

基于 DEMATEL-ISM 的高拱坝混凝土 初期浇筑阶段施工进度风险分析

黄建文^{1,2}, 熊鑫¹, 陈瑞³, 赵可欣¹, 王放¹, 张迎锋⁴

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学水电工程施工与管理湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学科技学院, 湖北 宜昌 443002; 4. 中国葛洲坝集团股份有限公司白鹤滩施工局, 四川 凉山 615400)

摘要: 针对高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险因素复杂且不确定性强的问题, 提出了基于决策试验与评价实验室(DEMATEL) 和解释结构模型(ISM) 相结合的施工进度风险分析方法。根据高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工特点, 建立了施工进度风险指标体系; 运用系统动力学分析因素间作用关系, 通过因果关系图揭示了因素间的作用路径; 集成 DEMATEL-ISM 构建了高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险多层递阶结构模型, 并结合工程实例进行了分析。研究表明, 该方法可以有效识别施工进度风险关键因素和关键作用路径, 为高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险分析提供了新的解决思路。

关键词: 高拱坝; 混凝土; 初期浇筑阶段; 施工进度风险; DEMATEL 法; ISM 法

DEMATEL-ISM Based Risk Analysis of High Arch Dam Concrete Construction Schedule in Initial Pouring Stage

HUANG Jianwen^{1,2}, XIONG Xin¹, CHEN Rui³, ZHAO Kexin¹, WANG Fang¹, ZHANG Yingfeng⁴

(1. College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;

2. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 3. College of Science and Technology of China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 4. Baihetan Construction Bureau, China Gezhouba Group Co., Ltd., Liangshan 615400, Sichuan, China)

Abstract: In view of the complex and higher uncertain risk factors of concrete construction schedule in initial pouring stage of high arch dam, a construction schedule risk analysis method based on Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) and Interpretative Structural Modeling (ISM) is proposed. According to concrete construction characteristics of high arch dam in initial pouring stage, the construction progress risk index system is firstly established. Then the system dynamics is used to analyze the relationship between the factors, and the action path between the factors is revealed through the causal relationship diagram. Further, the integrated DEMATEL-ISM is applied to construct a multi-level hierarchical structure model for the concrete construction progress risk analysis of high arch dam in initial pouring stage. And finally, an engineering example is analyzed by the method. The research results show that this method can effectively identify the significant factors and key action paths of construction schedule risk and provide a new solution for the risk analysis of concrete construction progress in initial pouring stage of high arch dam.

Key Words: high arch dam; concrete; initial pouring stage; construction schedule risk; DEMATEL method; ISM method

中图分类号: TV512

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2020)02-0061-05

0 引言

高拱坝施工周期长, 施工进度直接影响工程的建设工期及防洪发电效益。由于施工过程中受人为因素、浇筑机械、质量要求、自然条件、施工组织等众多因素的影响, 各个因素之间相互作用且呈现

收稿日期: 2019-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879147); 国家自然科学基金项目(51779131); 湖北省建设科技计划项目(KJ2016QT012)

作者简介: 黄建文(1977—), 男, 湖北黄陂人, 副教授, 博士, 从事施工组织管理方面的教学与科研工作; 熊鑫(通讯作者)。

出动态变化的特征，导致施工进度控制异常复杂^[1]。尤其是在高拱坝混凝土初期浇筑阶段(即基础约束区施工)，该阶段备仓、混凝土生产、运输、卸料、浇筑等施工环节正处在磨合期，衔接度低，施工机械间的配合度不高，施工效率低下，加之混凝土基础块施工工序繁杂，单仓浇筑方量大，温度控制等质量要求严格，导致施工进度极其复杂且不确定性强。因此，研究高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险对于提升进度管理水平具有重要意义。

