

# 基于 DEMATEL-ISM 方法的水电站机组检修作业 安全事故致因链分析

晋良海<sup>1,2,3,4</sup>, 张荣昊<sup>1</sup>, 明华军<sup>1</sup>, 李钰涵<sup>1</sup>, 李晨曦<sup>1</sup>, 邹颂香<sup>1</sup>

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 水电工程施工与管理湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;  
3. 三峡大学安全生产标准化评审中心, 湖北 宜昌 443002; 4. 湖北安环科技有限公司, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**针对水电站机组检修作业种类和危险因素多、安全事故频发等问题,通过文献挖掘与专家访谈方式,对水电站机组检修作业安全影响因素类别进行了划分。基于 DEMATEL-ISM 方法,构建了安全事故致因多层次递阶 ISM 模型来确定事故致因因素层级,通过剖析事故致因因素的中心度和权重,挖掘关键致因因素和推求事故致因链的路径权重,厘定关键致因链。采用该模型对某水电站致因链进行了分析,结果表明,安全检查不到位为关键致因因素,“安全检查不到位→违规作业→设备的问题→粉尘、油漆等有害物质”为关键致因链。

**关键词:**水电站机组检修; DEMATEL-ISM 方法; 事故致因链; 致因因素权重; 路径权重

中图分类号: TV738

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)01-0037-07

**Analysis of safety accident causation chain in hydropower station maintenance operations based on DEMATEL-ISM method**//JIN Lianghai<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Ronghao<sup>1</sup>, MING Huajun<sup>1</sup>, LI Yuhuan<sup>1</sup>, LI Chenxi<sup>1</sup>, ZOU Songxiang<sup>1</sup>  
(1. College of Water Conservancy and Environment, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory of Hydropower Engineering Construction and Management, Yichang 443002, China; 3. Safety Production Standardization Evaluation Center, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. Hubei Anhuan Technology Co., Ltd., Yichang 443002, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of diversified maintenance operations, numerous risk factors, and frequent safety accidents in hydropower station units, the safety factors affecting the maintenance operations of hydropower station units are classified through literature mining and expert interviews. Based on the DEMATEL-ISM method, a multi-level hierarchical ISM model of safety accident causes was constructed to determine the level of accident causes. By analyzing the centrality and weight of accident causes, mining the key causal factors and deriving the path weights of the accident causal chain, the key causal chain was determined. The model was used to analyze the key causal chain of a hydropower station as an example. The results show that inadequate safety inspections are the key cause factor, and the key causation chain is inadequate safety inspections→illegal operations→equipment problems→dusts, paints, and other harmful substances.

**Key words:** hydropower station unit maintenance; DEMATEL-ISM method; accident causation chain; causal factor weights; path weights

我国水电装机容量及增量居世界首位<sup>[1]</sup>, 机组检修工作量巨大。水电站机组检修是高危作业, 通常具有作业种类繁多、空间有限、工期紧张、危险因素多等特点<sup>[2]</sup>, 甚至会引起安全事故。例如, 2022年1月12日四川关州坝透水事故是由于3号机组检修时厂房引水管堵头阀门爆裂造成, 事故导致水淹厂房, 9人死亡, 直接经济损失约4435.5万元。因此, 水电站机组检修作业安全问题

受到高度关注。

目前, 对水电站机组检修问题的研究大多集中在发电机设备检修维护<sup>[3-4]</sup>、水电站检修模式和方法<sup>[5-6]</sup>等方面, 对水电站机组检修安全研究较少。邹林峰等<sup>[7]</sup>分析了三峡水电站右岸机组检修工作特点, 研究了检修过程中排水系统设备、调速系统、技术供水系统等的潜在风险, 并提出了相应防范对策。何文<sup>[8]</sup>为评价水电站检修机组吊装安全风险, 建立

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(52179136); 教育部人文社会科学规划基金项目(21YJA630038)

**作者简介:** 晋良海(1973—), 男, 教授, 博士, 主要从事建设项目运筹管理与安全工效学研究。E-mail: jinlianghai@ctgu.edu.com

**通信作者:** 张荣昊(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水利水电工程项目管理研究。E-mail: 1612955819@qq.com

了水电站检修机组吊装安全风险评价指标体系和模糊综合评价模型,并对水布垭水电站 3 号机组检修转子吊装的安全风险进行了验证分析。以上研究对水电站机组检修安全管理具有一定的理论支撑作用,但未能系统地考虑水电站机组检修作业安全影响因素及事故致因机理。

在安全事故致因研究方面,研究人员利用文本挖掘<sup>[9-10]</sup>、贝叶斯网络<sup>[11]</sup>和 DEMATEL-ISM<sup>[12]</sup>等方法,从重要程度角度对安全事故致因进行研究。例如:孙开畅等<sup>[11]</sup>建立事故树和贝叶斯网络模型,对水利工程施工高危作业事故中的人为因素进行了定量分析,得到各因素的相对重要度,确定了引发水利工程施工中高危作业事故的最主要因素;陈赞等<sup>[12]</sup>从安全事故致因重要程度方面入手,使用 DEMATEL-ISM 方法建立了交通隧道施工事故致因多级递阶结构模型,确定了关键致因因素,从定性角度构建了关键致因影响链,并对其进行了分析。以上研究对安全事故致因进行了定量分析,但未从路径权重角度定量分析事故致因链的重要性。

本文以水电站机组检修作业为研究对象,确定水电站机组检修作业安全影响因素,耦合决策试验与评价实验室法(decision making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)和解释结构模型法(interpretative structural modeling method, ISM)两种方法,建立水电站机组检修作业安全事故致因多层次递阶模型,确定关键致因因素,归一化处理事故致因因素的权重,推求事故致因链的路径权重,定量分析事故的关键致因链,以期揭示水电站机组检修作业安全事故致因机理。

### 1 检修作业安全影响因素

水电站机组检修是指对水电站发电机组进行检查、修理,以保障发电机组安全运行。根据机组检修和停用时间不同,可将检修等级划分为 A 级、B 级、C 级、D 级 4 类。水电站机组检修具有以下特点:①检修工作专业性强,对检修人员要求高;②组件构件种类繁多、数量多,检修规范、规程、工器具不同;③作业空间有限,环境条件差;④不同工种之间交叉作业冲突激烈,安全管理难度大。

