建立了系统失效的贝叶斯网络^[3]。游涛等提出了网络分析法对水利工程施工安

收稿日期: 2020-10-10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0805100)

作者简介: 解文婧(1995—), 女(土家族), 湖北恩施人, 硕士研究生, 主要从事水利工程施工作业安全风险研究; 孙开畅(通讯作者)。

全风险进行分析,建立风险因素多准则、多层次的 ANP 结构模型^[4]。以上研究为水电工程施工风险分析提供了丰富的解决方法,但是对于风险因素的层次性和结构性研究较为缺乏。鉴于此,本文结合犹豫模糊偏好的 DEMATEL 和 ISM 构建施工风险分析模型,为水电工程施工期风险管理提供重要的理论支撑和决策参考。

1 基于犹豫度改进的 DEMATEL-ISM 模型

DEMATEL 是一种矩阵分析工具,通过直接比较系统中因素之间的相互联系,求出所有因素之间直接与间接的关系及影响强度并以因果关系图来表示^[5-6]。传统 DEMATEL 方法在描述专家偏好时,因为专家对风险因素间的关联缺乏全面、客观的认识,导致其判断具有犹豫模糊的特性,进而给出的比较结果较为主观随意。因此引入犹豫模糊集概念^[7-8],它能够从语言评价术语的隶属度和非隶属度两个方面来判断评价情况,更准确地量化专家的信息,有效提高专家在评估风险因素间强度时的精准度。解释结构模型^[9](ISM)是一种结构模型化技术,它将系统中抽象化的因素顺序转变为层级结构图。水电工程施工过程不确定性强且关系复杂,有众多的安全影响因素,难以系统的分析出各个因素间的相互作用以及层次结构关系。利用 ISM 模型对各影响因素进行层次划分,可以得到更加清晰的因素间相互作用路径。传统 ISM 方法虽然能通过层级结构图来反映系统的基础因素和根本因素,却不能识别各个因素在系统中发挥的作用大小,而引入基于犹豫模糊的 DEMATEL 法可以更加精确地描述出解释结构模型中两两因素间的影响关系强度。

该模型利用犹豫模糊 DEMATEL 方法得出综合影响矩阵,再通过解释结构模型得出整体影响矩阵,将给定阈值进行优化,从而得到可达矩阵,最终划分事故之间的层次结构^[10]。如此将二者有机结合既能更全面地明确水利工程施工期安全风险影响因素间的逻辑关系与层次结构,又能更加精准地辨识出其中的核心要素以及因素类别。

1.1 犹豫模糊判断矩阵

Torra 将经典模糊集改进为犹豫模糊集(Hesitant fuzzy set, HFS)^[11],犹豫模糊集最大的特点就是包含了犹豫度的信息,犹豫度描述了专家对于决策信息的不确定程度。因此,引入风险偏好系数 β , $\beta \in [0, 1]$ 。当 $\beta > 0.5$ 时,代表专家偏好风险, β 值越大表示专家风险偏好程度越大;当 $\beta < 0.5$ 时,代表专家规避风险的, β 值越小表示专家对于风险规避程度越小;当 $\beta = 0.5$ 时,代表专家是风险中性的。

同时,分别对专家判断过程中的隶属度、非隶属度赋权 1 和 -1,得出犹豫度的权值为 $2\beta - 1$,由此得到基于犹豫度的犹豫模糊数函数 $z_{ij}^{[12]}$,即

$$z_{ij} = \mu_{ij} - \gamma_{ij} + (2\beta - 1)\pi_{ij}, \beta \in [0, 1] \quad (1)$$

设 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 为方案集,决策者对 n 种方案进行两两比较,并构造判断矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times n}$, $z_{ij} = (\mu_{ij}, \gamma_{ij}, \pi_{ij})$, $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。式中, μ_{ij} 为决策者对方案 y_i 和 y_j 进行比较时偏好 y_i 的程度; γ_{ij} 为决策者偏好 y_j 的程度; π_{ij} 为决策者的犹豫度或不确定程度, $\mu_{ij}, \gamma_{ij} \in [0, 1]$, $\mu_{ij} + \gamma_{ij} \leq 1$, $\pi_{ij} = 1 - \mu_{ij} - \gamma_{ij}$ 则称 Z 为犹豫模糊判断矩阵。