目前，在水利水电工程施工进度风险研究方面，马志峰^[2]采用施工仿真方法分析了碾压混凝土坝进度偏差和进度趋势；钟登华^[3-4]基于堆石坝施工过程监控数据，对影响施工进度的因素进行了识别；黄建文^[5]、张社荣^[6]基于系统动力学和贝叶斯理论对地下洞室施工进度风险管理和预测进行研究；刘金飞^[7]采用仿真分析技术对影响白鹤滩拱坝施工进度关键因素和部位进行了识别。以上研究为水利水电工程施工进度风险分析提供了丰富的解决方法，但是涉及高拱坝混凝土初期浇筑阶段的施工进度风险研究较少，然而该阶段的施工进度风险极其复杂且不确定性强。因此，本文以初期混凝土浇筑阶段为研究对象，从备仓到混凝土运输、浇筑的过程中，通过风险识别建立高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度影响因素指标体系，针对因素间复杂作用关系，结合 DEMATEL 和 ISM 构建施工进度风险分析模型，明确风险因素属性，揭示各因素的作用程度，并成功识别出关键因素，探明复杂因素间内在联系和层次结构，为高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度管理提供重要的理论支撑和决策参考。

1 高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度影响因素指标体系的建立

确定风险因素指标体系是分析高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险的前提和基础。基于系统完整、层次分明、简明科学的原则^[8]，结合文献 [3, 7, 9-13] 和实际工程中所面临的风险因素，采用定性分析，确定对高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险有极大参考价值的关键因素。最后，按照风险发生的起源将关键风险因素从人、机、物、环境和管理因素五个风险维度进行归类，建立高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险因素指标体系，具体如表 1 所示。

2 集成 DEMATEL-ISM 模型

2.1 模型介绍

决策试验与评价实验室(Decision Making Trial

表 1 风险指标体系

一级	二级	参考文献
人的因素	身体状况 a_{11}	[13]
	工作态度 a_{12}	[13]
	操作技能水平 a_{13}	[10, 12-13]
机的因素	缆机运行效率 a_{21}	[3, 9-10]
	施工机械配置数量 a_{22}	[9]
	机械故障 a_{23}	[9, 13]
物的因素	混凝土生产及运输 a_{31}	[3, 7]
	施工用风水电中断 a_{32}	[12]
	模板的配置及安装 a_{33}	[7]
环境因素	气候因素(大风、暴雨、高温等) a_{41}	[3, 7, 10]
	移民协调问题 a_{42}	[10-11]
	道路布置协调问题 a_{43}	[10-11]
管理因素	混凝土温度控制措施 a_{51}	[7]
	大坝浇筑施工工艺 a_{52}	[7]
	施工现场安全管理 a_{53}	[10-11]

and Evaluation Laboratory, DEMATEL) 是通过目标因果关系图和矩阵运算相结合用于解决复杂系统中多因素间相互影响程度的一种方法^[14]。解释结构模型(Interpretative Structural Modeling, ISM) 是一种多层递阶结构模型，用于分析具有多种影响因素的复杂系统，帮助决策者明确各影响因素在系统中的地位^[15]。高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度影响因素众多、关系复杂，本文利用 DEMATEL 法在区分因素属性、作用程度以及相互影响关系方面的优势，并在此基础上结合 ISM 对各影响因素进行层次划分，使因素间相互作用路径更加清晰，其具体步骤如图 1 所示。