以“水电站”“检修”为检索词在中国知网进行检索,以核心期刊及以上、硕博论文为限制条件,出版时间截至 2022 年,得到 354 篇文献。采用“hydropower station”“maintenance”为检索词,在 Web of Science (WOS)核心数据库进行检索,出版时间截至 2022 年,得到 43 篇文献。汇总、整理搜集到的 397 篇文献,从文献的研究框架、研究内容等方面,围绕“安全”“事故”“致因”“safe”“accident”“cause”等关键词,进一步筛选文献,汇总筛选文献并进行梳理与归纳,识别水电站检修作业安全事故致因,结果见表 1。

根据表 1,结合水电站检修作业危害辨识与风险评估数据<sup>[15]</sup>,参考水电站机组检修领域相关专家意见,确定水电站检修作业安全事故致因因素。针对水电站机组检修作业特点,依据 GB/T 13861—2022《生产过程和有害因素分类与代码》,将水电站机组检修作业安全事故致因因素分为人的因素、物的因素、环境因素、管理因素 4 个一级指标和 20 个二级指标,见表 2。

### 2 事故致因关联关系的多层次递阶 ISM 模型构建

DEMATEL 是结合因果关系图和矩阵运算,用于解决复杂系统中多因素相互影响程度的一种方法<sup>[16]</sup>。ISM 是一种构建多层次递阶结构模型的方法,用于分析具有多种影响因素的复杂系统<sup>[17]</sup>。耦合 DEMATEL 和 ISM 方法得到 DEMATEL-ISM 方法,对水电站机组检修安全作业事故致因进行分析,一方面可以识别关键事故致因因素及其影响程度,另一方面可以明确事故致因因素之间的逻辑关系与层次结构。

事故的发生大多是多种因素共同作用的结果,这些因素彼此联系而非独立存在<sup>[18]</sup>。为探究水电站机组检修过程中事故致因因素的相互影响关系,本文基于 DEMATEL-ISM 方法进行关联效应分析,构建多层次递阶 ISM 模型对相互关联的事故致因因素之间的联系进行深层次剖析,明确水电站机组检修作业安全事故致因的层次结构。建模步骤如下:

表 1 水电站机组检修作业安全事故致因识别结果

| 代表性文献                | 影响因素                                                                                  |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 邹林峰等 <sup>[7]</sup>  | 设备故障或异常、机组转动或蠕动、人为疏忽、设备质量出现问题、人为操作不当等                                                 |
| 何文 <sup>[8]</sup>    | 人员健康状况、人员专业技能水平及管理能力和人员安全责任意识、人员疲劳程度、吊装设备及构件可靠性、安全措施、安全规章制度、安全培训教育、安全检查、作业空间、作业能见度等   |
| 周晓东等 <sup>[13]</sup> | 工人技术水平及素养、工器具、标准化作业、人员安全意识、安全培训、作业流程等                                                 |
| 陈林等 <sup>[14]</sup>  | 施工作业人员不安全行为、安全管理人员及特殊工种不持证上岗、未戴防护手套、高空作业、有害气体排放、焊接时无防火措施、未严格实施动火作业审批制度、线路漏电、施工区域光线不足等 |

表 2 水电站机组检修作业安全事故致因因素

| 一级指标 | 二级指标          | 二级指标释义                                                  |
|------|---------------|---------------------------------------------------------|
| 人的因素 | 安全意识淡薄        | 检修作业人员缺乏安全意识,对安全重视程度不足                                  |
|      | 不按规定使用个体防护用品  | 作业人员不正确穿戴个体防护用品,如不按规定穿防滑鞋等                              |
|      | 人员专业技能及素质不高   | 检修作业人员专业技能、经验不满足检修作业要求                                  |
|      | 高处作业          | 人员在距坠落基准面 2 m 及以上的有可能坠落的高处进行作业,如人员在进行水导轴承及主轴检修时需在脚手架上作业 |
|      | 疲劳作业          | 人员由于连续作业致使身心劳累而引起作业机能下降的现象                              |
| 物的因素 | 违规作业          | 人员违反操作规程、规章作业,如人员不按检修规程及验收标准进行作业                        |
|      | 无证上岗          | 人员未持证上岗,如特种设备作业人员未持作业资格证进行检修作业                          |
|      | 安全防护设施不足      | 未配备足量的安全防护设施,如缺少通风设备等                                   |
|      | 质量不合格的工器具     | 检修工器具质量较差,不满足检修作业规范,如角磨机角磨片磨损严重                         |
| 环境因素 | 高处落物          | 高处掉落能伤害作业人员的物体                                          |
|      | 设备的问题         | 水电站发电机组设备存在安全隐患,如转动的设备等                                 |
|      | 能量意外释放        | 作业中发生意外释放的能量,如试验电、高压试验电等                                |
| 管理因素 | 作业条件、作业环境不良   | 发电厂房检修作业条件、环境较差,不利于检修作业,如:狭小的作业空间等                      |
|      | 粉尘、油漆等有害物质    | 检修作业可能出现的有害物质,如锰蒸汽、挥发的油漆等                               |
| 管理因素 | 安全检查不到位       | 检修单位安全检查力度不足                                            |
|      | 安全监护不到位       | 对高风险作业安全监护流于形式                                          |
|      | 现场管理混乱        | 现场管理杂乱无章,如未安排熟练的检修作业人员进行检修                              |
|      | 未进行安全交底       | 未告知检修作业人员作业中可能面临的安全风险                                   |
|      | 安全生产责任制度落实不到位 | 安全生产责任制度以及操作规程等流于形式,未落实到位                               |
| 管理因素 | 安全教育、培训不充分    | 对作业人员的安全教育、培训力度不够或流于形式,导致人员安全意识淡薄                       |

**步骤 1** 建立直接影响关系矩阵 **A**。为确定各种事故致因因素的相互作用关系<sup>[19]</sup>,建立直接影响关系矩阵 **A**:

$$\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

其中 
$$a_{ij} = \begin{cases} 3 & 67\% < y \leq 100\% \\ 2 & 33\% < y \leq 67\% \\ 1 & 0 < y \leq 33\% \\ 0 & y = 0 \end{cases}$$