1.2 改进的 DEMATEL-ISM 方法

基于犹豫模糊偏好的改进 DEMATEL-ISM 法的水电施工事故安全风险分析建模步骤如下:

(1) 确定水利施工安全风险因素指标体系 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, 设有 n 位专家,得到专家集。 M_k 表示第 k 位专家。

(2) 每位专家对任意两个指标之间的关系予以判断,由犹豫模糊数代替原有的点估计表达专家对指标两两比较之间的偏好程度。 $Z_{ij}^k = (\mu_{ij}^k, \gamma_{ij}^k, \pi_{ij}^k)$ 表示专家 M_k 给出的指标 C_i 和 C_j 进行两两比较的偏好程度。专家 M_k 给出的犹豫模糊直接影响矩阵为

$$Z^k = [z_{ij}^k] = \begin{bmatrix} (\mu_{11}^k, \gamma_{11}^k, \pi_{11}^k) & \dots & (\mu_{1n}^k, \gamma_{1n}^k, \pi_{1n}^k) \\ (\mu_{21}^k, \gamma_{21}^k, \pi_{21}^k) & \dots & (\mu_{2n}^k, \gamma_{2n}^k, \pi_{2n}^k) \\ \vdots & & \vdots \\ (\mu_{n1}^k, \gamma_{n1}^k, \pi_{n1}^k) & \dots & (\mu_{nn}^k, \gamma_{nn}^k, \pi_{nn}^k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

(3) 利用基于评价犹豫度^[13]的专家权重,计算加权影响关系矩阵 Z ,集成单位专家犹豫模糊偏好决策矩阵。专家对方案评价的不确定程度即为专家评价信息的犹豫度,专家 M_k 评价整体犹豫度 π_k 满足

$$\pi_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \pi_{ij}^k \quad (3)$$

专家 M_k 的客观权重 $\omega_k = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 为所有决策专家权重的集合

$$\omega_k = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{\pi_k}} \quad (4)$$

由 n 位专家决策结果得到的集成加权犹豫模糊偏好决策矩阵 Z 为

$$Z = \sum_{k=1}^n \omega_k z^k = (z_{ij})_{n \times n} \quad z_{ij} = (\mu_{ij}, \gamma_{ij}, \pi_{ij})$$

$$\mu_{ij} = \sum_{k=1}^n \omega_k \mu_{ij}^k \quad \gamma_{ij} = \sum_{k=1}^n \omega_k \gamma_{ij}^k \quad \pi_{ij} = \sum_{k=1}^n \omega_k \pi_{ij}^k$$

$$(i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

(4) 引入风险偏好系数 β 将犹豫模糊矩阵转化为实数矩阵, 由式 (1) 转化后的实数矩阵

$$\bar{Z} = (\bar{z}_{ij})_{n \times n}, \bar{z}_{ij} = \mu_{ij} - \gamma_{ij} + (2\beta - 1)\pi_{ij}, \beta \in [0, 1] \quad (6)$$

式中, \bar{z}_{ij} 为将决策专家的犹豫度转化为确定的偏好度。

(5) 由实数矩阵计算标准化影响关系矩阵 $C = [c_{ij}]_{n \times n}$, 其中

$$c_{ij} = \frac{\bar{z}_{ij}}{\max \sum \{\bar{z}_{ij} \mid 1 \leq i \leq n\}} \quad (7)$$

式中, $\max \sum \{\bar{z}_{ij} \mid 1 \leq i \leq n\}$ 为初始矩阵 \bar{Z} 中每一行相加得到的和最大值。

(6) 由标准化影响关系矩阵得出综合影响关系矩阵

$$T = C(I - C)^{-1} \quad (8)$$

式中, I 为单位矩阵。

(7) 由综合影响关系矩阵得出整体影响关系矩阵

$$H = I + T \quad (9)$$

(8) 引入阈值 λ , 计算可达矩阵。引入阈值 λ 去掉了系统中影响程度较小的值, 将综合影响关系矩阵中所有数值的均值和标准差相加, 得到阈值 λ [14]。 $k_{ij} = 1$ 表示因素 C_i 能够影响因素 C_j , $k_{ij} = 0$ 表示因素 C_i 不能影响因素 C_j 。