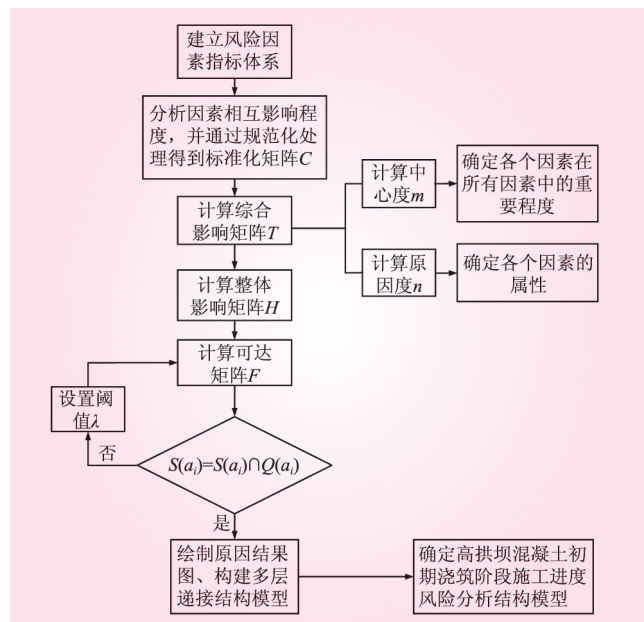


图 1 基于 DEMATEL-ISM 的高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险分析流程

2.2 DEMATEL-ISM 法建模步骤

基于 DEMATEL-ISM 法的高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险分析建模步骤如下所示。

(1) 确定高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险因素指标体系 $A = \{a_i | i = 1, 2, \dots, 15\}$ 。

(2) 获得初始直接影响矩阵 $B = [b_{ij}]_{15 \times 15}$ 并构建风险因素因果关系图。设定因素影响标度值 0(无影响)、1(弱影响)、2(一般影响)、3(强影响)、4(很强影响), 根据行因素对列因素的影响程度进行打分(通常采用问卷调查的方式进行), 得到初始直接影响矩阵 B , 并利用系统动力学建立因果关系图。

(3) 初始直接影响矩阵规范化。初始直接影响矩阵 $B = [b_{ij}]_{15 \times 15}$ 通过行归一化得到标准化矩阵 $C = [c_{ij}]_{15 \times 15}$, 即

$$C = \frac{B}{\max_{1 \leq i \leq 15} \sum_{j=1}^{15} b_{ij}} \quad (1)$$

式中, $\max_{1 \leq i \leq 15} \sum_{j=1}^{15} b_{ij}$ 为初始矩阵 B 中每一行相加得到的和最大值, 通过规范化处理使 $C_{ij} \in [0, 1]$ 。

(4) 计算综合影响矩阵 $T = [t_{ij}]_{15 \times 15}$ 。确定各个风险因素对高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险体系中最高水平因素的综合影响, 计算公式如下

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

式中, I 为单位矩阵, 由于 $C_{ij} \in [0, 1]$, 所以, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $C^{n-1} \rightarrow 0$, 故有

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

(5) 计算因素的影响度 r_i 和被影响度 e_j 。 r_i 越大表示因素 a_i 对其他因素的作用程度越大; e_j 越大表示因素 a_i 受其他因素的作用程度越大, 计算公式如下

$$r_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, 15 \quad (4)$$

$$e_j = \sum_{i=1}^n t_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, 15 \quad (5)$$

(6) 计算因素中心度 m_i 和原因度 n_i 。 m_i 表示因素 a_i 在所有因素中的重要程度; n_i 的正负将因素划分为两种属性因素, 为正的为原因因素, 为负的因素为结果因素, 原因因素对其他因素产生影响, 结果因素被其他因素影响。

$$m_i = r_i + e_j, \quad i = j \quad (6)$$

$$n_i = r_i - e_j, \quad i = j \quad (7)$$

(7) 计算整体影响矩阵 $H = [h_{ij}]_{15 \times 15}$ 。考虑 DEMATEL 法得到综合影响矩阵 T 的因素自身影响计算整体影响矩阵 $H = I + T$ 。

(8) 选取合理阈值 λ 和计算可达矩阵 $F = [f_{ij}]_{15 \times 15}$ 。引入阈值 λ 是为了去掉系统中影响程度较

小的值, 使得系统层次划分更加清晰和直观。

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & h_{ij} \geq \lambda \\ 0, & h_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, 15) \quad (8)$$

式中, $\lambda \in [0, 1]$; f_{ij} 为节点 i 到节点 j 的关联值, $f_{ij} = 1$ 表示节点 i 与节点 j 相关联。