式中: $a_{ij}$ 表示检修作业安全事故致因因素间相互影响的量化关系, $a_{ij}=3$ 表示强影响关系, $a_{ij}=2$ 表示中度影响关系, $a_{ij}=1$ 表示弱影响关系, $a_{ij}=0$ 表示无影响关系; $y$ 为所有问卷中认为因素  $Z_i$  对  $Z_j$  有直接影响关系的百分比。

**步骤 2** 计算规范化影响矩阵 **C**。对直接影响关系矩阵 **A** 进行规范化处理,可得规范化影响矩阵 **C**:

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} / \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (2)$$

式中  $\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}$  为直接影响关系矩阵 **A** 的行元素和的最大值。

**步骤 3** 计算综合影响矩阵 **T**。在步骤 2 规范化矩阵基础上,求解综合影响矩阵 **T**:

$$\mathbf{T} = \mathbf{C}(\mathbf{E} - \mathbf{C})^{-1} \quad (3)$$

式中 **E** 为单位矩阵。

**步骤 4** 指标计算。将 **T** 中各行元素相加得到影响度  $F_i$ ,将 **T** 中各列元素相加得到被影响度  $G_i$ ,影响度与被影响度之和为中心度  $P_i$ ,两者之差为原

因度  $Q_i$ ,对各因素的中心度进行归一化处理,得到各因素的 DEMATEL 权重值。

**步骤 5** 计算整体影响矩阵 **H**。在综合影响矩阵 **T** 的基础上,计算整体影响矩阵 **H**:

$$\mathbf{H} = \mathbf{E} + \mathbf{T} \quad (4)$$

**步骤 6** 建立可达矩阵 **M**。确定阈值  $\lambda$ ,建立标准化的可达矩阵 **M**:

$$\mathbf{M} = (m_{ij})_{n \times n} \quad (5)$$

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

式中  $m_{ij}$ 表示因素  $Z_i$  对因素  $Z_j$  的影响, $m_{ij}=1$ 表示有直接影响, $m_{ij}=0$ 表示无直接影响。

**步骤 7** 构造各因素的可达集合  $R(Z_i)$  和前项集合  $S(Z_i)$ 。在可达矩阵 **M** 的基础上,建立各致因因素的可达集合  $R(Z_i)$  和前项集合  $S(Z_i)$ :

$$R(Z_i) = \{Z_i \mid Z_i \in Z, m_{ij} \neq 0\} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$S(Z_i) = \{Z_i \mid Z_i \in Z, m_{ji} \neq 0\} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

**步骤 8** 因素验证。各因素进行验证,若验证成立,则在可达矩阵 **M** 中划去相应的行  $i$  和列  $j$ :

$$R(Z_i) = R(Z_i) \cap S(Z_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

重复步骤 7、8,确定各因素的层级,直到可达矩阵 **M** 中所有因素被划除,建立多层次递阶 ISM 模型。

### 3 案例分析

#### 3.1 工程概况

某水电站位于广西的红水河干流上,安装了 8 台灯泡贯流式水轮发电机组。搜集 2016—2021 年该水电站机组检修作业危害辨识与风险评

估数据10838 条,使用词频分析方法,对水电站机组检修作业危害辨识与风险评估中的致因因素进行词频统计分析。由于 D 级检修为一般性消缺消除,检修作业数据难以获取,本文不考虑 D 级检修。具体原则:筛选 A 级检修作业中词频大于等于 30 次的致因因素,B 级检修作业中词频大于等于 40 次的致因因素,C 级检修作业中词频大于等于 80 次的致因因素,筛选结果见表 3。结合表 2,对表 3 中提取的致因因素进行修正,确定某水电站机组检修作业安

表 3 某水电站机组检修作业安全事故致因因素词频统计

| 致因因素         | 词频  |     |      |
|--------------|-----|-----|------|
|              | A 级 | B 级 | C 级  |
| 质量不合格的工器具    | 465 | 625 | 1348 |
| 试验电          | 90  | 119 | 225  |
| 带电的设备        | 30  | 44  | 88   |
| 缺乏经验         | 140 | 185 | 403  |
| 缺乏技能         | 175 | 230 | 447  |
| 过于发力         | 125 | 170 | 329  |
| 高压试验电        | 31  | 50  | 105  |
| 转动的设备        | 30  | 49  | 104  |
| 无防护的高空作业     | 262 | 356 | 751  |
| 粉尘           | 35  | 47  | 103  |
| 狭小的作业空间      | 178 | 245 | 525  |
| 限制空间         | 95  | 125 | 269  |
| 不按规定使用个人防护用品 | 75  | 111 | 239  |
| 不按规定程序作业     | 280 | 375 | 794  |
| 误操作          | 44  | 62  | 135  |
| 照明不足         | 290 | 400 | 839  |
| 挥发的油漆        | 74  | 100 | 209  |
| 容易碰撞的设备      | 170 | 230 | 209  |
| 未做好通风措施      | 30  | 50  | 104  |
| 空气质量不合格      | 149 | 195 | 403  |
| 疲劳作业         | 30  | 42  | 90   |
| 检查不到位        | 30  | 42  | 89   |
| 监护工作未落实      | 35  | 55  | 121  |
| 高处落物         | 33  | 41  | 90   |
| 现场管理混乱       | 31  | 43  | 89   |