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & h_{ij} \geq \lambda, (i, j = 1, 2, \dots, n) \\ 0, & h_{ij} \leq \lambda, (i, j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (10)$$

(9) 确定可达矩阵的可达集合 P_i 和先行集合 Q_i 。

$$P_i = \{C_j \mid C_j \in C, k_{ij} \neq 0\}, (j = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

$$Q_i = \{C_i \mid C_i \in C, k_{ij} \neq 0\}, (i = 1, 2, \dots, n)$$

依据 $P_i = P_i \cap Q_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 划分风险因素之间的层次结构。

1.3 MICMAC 方法

交叉影响矩阵相乘法 (MICMAC) 是通过考虑系统中因素的影响路径和循环层次, 研究因素间的相互关系, 通过 ISM 模型中可达矩阵的元素之和来计算各因素的驱动力和依赖度, 并进行分类, 从而更加便于理解因素在系统中的实质作用 [15]。其计算步骤为:

(1) 计算各因素的驱动力 DR_i 和依赖度 DE_j 。

$$DR_i = \sum_{j=1}^n k_{ij}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

$$DE_j = \sum_{i=1}^n k_{ij}, (j = 1, 2, \dots, n)$$

(2) 根据各因素的驱动力和依赖度, 将指标分成自治类 (Autonomous)、依赖类 (Dependents)、联系类 (Linkage) 和独立类 (Independent) 4 个类别。自治类因素由于具有较低的驱动力和依赖

度, 因此该类因素与其他因素几乎没有相互作用; 依赖类因素由于其较低的驱动力和较高的依赖度, 对其他因素有很强的依赖性; 联系类因素具有很高的驱动力和依赖度, 因此会影响其他因素, 也会受到其他因素的影响; 独立类因素具有较强的驱动力和较弱的依赖度, 此类因素对其他因素有很强的影响力。

2 工程实例分析

2.1 水电施工安全风险人为因素指标体系

基于因素完整、层次分明、简明科学的原则, 根据《水利水电工程图施工安全风险管理》[16] 修订后的水电工程施工 HFACS 框架。结合该工程的实际情况, 将框架中的 13 个风险指标中的班组管理和人员素质指标整合为人员素质指标以更加贴合本工程的实际情况, 由该框架并结合本工程得到的指标如图 1 所示。

以某水电工程施工企业参与建设的大型水电工程中 32 起典型高危作业事故为例, 从企业组织影响, 安全监管, 不安全行为的前提条件, 施工人员的不安全行为 4 个方面选取各类别中影响较大或后果严重的人为因素, 建立水电工程施工期风险因素指标体系: $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{12}\}$ 。

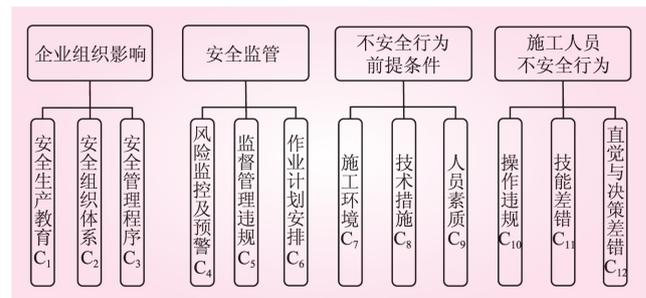


图 1 水电施工安全风险因素

2.2 犹豫模糊 DEMATEL-ISM 计算过程

(1) 邀请 3 位专家 $M = \{M_1, M_2, M_3\}$ 针对“指标 C_i 对 C_j 的影响程度”进行分析, 由式 (2) 分别得到基于评价犹豫度的专家决策矩阵 $Z^{(1)}$ 、 $Z^{(2)}$ 、 $Z^{(3)}$ 。由式 (3)、(4) 计算得到基于评价犹豫度的专家权重为 $\omega = (0.322, 0.320, 0.358)$ 。