(9) 划分因素层级。对可达矩阵 F 进行式(9)的计算可以得到各因素的可达集合 $S(a_i)$ 、前因集合 $Q(a_i)$ 、最高级要素集合 $L(a_i)$, 在得到 3 个集合的基础上, 验证 $S(a_i) = S(a_i) \cap Q(a_i)$ 是否成立, 若成立划去因素 a_i 所对应的行和列。重复以上步骤, 直到所有的因素被划掉为止。

$$\begin{cases} S(a_i) = \{a_j | a_j \in A, f_{ij} = 1\} \\ Q(a_i) = \{a_j | a_j \in A, f_{ji} = 1\} \\ L(a_i) = \{a_j \in A | S(a_i) \cap Q(a_i) = S(a_i)\} \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, 15) \quad (9)$$

(10) 构建多层递阶结构模型。首先, 根据步骤(6)计算的中心度和原因度, 绘制出各因素的原因结果图, 并在此基础上根据步骤(9)的层次结构分析结果并结合因果关系图中的相互作用路径构建多层递阶结构模型。

3 实例分析

3.1 工程概况

我国西南地区某混凝土高拱坝坝高 289 m, 坝顶高程 834m, 混凝土浇筑方量约 803 万 m^3 。大坝坝顶弧长约 709 m, 分 30 条横缝, 共 31 个坝段, 部分坝段的基础约束区划分见表 2。该高拱坝所在地区为干热河谷, 冬季干燥、风速大, 夏季气温高、多雨, 施工环境恶劣。基础约束区的施工过程中, 单仓浇筑方量大、缆机运行效率低、各施工工序间相互干扰。

表 2 坝段基础约束区划分

坝段编号	基础约束区高程/m	坝段编号	基础约束区高程/m
1	≤834	16	≤598
2	≤834	17	≤593
3	≤802	18	≤588
⋮	⋮	⋮	⋮

3.2 集成 DEMATEL-ISM 计算过程

通过初始直接影响矩阵 $B = [b_{ij}]_{15 \times 15}$, 运用系统动力学建立风险因素因果关系图, 可直观反映出各风险因素间相互影响关系和作用路径。高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险因果关系如图 2 所示。

在标准化影响矩阵 C 的基础上利用 MATLAB 软件计算可得综合影响矩阵 T , 如下所示。对综合影响矩阵 T 进行步骤(5)、(6)的计算, 计算结果见表 3。