表 4 某水电站机组检修作业安全事故致因因素分类、指标值和 DEMATEL 权重

| 分类   | 致因因素                 | 影响度   | 被影响度  | 中心度   | 原因度    | DEMATEL 权重/% | DEMATEL 权重排序 |
|------|----------------------|-------|-------|-------|--------|--------------|--------------|
| 人的因素 | 不按规定使用个人防护用品 $Z_1$   | 0.452 | 0.309 | 0.761 | 0.143  | 7.737        | 5            |
|      | 人员专业技能及素质不高 $Z_2$    | 0.140 | 0.000 | 0.140 | 0.140  | 1.427        | 15           |
|      | 高处作业 $Z_3$           | 0.139 | 0.477 | 0.616 | -0.338 | 6.263        | 9            |
|      | 疲劳作业 $Z_4$           | 0.047 | 0.242 | 0.288 | -0.195 | 2.932        | 13           |
|      | 违规作业 $Z_5$           | 0.461 | 0.285 | 0.746 | 0.176  | 7.582        | 6            |
| 物的因素 | 安全防护设施不足 $Z_6$       | 0.440 | 0.229 | 0.669 | 0.211  | 6.798        | 7            |
|      | 质量不合格的工器具 $Z_7$      | 0.273 | 0.132 | 0.406 | 0.141  | 4.121        | 12           |
|      | 高处落物 $Z_8$           | 0.207 | 0.268 | 0.475 | -0.061 | 4.828        | 11           |
|      | 设备的问题 $Z_9$          | 0.217 | 0.811 | 1.028 | -0.594 | 10.447       | 3            |
|      | 能量意外释放 $Z_{10}$      | 0.149 | 0.905 | 1.054 | -0.756 | 10.715       | 2            |
| 环境因素 | 作业条件、作业环境不良 $Z_{11}$ | 0.146 | 0.095 | 0.241 | 0.051  | 2.448        | 14           |
|      | 粉尘、油漆等有害物质 $Z_{12}$  | 0.111 | 0.404 | 0.515 | -0.293 | 5.238        | 10           |
| 管理因素 | 安全检查不到位 $Z_{13}$     | 1.326 | 0.148 | 1.474 | 1.178  | 14.981       | 1            |
|      | 安全监护不到位 $Z_{14}$     | 0.335 | 0.286 | 0.621 | 0.049  | 6.307        | 8            |
|      | 现场管理混乱 $Z_{15}$      | 0.476 | 0.329 | 0.805 | 0.147  | 8.176        | 4            |

全事故致因因素。其中,试验电、高压试验电归属于能量意外释放;带电的设备、转动的设备、容易碰撞的设备归属于设备的问题;缺乏经验、缺乏技能、过于发力、误操作归属于人员专业技能及素质不高;狭小的作业空间、限制空间、空气质量不合格归属于作业条件、作业环境不良;粉尘、挥发的油漆归属于粉尘、油漆等有害物质;无防护的高空作业包含两个方面,即高处作业和安全防护设施不足;照明不足、未做好通风措施归属于安全防护设施不足;不按规定程序作业修正为违规作业;检查不到位修正为安全检查不到位;监护工作未落实修正为安全监护不到位。将修正过的事故致因因素划分为人的因素、物的因素、环境因素以及管理因素四个方面,见表 4,并记安全事故致因因素集合  $Z = \{Z_i | i = 1, 2, \cdots, n\}$ 。

3.2 事故致因关联性分析

编制某水电站机组检修作业安全事故致因因素关系调查问卷,旨在确定致因因素之间的相互影响关系。已有文献对 DEMATEL-ISM 方法进行调查问卷专家人数的下限没有具体说明,本文采访专家数量只能依据以往学者研究的成功案例。选择水电站检修相关领域专家为被试,被试工作 5 年以上,本科及以上学历,专业包括水利工程、电气工程、机械工程等,发放问卷 36 份,收回有效问卷 31 份,满足一般情况下样本容量为 30 称为大样本的统计需求。汇总调查问卷,根据第 2 小节步骤 1,建立直接影响关系矩阵  $A$ ,见表 5。根据建模步骤 4,计算各因素的影响度、被影响度、中心度、原因度,结果见表 4。

影响度表示每个因素对系统中其他因素的影响程度,影响度的值越大表明该因素对其他因素的影响程度越大;被影响度表示系统中其他因素对该因素的影响程度,被影响度的值越大表明该因素更

表 5 直接影响关系矩阵 A

| 致因因素            | Z <sub>1</sub> | Z <sub>2</sub> | Z <sub>3</sub> | Z <sub>4</sub> | Z <sub>5</sub> | Z <sub>6</sub> | Z <sub>7</sub> | Z <sub>8</sub> | Z <sub>9</sub> | Z <sub>10</sub> | Z <sub>11</sub> | Z <sub>12</sub> | Z <sub>13</sub> | Z <sub>14</sub> | Z <sub>15</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Z <sub>1</sub>  | 0              | 0              | 3              | 0              | 1              | 0              | 0              | 1              | 0              | 3               | 0               | 2               | 0               | 0               | 0               |
| Z <sub>2</sub>  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 3              | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| Z <sub>3</sub>  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 3              | 0              | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| Z <sub>4</sub>  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| Z <sub>5</sub>  | 1              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 2              | 3               | 0               | 0               | 2               | 0               | 0               |
| Z <sub>6</sub>  | 0              | 0              | 2              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              | 3               | 2               | 2               | 0               | 0               | 0               |
| Z <sub>7</sub>  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 3              | 3               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| Z <sub>8</sub>  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 2              | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 2               |
| Z <sub>9</sub>  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 2               | 0               | 3               | 0               | 0               | 0               |
| Z <sub>10</sub> | 1              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 2              | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| Z <sub>11</sub> | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              | 0              | 1              | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| Z <sub>12</sub> | 1              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              | 0              | 0              | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| Z <sub>13</sub> | 3              | 0              | 3              | 2              | 3              | 3              | 3              | 0              | 3              | 0               | 0               | 0               | 0               | 3               | 3               |
| Z <sub>14</sub> | 0              | 0              | 2              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1               | 0               | 0               | 1               | 0               | 2               |
| Z <sub>15</sub> | 0              | 0              | 0              | 3              | 2              | 0              | 0              | 0              | 0              | 2               | 0               | 0               | 0               | 3               | 0               |

容易受到其他因素的影响<sup>[20]</sup>。由表 4 可知,安全检查不到位 Z<sub>13</sub>对其他致因因素的影响程度最大,疲劳作业 Z<sub>4</sub>对其他致因因素的影响程度最小;能量意外释放 Z<sub>10</sub>更容易受到其他致因因素的影响,人员的专业技能及素质不高 Z<sub>2</sub> 很难被其他致因因素所影响。