(2) 由式 (5) 得到专家的加权影响关系矩阵 Z , 根据式 (6) 引入风险偏好系数 β , 设定风险偏好系数为 0.7, 即偏好风险, 将基于犹豫度的决策矩阵 Z 转化为实数矩阵 \bar{Z} 。由此得到各指标之间的影响关系, 如图 2 所示。

(3) 由式 (5)、(6) 计算综合关系矩阵 H 与整体关系矩阵 T 。

$$T = \begin{pmatrix} -0.039 & -0.070 & 0.007 & -0.084 & 0.004 & -0.029 & -0.047 & -0.013 & 0.001 & -0.056 & -0.041 & 0.117 \\ 0.059 & -0.022 & -0.022 & -0.050 & -0.005 & -0.022 & -0.085 & -0.016 & 0.041 & -0.045 & 0.001 & 0.042 \\ 0.062 & 0.059 & -0.012 & -0.044 & -0.007 & 0.041 & 0.075 & 0.012 & -0.023 & -0.030 & -0.025 & 0.017 \\ 0.102 & 0.040 & 0.020 & -0.034 & -0.003 & 0.050 & -0.018 & -0.057 & 0.006 & -0.096 & -0.072 & -0.022 \\ 0.035 & 0.022 & 0.015 & -0.006 & -0.037 & -0.022 & -0.037 & -0.036 & -0.066 & -0.084 & -0.066 & -0.076 \\ 0.017 & -0.009 & -0.041 & -0.050 & -0.006 & -0.037 & 0.001 & -0.072 & -0.031 & -0.117 & -0.031 & -0.055 \\ 0.102 & 0.094 & -0.064 & 0.034 & 0.019 & 0.002 & -0.037 & 0.005 & 0.028 & -0.042 & -0.084 & -0.067 \\ 0.035 & 0.038 & 0.015 & 0.038 & 0.039 & 0.074 & 0.004 & -0.025 & 0.001 & 0.003 & -0.131 & -0.026 \\ 0.013 & 0.046 & 0.059 & 0.014 & 0.082 & 0.039 & -0.026 & 0.104 & -0.015 & -0.009 & 0.070 & -0.061 \\ 0.131 & 0.163 & 0.087 & 0.095 & 0.139 & 0.155 & 0.048 & 0.079 & 0.056 & -0.058 & -0.033 & 0.026 \\ 0.109 & 0.062 & 0.043 & 0.079 & 0.146 & 0.112 & 0.092 & 0.129 & 0.058 & -0.024 & -0.064 & 0.087 \\ -0.061 & 0.064 & 0.048 & 0.024 & 0.086 & 0.045 & 0.076 & -0.035 & 0.101 & -0.035 & -0.102 & -0.037 \end{pmatrix}$$

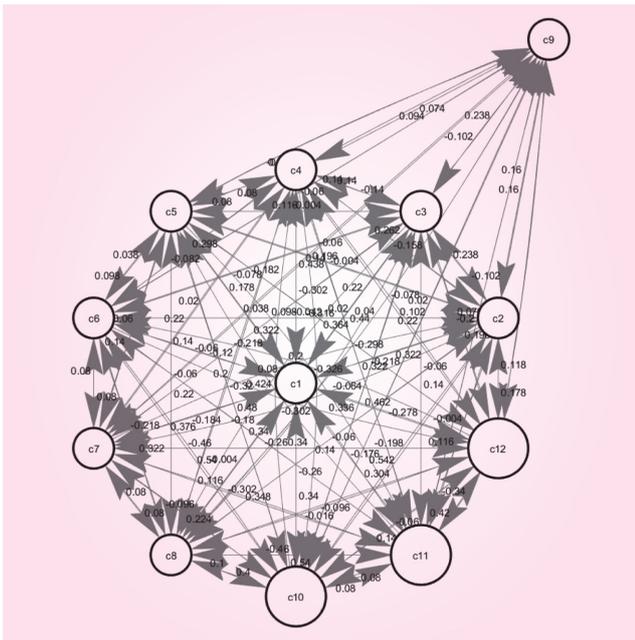


图2 风险因素间影响关系

(4) 利用综合影响关系矩阵中的各个元素，计算出阈值 $\lambda = 0.0683$ ，得到可达矩阵 K 。根据可达矩阵 K 中的各个元素，用箭头将每个各影响因素连接，进而得出如具有相互作用关系的解释结构模型如图3所示。