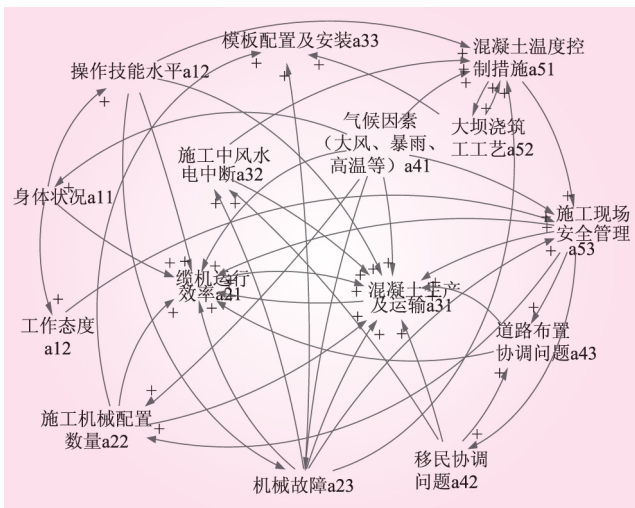
$$T = \begin{pmatrix} 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.048 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.064 & 0.001 & 0.001 & 0.000 & 0.000 & 0.001 & 0.000 & 0.001 & 0.000 & 0.050 & 0.046 & 0.000 & 0.001 & 0.000 & 0.007 \\ 0.066 & 0.064 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.006 & 0.003 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.062 & 0.089 & 0.143 & 0.031 & 0.120 & 0.152 & 0.160 & 0.131 & 0.000 & 0.273 & 0.043 & 0.122 & 0.013 & 0.019 & 0.101 \\ 0.001 & 0.001 & 0.009 & 0.001 & 0.008 & 0.003 & 0.000 & 0.002 & 0.000 & 0.063 & 0.000 & 0.000 & 0.021 & 0.148 & 0.000 \\ 0.007 & 0.012 & 0.108 & 0.000 & 0.001 & 0.006 & 0.000 & 0.005 & 0.000 & 0.101 & 0.001 & 0.000 & 0.005 & 0.001 & 0.048 \\ 0.025 & 0.088 & 0.167 & 0.198 & 0.134 & 0.164 & 0.031 & 0.137 & 0.000 & 0.201 & 0.136 & 0.166 & 0.020 & 0.022 & 0.159 \\ 0.005 & 0.010 & 0.063 & 0.000 & 0.047 & 0.104 & 0.000 & 0.007 & 0.000 & 0.077 & 0.048 & 0.000 & 0.008 & 0.008 & 0.063 \\ 0.079 & 0.076 & 0.123 & 0.001 & 0.114 & 0.120 & 0.000 & 0.094 & 0.000 & 0.098 & 0.014 & 0.042 & 0.025 & 0.162 & 0.015 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.002 & 0.017 & 0.013 & 0.001 & 0.002 & 0.018 & 0.000 & 0.016 & 0.000 & 0.022 & 0.002 & 0.000 & 0.016 & 0.003 & 0.155 \\ 0.001 & 0.008 & 0.013 & 0.000 & 0.001 & 0.070 & 0.000 & 0.008 & 0.000 & 0.071 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.001 & 0.074 \\ 0.011 & 0.013 & 0.126 & 0.048 & 0.078 & 0.129 & 0.007 & 0.102 & 0.000 & 0.236 & 0.007 & 0.006 & 0.024 & 0.156 & 0.016 \\ 0.005 & 0.005 & 0.063 & 0.007 & 0.057 & 0.018 & 0.001 & 0.015 & 0.000 & 0.037 & 0.001 & 0.001 & 0.147 & 0.029 & 0.002 \\ 0.013 & 0.109 & 0.086 & 0.005 & 0.012 & 0.121 & 0.001 & 0.104 & 0.000 & 0.146 & 0.010 & 0.001 & 0.107 & 0.017 & 0.013 \end{pmatrix}$$


图2 高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险因素因果关系

表3 各因素 DEMATEL 分析结果

因素	影响度 r_i	被影响度 e_j	中心度 m_i	原因度 n_i	中心度 排序	因素 属性
A ₁₁	0.340	0.048	0.388	0.292	15	原因因素
A ₁₂	0.493	0.171	0.664	0.321	14	原因因素
A ₁₃	0.914	0.140	1.055	0.774	10	原因因素
A ₂₁	0.293	1.653	1.946	-1.360	4	结果因素
A ₂₂	0.573	0.449	1.022	0.123	11	原因因素
A ₂₃	0.908	0.301	1.209	0.606	9	原因因素
A ₃₁	0.201	1.850	2.051	-1.649	3	结果因素
A ₃₂	0.621	1.739	2.360	-1.118	1	结果因素
A ₃₃	0.000	1.292	1.292	-1.292	8	结果因素
A ₄₁	1.428	0.000	1.428	1.428	7	原因因素
A ₄₂	0.453	0.290	0.743	0.164	13	原因因素
A ₄₃	0.336	0.409	0.746	-0.073	12	结果因素
A ₅₁	0.393	1.290	1.683	-0.897	5	结果因素
A ₅₂	0.565	1.725	2.291	-1.160	2	结果因素
A ₅₃	0.653	0.899	1.552	-0.246	6	结果因素

选取合理的阈值 λ 是构建可达矩阵 F 的关键，本文在高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险分析中对 λ 的取值进行多次检验，最后得出当 $\lambda = 0.05$ 时，因素间的逻辑关系及因素等级更加清晰明了，其对应的可达矩阵 F 如下所示。