中心度表示该因素在系统中的位置以及发挥作用的大小,中心度越大,说明该因素越接近系统的核心位置,发挥的作用越大<sup>[21]</sup>。由表 4 可知,安全检查不到位 Z<sub>13</sub>中心度数值最大,表明其对水电站机组检修作业安全的影响程度最大,是最重要的致因因素。原因度是某个因素对其他因素影响程度评价的重要指标,原因度大于 0,该因素为原因因素;原因度小于 0,该因素为结果因素<sup>[22]</sup>。由表 4 可知,Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub>、Z<sub>5</sub>、Z<sub>6</sub>、Z<sub>7</sub>、Z<sub>11</sub>、Z<sub>13</sub>、Z<sub>14</sub>、Z<sub>15</sub> 9 个因素为原因因素;Z<sub>3</sub>、Z<sub>4</sub>、Z<sub>8</sub>、Z<sub>9</sub>、Z<sub>10</sub>、Z<sub>12</sub> 6 个因素为结果因素。其中,安全检查不到位 Z<sub>13</sub>的原因度大于 1 且排名第一,表明 Z<sub>13</sub>更容易影响其他致因因素而引发安全事故,是

事故发生的根本原因。

将中心度进行归一化处理,得到各致因因素的 DEMATEL 权重,见表 4。由表 4 可知,安全检查不到位的权重排名第一,表明该因素对水电站机组检修作业安全起到重要的作用。

阈值的取值会影响构建的多层次递阶 ISM 模型。经过多次模拟,选定阈值  $\lambda=0.09$ ,根据建模步骤 6 建立标准化的可达矩阵。在可达矩阵的基础上,根据步骤 7 建立各致因因素的可达集合  $R(Z_i)$  和前项集合  $S(Z_i)$ ,见表 6。

表 6 可达集合  $R(Z_i)$  和前项集合  $S(Z_i)$

| 致因因素            | $R(Z_i)$                                                                                                                                                                      | $S(Z_i)$                                                                                                 |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Z <sub>1</sub>  | {Z <sub>1</sub> , Z <sub>3</sub> , Z <sub>10</sub> }                                                                                                                          | {Z <sub>1</sub> , Z <sub>13</sub> }                                                                      |
| Z <sub>2</sub>  | {Z <sub>2</sub> , Z <sub>9</sub> }                                                                                                                                            | {Z <sub>2</sub> }                                                                                        |
| Z <sub>3</sub>  | {Z <sub>3</sub> , Z <sub>8</sub> }                                                                                                                                            | {Z <sub>1</sub> , Z <sub>3</sub> , Z <sub>13</sub> }                                                     |
| Z <sub>4</sub>  | {Z <sub>4</sub> }                                                                                                                                                             | {Z <sub>4</sub> , Z <sub>13</sub> , Z <sub>15</sub> }                                                    |
| Z <sub>5</sub>  | {Z <sub>5</sub> , Z <sub>9</sub> , Z <sub>10</sub> }                                                                                                                          | {Z <sub>5</sub> , Z <sub>13</sub> }                                                                      |
| Z <sub>6</sub>  | {Z <sub>6</sub> , Z <sub>10</sub> }                                                                                                                                           | {Z <sub>6</sub> , Z <sub>13</sub> }                                                                      |
| Z <sub>7</sub>  | {Z <sub>7</sub> , Z <sub>9</sub> , Z <sub>10</sub> }                                                                                                                          | {Z <sub>7</sub> , Z <sub>13</sub> }                                                                      |
| Z <sub>8</sub>  | {Z <sub>8</sub> }                                                                                                                                                             | {Z <sub>3</sub> , Z <sub>8</sub> }                                                                       |
| Z <sub>9</sub>  | {Z <sub>9</sub> , Z <sub>12</sub> }                                                                                                                                           | {Z <sub>2</sub> , Z <sub>5</sub> , Z <sub>7</sub> , Z <sub>9</sub> , Z <sub>13</sub> }                   |
| Z <sub>10</sub> | {Z <sub>10</sub> }                                                                                                                                                            | {Z <sub>1</sub> , Z <sub>5</sub> , Z <sub>6</sub> , Z <sub>7</sub> , Z <sub>10</sub> , Z <sub>15</sub> } |
| Z <sub>11</sub> | {Z <sub>11</sub> }                                                                                                                                                            | {Z <sub>11</sub> }                                                                                       |
| Z <sub>12</sub> | {Z <sub>12</sub> }                                                                                                                                                            | {Z <sub>9</sub> , Z <sub>12</sub> }                                                                      |
| Z <sub>13</sub> | {Z <sub>1</sub> , Z <sub>3</sub> , Z <sub>4</sub> , Z <sub>5</sub> , Z <sub>6</sub> , Z <sub>7</sub> , Z <sub>9</sub> , Z <sub>13</sub> , Z <sub>14</sub> , Z <sub>15</sub> } | {Z <sub>13</sub> }                                                                                       |
| Z <sub>14</sub> | {Z <sub>14</sub> }                                                                                                                                                            | {Z <sub>13</sub> , Z <sub>14</sub> , Z <sub>15</sub> }                                                   |
| Z <sub>15</sub> | {Z <sub>4</sub> , Z <sub>10</sub> , Z <sub>14</sub> , Z <sub>15</sub> }                                                                                                       | {Z <sub>13</sub> , Z <sub>15</sub> }                                                                     |

通过 DEMATEL 和 ISM 混合建模,建立多层次递阶 ISM 模型,将水电站机组检修作业安全事故致因因素分为 4 个层级,描述事故致因因素间的层次关系,见图 1。由图 1 可知,多层次递阶 ISM 致因因素分为表层致因因素、过渡致因因素、本质致因因素 3 类。Z<sub>4</sub>、Z<sub>8</sub>、Z<sub>10</sub>、Z<sub>11</sub>、Z<sub>12</sub>、Z<sub>14</sub> 为表层致因因素,是水