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(5) 根据可达矩阵 K ，计算水利施工安全风险影响因素的驱动力和依赖度。根据驱动力和依赖度的数值建立笛卡尔坐标系，绘制出驱动力—依赖度分类如图4所示。

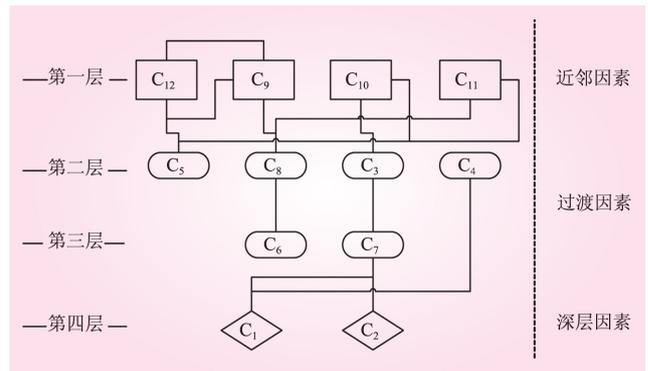


图3 水电施工风险因素多级递阶层次模型

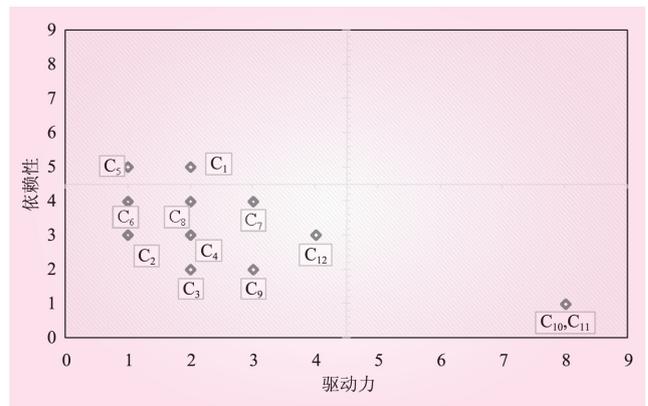


图4 风险因素驱动力—依赖性分类

2.3 计算结果分析

2.3.1 多级递阶层次模型分析

由图3可知，近邻因素位于模型中的第1层。包括 C_9 、 C_{10} 、 C_{11} 、 C_{12} 这4个风险因素是导致水电工程施工事故的直接原因。过渡因素位于模型的中间层，包括 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 、 C_8 等6个风险影响因素，这6个因素将本质因素与近邻因素有序连接起来，是

间接导致事故发生的风险因素。本质因素位于模型底层, 包括 C_1 、 C_2 这 2 个风险因素, 其为风险产生原因的宏观表现形式。

2.3.2 驱动力—依赖度分类图分析

由图 4 可以看出, 属于自治类别(坐标系中第 I 象限)有 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_6 、 C_7 、 C_8 、 C_9 、 C_{12} 等 7 个风险因素。其中, C_2 、 C_3 为企业组织影响中的因素, C_6 则属于安全监管, C_7 、 C_8 、 C_9 属于不安全行为前提条件。由此可知, 企业组织管理、安全监管和不安全行为前提条件之间是相互影响的动态关系, 当企业组织管理出现问题, 会导致安全监管力度下降, 从而施工人员不安全行为的前提条件提高, 会较大程度地增加事故发生的可能性。这类因素大部分位于 ISM 模型中的第 2~3 层, 为过渡因素, 与自治类的概念不谋而合。

属于独立类(第 II 象限)的风险因素有 C_{10} 和 C_{11} 这 2 个。 C_{10} 和 C_{11} 属于人为影响因素中的施工人员不安全行为因素, 具有较大的驱动力, 同时它们在 ISM 模型中位于第一层, 是导致事故发生的直接原因。

属于依赖类(第 IV 象限)的风险因素有 C_1 和 C_5 这 2 个。 C_1 属于企业组织影响, C_5 属于企业组织安全监管, 为深层次的风险因素, 其会通过影响其他致因因素从而导致事故的发生, 需要依赖其他因素的解决而被解决。如水利部门加强对各水利建设企业的管理, 从而能提高水利建设行业的整体安全意识, 进而降低由企业影响导致的水利施工事故发生率。