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

在得出可达矩阵 F 的基础上，根据步骤(8)对可达矩阵 F 进行层次化处理，计算出可达集合 $S(a_i)$ 、前因集合 $Q(a_i)$ 、最高级要素集合 $L(a_i)$ ；再根据步骤(9)依次得出层次划分结果，即 $L_1 = \{a_4, a_7\}$ ； $L_2 = \{a_9, a_{12}, a_{13}, a_{14}\}$ ； $L_3 = \{a_8, a_{11}, a_{15}\}$ ； $L_4 = \{a_3, a_6\}$ ； $L_5 = \{a_2, a_5\}$ ； $L_6 = \{a_1, a_{10}\}$ 。

综上，在计算出的各因素 DEMATEL 分析结果中，可构建以中心度为横坐标，原因度为纵坐标的高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度因素的原因结果图，如图3所示。在此基础上，根据因素的层级划分结果，构建反映各层级间影响因素作用途径的多层递阶结构模型，如图4所示。

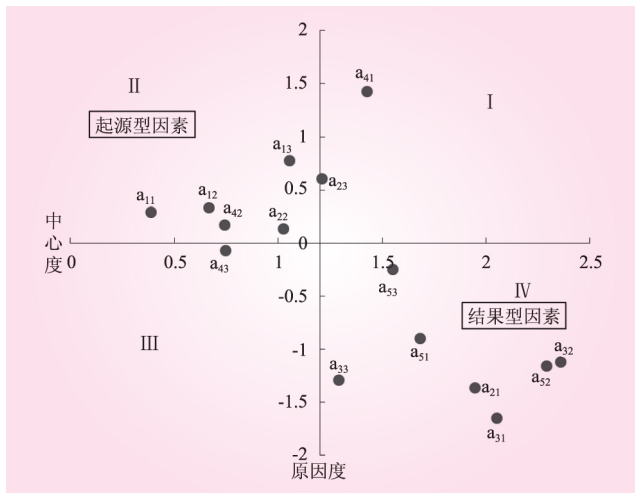


图 3 高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度因素原因结果

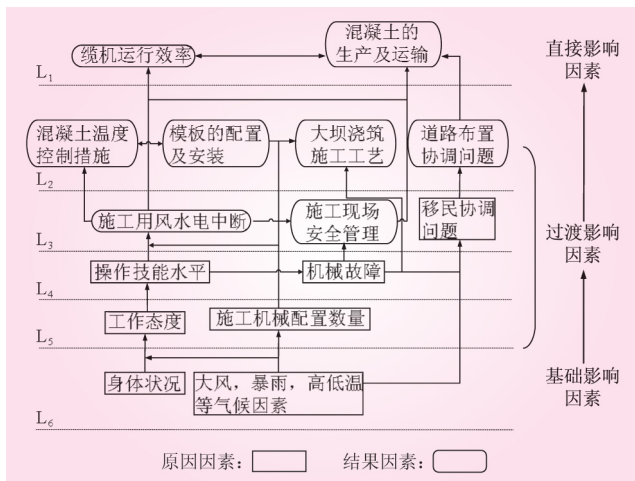


图 4 高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度因素多层递阶结构模型

3.3 模型结果分析

(1) 从图 3 可知: 高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度影响因素主要分布在第 II 和 IV 象限。第 II 象限的因素中心度较低、原因度较高, 属于易影响其他因素的“起源型”因素。按照因素的原因度排名, 排名第一、第二且中心度靠前的因素是操作技能水平 a_{13} 和机械故障 a_{23} , 这两个因素是引起施工进度风险比较关键的原因因素。第 IV 象限的因素中心度较高、原因度较低, 属于易受其他因素影响的结果型”因素。按照因素原因度的绝对值(即被影响度)排名, 排名第一、第二且中心度靠前的是混凝土的生产及运输 a_{31} 和缆机运行效率 a_{21} , 这两个因素是直接导致施工进度风险的结果因素。

(2) 由图 4 可知: 各因素被划分为 6 个层级, 位于第 1 层级的因素称为直接影响因素; 第 2、3、4、5 层级的因素称为过渡影响因素; 第 6 层级的因素称为基础影响因素。通过各层级因素间的作用路径,