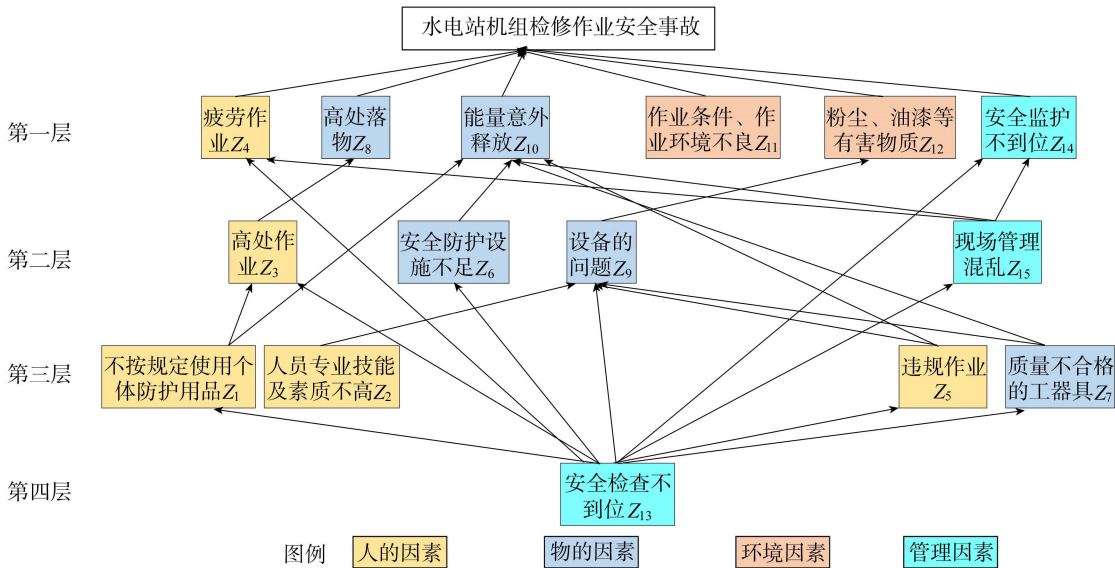


图 1 水电站机组检修作业安全事故致因因素间的层次关系

电站机组检修作业安全事故最直接的致因因素,通过下层因素影响发挥作用。 $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$ 、 $Z_5$ 、 $Z_6$ 、 $Z_7$ 、 $Z_9$ 、 $Z_{15}$ 为过渡致因因素,是水电站机组检修作业安全间接致因因素,承上启下,受到下层致因因素影响作用于上层致因因素。 $Z_{13}$ 为本质致因因素,是水电站机组检修作业安全事故最根本的致因因素,通过多种方式对上层致因因素产生影响。另外,从中心度、权重排名来看,安全检查不到位排名第一,对水电站机组检修作业安全影响最大。因此,安全检查不到位是关键致因因素。

3.3 事故致因链分析

以关键致因因素安全检查不到位为出发点,找寻影响水电站机组检修作业安全事故的致因链,共有14条致因链。为了定量分析“安全检查不到位”致因链中哪些致因链重要程度高、对水电站机组安全影响程度大,需要考虑致因链路径的权重,基于致因因素权重,提出了路径权重的概念。在利用DEMATEL-ISM方法得到水电站机组检修事故致因多层次递阶ISM模型基础上,从致因因素权重角度出发,将致因链路径中的致因因素权重求和之后得到致因链路径的权重,再将各个致因链路径的权重进行归一化处理,得到各致因链的路径权重。将致因链的路径权重由大到小排列,制作“安全检查不到位”致因链的路径权重表,见表7。

表7 “安全检查不到位”致因链的路径权重

| 序号 | 致因链                                                         | 路径权重/% | 累计路径权重/% |
|----|-------------------------------------------------------------|--------|----------|
| 1  | $Z_{13} \rightarrow Z_5 \rightarrow Z_9 \rightarrow Z_{12}$ | 9.080  | 9.080    |
| 2  | $Z_{13} \rightarrow Z_7 \rightarrow Z_9 \rightarrow Z_{12}$ | 8.258  | 17.338   |
| 3  | $Z_{13} \rightarrow Z_{15} \rightarrow Z_{10}$              | 8.041  | 25.379   |
| 4  | $Z_{13} \rightarrow Z_1 \rightarrow Z_3 \rightarrow Z_8$    | 8.026  | 33.405   |
| 5  | $Z_{13} \rightarrow Z_1 \rightarrow Z_{10}$                 | 7.937  | 41.342   |
| 6  | $Z_{13} \rightarrow Z_5 \rightarrow Z_{10}$                 | 7.900  | 49.242   |
| 7  | $Z_{13} \rightarrow Z_6 \rightarrow Z_{10}$                 | 7.714  | 56.956   |
| 8  | $Z_{13} \rightarrow Z_9 \rightarrow Z_{12}$                 | 7.280  | 64.236   |
| 9  | $Z_{13} \rightarrow Z_7 \rightarrow Z_{10}$                 | 7.079  | 71.315   |
| 10 | $Z_{13} \rightarrow Z_{15} \rightarrow Z_{14}$              | 6.995  | 78.310   |
| 11 | $Z_{13} \rightarrow Z_{15} \rightarrow Z_4$                 | 6.194  | 84.504   |
| 12 | $Z_{13} \rightarrow Z_3 \rightarrow Z_8$                    | 6.189  | 90.693   |
| 13 | $Z_{13} \rightarrow Z_{14}$                                 | 5.054  | 95.747   |
| 14 | $Z_{13} \rightarrow Z_4$                                    | 4.253  | 100.000  |

由表7可知,仅从致因链的路径权重角度考虑,“安全检查不到位→违规作业→设备的问题→油漆、粉尘等有害物质”致因链的路径权重值最大,表明其对水电站机组检修作业安全起重要作用,为关键致因链。该致因链由人、物、环境、管理四个方面的因素交互耦合作用,对水电机组检修作业安全的影响程度最大,应重点关注。“安全检查不到位→疲劳作业”的路径权重最小,表明其对水电站机组检修作业安全的影响程度最小。该水电站检修机组

致因链分布不符合“二八定律”,致因链的路径权重占比分布均衡,表明水电站机组检修作业过程中,安全隐患多且零散,很难做到对事故致因的重点管控。序号1~12致因链,本质致因因素直接影响过渡致因因素,间接影响表层致因因素;序号13和14致因链,本质致因因素直接影响表层致因因素。为了阻断致因链的形成,可以从本质致因、过渡致因、表层致因三个方面进行考虑,本质致因因素是致因链的起点,应该作为防控的重中之重;过渡致因因素在致因链中起承上启下的作用,应该作为防控的重点;表层致因因素是致因链的终点,可不作为防控的重点。在该水电站机组检修过程中,为了阻断致因链形成,从致因层次角度考虑,需要对本质致因因素、过渡致因因素进行防控,并提出相应的安全防控对策,见表8。