3 结论

(1) 针对传统的 DEMATEL 方法在反映专家判断的不确定性与犹豫程度不足的缺点, 引入犹豫模糊集以及犹豫度的概念, 对 DEMATEL 法进行改进, 进而构建出更加适合于表达因素间影响程度的因果关系统图。

(2) 利用修正后的水电工程施工 HFACS 框架辨识出高危作业事故中的人为因素作为风险指标, 依据解释结构模型, 识别出导致事故发生的近邻因素、过渡因素以及本质因素, 建立适用于水电工程高危作业施工风险因素的多级递阶层次模型。

(3) 将 ISM 层次结构模型图与 MICMAC 建立的驱动力—依赖度分类图进行结合分析, 探究各个安全影响因素风险之间的动态联系, 清晰得出关键因素所处的层级和作用路径。该方法不仅适用于水电工程施工安全分析, 对其他领域内的安全管理研究均具有适用性。

参考文献:

[1] 曾凡飞. HAZOP-LOPA 法在水利工程空间冲突风险评估中的应用

[J]. 水利规划与设计, 2017(2): 65-68.

- [2] 李蓉, 马建新, 黄诗峰, 等. 基于风险度的水利安全评估研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(S1): 210-213.
- [3] 沈晓钧, 雷冠军, 殷峻暹. 引汉济渭工程泄水系统失效风险计算[J]. 水利水电技术, 2018, 49(6): 126-134.
- [4] 游涛, 吴雨晴, 李海交, 等. 网络分析法在水利工程施工安全风险分析中的应用[J]. 科技资讯, 2017, 15(8): 109-111.
- [5] MAVI R K, STANDING C. Critical success factors of sustainable project management in construction: A fuzzy DEMATEL-ANP approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 194: 751-765.
- [6] HO T C, CHIU R H, CHUNG C C, et al. Key influence factors for ocean freight forwarders selecting container shipping lines using the revised DEMATEL approach[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2017, 25(3): 299-310.
- [7] 谭倩云, 冯向前, 张华荣. 基于可能度的犹豫模糊语言 PROMETHEE 方法[J]. 统计与决策, 2016(9): 82-85.
- [8] 孙开畅, 马文俊, 李权, 等. 基于直觉模糊信息 DEMATEL 法的水电站事故应急能力评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(1): 23-29.
- [9] 胡嘉伟, 彭伟, 薛韦一. 基于 ISM 法的公路隧道火灾事故致因研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(2): 57-62.
- [10] 王文和, 朱正祥, 米红甫, 等. 基于 DEMATEL-ISM 的城市地下综合管廊火灾事故影响因素研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(3): 793-800.
- [11] TORRA V, NARUKAWA Y. On hesitant fuzzy sets and decision[C]//IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Jeju Island, Korea, 2009.
- [12] TORRA V. Hesitant fuzzy sets[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2010, 25(6): 529-539.
- [13] 林原, 战仁军, 吴虎胜. 基于犹豫度和相似度的专家权重确定方法及其应用[J/OL]. 控制与决策: 1-8(2020-02-20) [2020-10-06]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1382>.
- [14] 孙晶. 复杂系统 DEMATEL 阈值确定方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [15] 秦旋, 李奥蕾, 张榕, 等. 建筑工业化影响因素层级结构关系研究: 来自厦门的调查[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2017, 23(6): 30-40.
- [16] 孙开畅, 周剑岚. 水利水电工程施工安全风险管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

(责任编辑 焦雪梅)



(上接第 82 页)

- [8] DiBIAGIO E, KJOERNSLI B. Instrumentation of Norwegian embankment dams[C]//15th International Commission on Large Dams Congress, Q56, R57: 1071-1101.
- [9] 周俊杰, 王登银, 王樱峻, 等. 华东天荒坪抽水蓄能电站沥青混凝土面板老化与裂缝成因、检修标准及修补工艺研究报告[R]. 杭州: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 2015.

(责任编辑 王琪)