可知身体状况、气候因素(大风、暴雨、高温等)通过中间层级过渡影响因素的传导作用, 多种途径影响到顶层直接影响因素, 从而导致高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险的发生, 其中一条重要的途径是“身体状况→工作态度→操作技能水平→机械故障→施工现场安全管理→混凝土的生产及运输”。

4 结论

本文在构建高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险因素指标体系的基础上, 将集成 DEMATEL-ISM 方法应用到高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险分析中, 识别出 7 个原因因素, 8 个结果因素。其中, 人员身体状况和气候因素是最本质的原因因素, 位于多层递阶结构模型最底层, 容易被忽略; 操作技能水平和机械故障是最关键的原因因素, 处于多层递阶结构图模型承上启下的中间层, 对其他因素的影响程度大且与其他因素作用关系密切; 混凝土的生产及运输和缆机运行效率是最直接的结果因素, 位于多层递阶结构模型最顶层, 受其他因素影响显著, 对高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险有直接影响。

基于 DEMATEL-ISM 的高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险分析模型计算简便, 实用性强, 解决了复杂因素间相互作用程度定量计算的问题, 并可清晰得出关键因素所处层级和作用路径, 为高拱坝混凝土初期浇筑阶段施工进度风险分析提供了一种新的解决思路。

参考文献:

- [1] WANG Renkun. Crucial technologies in the design of Xiluodu Super High Arch Dam[J]. Engineering Sciences, 2012, 10(2): 35-44.
- [2] 马志峰, 崔博, 钟桂良. 碾压混凝土坝施工质量与进度实时控制系统在官地水电工程中的应用[J]. 水利水电技术, 2013, 44(2): 75-77.
- [3] 钟登华, 闫玉亮, 张隽, 等. 耦合改进 PERT 和 BBNs 的堆石坝施工进度风险分析[J]. 水利学报, 2017, 48(1): 52-60.
- [4] 钟登华, 常峻, 任炳显, 等. 基于实时监控的高堆石坝施工进度影响因素研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3): 239-245.
- [5] 黄建文, 李朝全, 刘凯丽, 等. 地下洞室开挖施工进度系统动力学仿真模型[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(2): 78-84.
- [6] 张社荣, 杜成波, 撒文奇, 等. 基于贝叶斯理论的地下洞室群时变施工进度风险预测方法[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(5): 1131-1137.
- [7] 刘金飞, 王飞, 谭尧升. 耦合多维约束的高拱坝施工进度仿真研究[J]. 水力发电, 2019, 45(4): 70-73.
- [8] 胡立伟, 李林育, 古含焱, 等. 山区长大下坡路段货车行车风险因素识别[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2019(1): 116-126.

(下转第 108 页)

有隐患排查数据进行分析论证,建立一种能够监测、诊断、预警、预控新生安全隐患发生的体系系统。

目前已初步实现安全隐患分析预警功能,但局限于采集的隐患排查基础数据完整性、准确性和关联性还存在欠缺,分析预警结果还存在一定的不稳定和偏差,尤其是关联规则覆盖率较低。下一步,通过持续的注入大量基础数据来优化模型结果,使其不断适应现场变化的因素,逐步实现分电站、分区域、分专业分析预警功能;同时,随着安全隐患预测预警结果有效性和针对性的提升,可进一步拓展其应用在整个安全生产领域中的关联性,将新生安全隐患和安全风险分级管控进一步关联,通过风险评估等方式方法将新生安全隐患自动转换为对应危险源点,按严重程度进行分级预警,不断提高安全生产领域安全风险自动预判、自主决策、自我演进的智能化功能提升,为安全管理提供有效支持和决策依据。

参考文献:

- [1] 涂扬举. 智慧企业——框架与实践[M]. 2版. 北京: 经济日报出版社, 2018.
- [2] SEDGEWICK R, WAYNE K. 算法[M]. 谢路云,译. 4版. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [3] CORMEN T H, LEISERSON C E, RIVEST R L, et al. 算法导论[M]. 潘金贵, 顾铁成, 李成法,译. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2006.