表8 防控的致因因素及其安全防控对策

| 致因因素         | 安全防控对策                          |
|--------------|---------------------------------|
| 不按规定使用个体防护用品 | 加强安全教育培训,使检修人员正确穿戴个体防护用品        |
| 高处作业         | 检修人员持证上岗,佩戴安全帽等防护用品,做好安全防护措施    |
| 违规作业         | 加强对检修作业人员安全教育,杜绝违规作业行为          |
| 安全防护设施不足     | 加大安全投入力度,强化安全防护设施               |
| 质量不合格的工器具    | 加大安全投入力度,购置符合质量标准的工器具           |
| 设备的问题        | 培养和建立专业化维修队伍,加强设备的维护培养,注意设备定期检查 |
| 安全检查不到位      | 加大安全科技创新及应用力度,实现安全检查精细化、全覆盖     |
| 现场管理混乱       | 落实安全生产责任主体制,加强现场管理              |

4 结 语

通过梳理水电站机组检修相关文献并结合专家访谈,明确水电站机组检修作业安全事故致因因素,具体概括人、物、环境、管理四个方面共20项。基于DEMATEL-ISM方法,构建了水电站机组检修作业安全事故致因多层次递阶ISM模型来挖掘关键致因,分析事故致因链。以某水电站机组检修为例,致因因素分为3个层次,各层次的致因因素存在明确的递进关系,随着表层致因因素、过渡致因因素、本质致因因素的逐步递进,各因素对水电站机组检修作业安全影响程度逐步加深。构建以关键致因因素“安全检查不到位”为源头的事事故致因链,从致因链的路径权重角度考虑,“安全检查不到位→违规作业→设备的问题→粉尘、油漆等有害物质”为关键致因链;从致因层次角度考虑,对不按规定使用个体防护用品、高处作业等致因因素进行重点防控,并提出安全防控对策,可为水电站机组检修安全管理提

供参考,对类似水电站机组检修作业安全管理具有应用推广价值。

参考文献:

[ 1 ] 杨子儒,李诚康,周兴波. 2021 年全球水电发展现状与开发潜力分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3): 39-44. ( YANG Zirui, LI Chengkang, ZHOU Xingbo. Global hydropower development status and potential analysis in 2021[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):39-44. ( in Chinese) )

[ 2 ] 李林,王建华,文庆. 专业化水电检修公司的安全管理探索与实践[J]. 水利水电技术,2013,44(9):123-126. ( LI Lin, WANG Jianhua, WEN Qing. Exploration and practice of safety management of professional hydropower maintenance company [ J ]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44 ( 9 ): 123-126. ( in Chinese) )

[ 3 ] 杨斌,李伟,席洪军. 桃源水电站水轮机 A 级检修实践 [J]. 水力发电,2019,45(10):79-83. ( YANG Bin, LI Wei, XI Hongjun. Class A maintenance of turbine at Taoyuan Hydropower Station[J]. Water Power,2019,45(10):79-83. ( in Chinese) )

[ 4 ] ARSIĆ M, BOŠNJAČ S M, GRABULOV V, et al. Repair welding methodology for the blades of the Kaplan turbine runner at the hydro power plant Djerdap 1[J]. Advanced Materials Research,2016,1138:13-18.

[ 5 ] 程江洲,朱偲,付文龙,等. 基于贝叶斯网络的水轮发电机组状态检修方法研究[J]. 水力发电学报,2018,37(9):54-64. ( CHENG Jiangzhou, ZHU Cai, FU Wenlong, et al. Condition-based maintenance of hydroelectric generating sets based on Bayesian network[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37 ( 9 ): 54-64. ( in Chinese) )

[ 6 ] CHENG Jiangzhou, ZHU Cai, FU Wenlong, et al. An imitation medical diagnosis method of hydro-turbine generating unit based on Bayesian network [ J ]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2019,41(12):3406-3420.

[ 7 ] 邹林峰,刘虎. 三峡右岸水电站机组检修风险分析及对策[J]. 水利水电技术,2014,45(9):93-97. ( ZOU Linfeng, LIU Hu. Analysis on risks from maintenance of hydropower generating unit in Three Gorges Right Bank Hydropower Station and relevant countermeasures [ J ]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45 ( 9 ): 93-97. ( in Chinese) )

[ 8 ] 何文. 基于模糊综合法的水电站检修机组吊装安全评价[J]. 人民长江,2021,52(增刊1):366-368. ( HE Wen. Safety assessment on hoisting scheme of hydraulic sets in maintenance based on fuzzy comprehensive method

[ J ]. Yangtze River, 2021, 52 ( Sup1 ): 366-368. ( in Chinese) )

[ 9 ] 许娜,王文顺,王建平,等. 城市轨道交通建设项目安全事故致因挖掘与重要度评估[J]. 科技进步与对策,2018,35(24):134-138. ( XU Na, WANG Wenshun, WANG Jianping, et al. Using text mining to extract safety accident causes and to assess importance on urban rail transit construction project [ J ]. Science & Technology Progress and Policy, 2018, 35 ( 24 ): 134-138. ( in Chinese) )

[10] XU Na, MA Ling, LIU Qing, et al. An improved text mining approach to extract safety risk factors from construction accident reports [ J ]. Safety Science, 2021, 138:105216.

[11] 孙开畅,徐小峰,张耀,等. 水利工程施工安全人为因素重要度分析[J]. 人民长江,2016,47(9):80-83. ( SUN Kaichang, XU Xiaofeng, ZHANG Yao, et al. Analysis on importance of human factors to construction safety of hydraulic engineering [ J ]. Yangtze River, 2016, 47 ( 9 ): 80-83. ( in Chinese) )

[12] 陈赞,刘湘慧,陈玉斌. 基于决策实验室分析法及解释结构模型的交通隧道施工事故致因链构建[J]. 科学技术与工程,2021,21(35):15222-15229. ( CHEN Yun, LIU Xianghui, CHEN Yubin. Construction of the cause chain of traffic tunnel construction accidents based on DEMATEL-ISM [ J ]. Science Technology and Engineering, 2021, 21 ( 35 ): 15222-15229. ( in Chinese) )

[13] 周晓东,孟宪宽. 大渡河流域水电站精益检修的应用与实践[J]. 水利水电技术,2013,44(9):115-118. ( ZHOU Xiaodong, MENG Xiankuan. Application and practice of lean maintenance for hydropower stations within Daduhe River Basin [ J ]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44 ( 9 ): 115-118. ( in Chinese) )

[14] 陈林,姜开中,罗林海. 白鹤滩水电站气体绝缘高压输电线路设备检修平台安装安全管理[J]. 人民黄河,2021,43(增刊1):265-267. ( CHEN Lin, JIANG Kaizhong, LUO Linhai. Installation safety management of gas insulated high voltage transmission line equipment maintenance platform in Baihetan Hydropower Station [ J ]. Yellow River, 2021, 43 ( Sup1 ): 265-267. ( in Chinese) )

[15] 黄中良,赵显忠,程云山. 特大型灯泡贯流式机组机电安装技术难点[J]. 水利水电科技进展,2010,30(1):72-75. ( HUANG Zhongliang, ZHAO Xianzhong, CHENG Yunshan. Technical difficulties of installation of mechanical and electrical equipment for large scale bulb tubular turbine units [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30 ( 1 ): 72-75. ( in Chinese) )

( 下转第 51 页 )

- South-to-North Water Transfer Project based on improved cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(4):60-66. (in Chinese))
- [23] 郭金,顾冲时,何菁. 基于组合赋权二维云模型的堤防工程风险评价[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):117-122. (GUO Jin, GU Chongshi, HE Jing. Risk assessment for levee engineering based on a two-dimensional cloud model with combination weighting[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(6):117-122. (in Chinese))
- [24] 艾亚迪,魏传江,马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(2):11-16. (in Chinese))
- [25] 沈时,王栋,王远坤,等. 水资源承载力综合评价的组合权重-MNCM 法[J]. 南京大学学报(自然科学),2021,57(5):887-895. (SHEN Shi, WANG Dong, WANG Yuankun, et al. Combined weight-MNCM evaluation method for water resources carrying capacity[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2021,57(5):887-895. (in Chinese))
- [26] 黄显峰,刘展志,方国华. 基于云模型的水利现代化评价方法与应用[J]. 水利水电科技进展,2017,37(6):54-61. (HUANG Xianfeng, LIU Zhanzhi, FANG Guohua. Evaluation and application of water conservancy modernization index system based on a cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(6):54-61. (in Chinese))
- [27] 宋菲燕,林凯荣,何艳虎,等. 考虑权重不确定性的珠三角地区水环境承载力评价:基于博弈论与云模型[J]. 水利水电技术,2020,51(11):145-154. (SONG Feiyan, LIN Kairong, HE Yanhu, et al. Assessment of water environment carrying capacity in the Pearl River Delta region with considering weight uncertainty, based on game theory and cloud model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(11):145-154. (in Chinese))
- [28] CHENG K, FU Q, MENG J, et al. Analysis of the spatial variation and identification of factors affecting the water resources carrying capacity based on the cloud model[J]. Water Resources Management, 2018,32(8):2767-2781.
- [29] 叶飞,方国华,金菊良. 基于灰色聚类集对分析法的水资源承载力评价模型[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(3):30-36. (YE Fei, FANG Guohua, JIN Juliang. Evaluation model of water resources carrying capacity based on grey cluster set pair analysis method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020,31(3):30-36. (in Chinese))
- (收稿日期:2023-03-07 编辑:熊水斌)
- +++++
- (上接第 43 页)
- [16] SINGH R K, ACHARYA P. Identification and evaluation of supply chain flexibilities in Indian FMCG sector using DEMATEL [J]. Global Journal of Flexible Systems Management, 2014,15(2):91-100.
- [17] 姜沁瑶,李洁. 基于 ISM 的建筑工人安全意识影响因素[J]. 土木工程与管理学报,2016,33(3):106-110. (JIANG Qinyao, LI Jie. Influencing factors of construction workers' safety awareness based on interpretive structure model[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016,33(3):106-110. (in Chinese))
- [18] 褚召强,杨高升. 考虑事件关联性的施工安全事故致因分析[J]. 土木工程与管理学报,2021,38(3):153-160. (CHU Zhaoqiang, YANG Gaosheng. Cause analysis on construction safety accidents considering event correlation [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(3):153-160. (in Chinese))
- [19] 王军武,陆超. 关联性视角下装配式建筑工程吊装事故致因机理分析[J]. 安全与环境学报,2021,21(3):1158-1164. (WANG Junwu, LU Chao. On the cause-result consequence of the hoisting accidents in the prefabricated construction projects from the perspective of relevance [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(3):1158-1164. (in Chinese))
- [20] 陈立文,张孟佳,李素红,等. 基于 DEMATEL-ISM 的既有建筑节能改造推广影响因素研究[J]. 建筑经济,2022,43(1):84-92. (CHEN Liwen, ZHANG Mengjia, LI Suhong, et al. Influencing factors of energy saving retrofit of existing buildings based on DEMATEL-ISM model[J]. Construction Economy, 2022, 43(1):84-92. (in Chinese))
- [21] 王伟明,邓潇,徐海燕. 基于三维密度算子的群体 DEMATEL 指标权重确定方法[J]. 中国管理科学,2021,29(12):179-190. (WANG Weiming, DENG Xiao, XU Haiyan. A new index weights calculation method of group DEMATEL based on three-dimensional density operator [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021,29(12):179-190. (in Chinese))
- [22] 郑霞忠,周佳丽,邵波,等. 基于 D-I 的塔机作业物体打击事故致因分析[J]. 中国安全科学学报,2021,31(6):83-89. (ZHENG Xiazong, ZHOU Jiali, SHAO Bo, et al. Causal analysis of strike accident of tower crane operating object based on D-I [J]. China Safety Science Journal, 2021,31(6):83-89. (in Chinese))
- (收稿日期:2023-01-13 编辑:俞云利)