- [4] 施卫祖. 实施科技兴安战略的思考[J]. 中国安全生产科学技术, 2012(8): 88-91.
- [5] 杨乃莲. 对改进我国安全生产事故统计工作的思考[J]. 中国安全恒产科学技术, 2011, 7(7): 159-162.
- [6] 郝红勋, 刘纪坤, 王翠霞. 煤矿事故隐患防控技术研究[J]. 中国安全恒产科学技术, 2011, 7(9): 135-138.
- [7] 丁夕平, 李运华. 安全生产事故隐患排查实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [8] 吴江. 电气安全隐患排查治理工作手册[M]. 1版. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [9] 兰红云. 自然语言处理技术入门与实战[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [10] 冯志伟. 自然语言处理简明教程[M]. 2版. 上海: 上海外语教育出版社, 2012.
- [11] 董西成. 大数据技术体系详解: 原理、架构与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [12] 吕兆星. 企业大数据系统构建实战: 技术、架构、实施与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [13] 朱洁, 罗华霖. 大数据架构详解: 从数据获取到深度学习[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [14] 赵刚. 大数据: 技术与应用实践指南[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [15] 邓肯, 王梓坤. 马尔科夫过程论基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.

(责任编辑 焦雪梅)

(上接第65页)

- [9] 关涛, 钟登华, 任炳昱. 基于随机占优度的高拱坝施工方案优化研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5): 23-30.
- [10] 钟登华, 关涛, 任炳昱. 基于改进重抽样法的高拱坝施工进度仿真研究[J]. 水利学报, 2016, 47(4): 473-482.
- [11] 李晓英, 田佳乐, 郑景耀, 等. 水利工程施工进度风险分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(6): 141-147.
- [12] 王仁超, 宋亮. 基于改进模糊层次分析法的施工进度风险分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(11): 141-144.

- [13] 杜梅. 多种影响因素耦合作用下水下隧道施工进度风险评价[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [14] 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.
- [15] 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.

(责任编辑 焦雪梅)

(上接第74页)定导叶数,水轮机大流量工况(大于额定流量 $0.869\text{ m}^3/\text{s}$)运行时,应适当减少固定导叶数。这为今后冷却塔专用超低比转速水轮机的固定导叶数的选取提供参考。

参考文献:

- [1] 冯会玲, 刘洋, 孙宸. 水轮机技术在冷却塔系统中的应用[J]. 冶金能源, 2017, 36(6): 14-15.
- [2] 熊妍, 屈波, 霍志红, 等. 冷却塔专用超低比转速水轮机的设计及数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(3): 112-115.
- [3] 张术彬. 冷却塔专用超低比转速水轮机的设计研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.

- [4] 潘文高, 李朝明, 胡彬, 等. 机械通风冷却塔在内陆核电厂中的应用[J]. 核动力工程, 2010, 31(3): 92-95, 101.
- [5] 徐正, 李金海, 张景波. 机械通风冷却塔在 $2 \times 1\,000\text{ MW}$ 湿冷机组中的应用研究[J]. 河北工业科技, 2014, 31(1): 5-9.
- [6] 包可羊. “水电混合技术”在机械通风冷却塔节能改造中的应用[J]. 低碳世界, 2016(14): 255-256.
- [7] 朱李, 赵玺, 赖喜德. 基于的混流式水轮机流动特性分析[J]. 水力发电, 2015, 41(6): 91-94.
- [8] 康灿, 李利婷, 鲁国辉. 导叶开度对贯流式水轮机性能及流动特征的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(5): 406-413.
- [9] 陈庆光, 吴玉林, 刘树红, 等. 轴流式水轮机内三维空化湍流的数值研究[J]. 水力发电学报, 2006(6): 130-135.

(责任编辑 高瑜)