

doi: 10.11731/j.issn.1673-493x.2020.04.027

基于 STAMP 模型的建筑事故致因因素定量分析方法研究*

李 华, 金 萌, 钟兴润

(西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 为揭示建筑安全事故致因因素间的相互关系从而对其进行有效预防和控制, 探讨 1 种 STAMP 模型的定量分析方法, 用于深入剖析事故致因因素间的逻辑关系和属性特征。基于 STAMP 系统事故理论模型, 从建筑工程安全控制结构入手逐层定性分析事故的致因因素; 引入灰色 DEMATEL 与 ISM 相结合的方法对系统事故间的复杂逻辑关系进行层级划分; 运用 MICMAC 分析计算各致因因素的驱动力和依赖度数值并判断其属性类别。结果表明: 提出的定量分析方法运用到江西丰城冷却塔坍塌事故中的分析结果与事故调查报告相契合, 能较全面地说明各层次结构间的相互作用。

关键词: 建筑事故; 建筑工程安全控制结构; 致因因素; 解释结构模型 (ISM); 交叉影响矩阵相乘法 (MICMAC)

中图分类号: X947 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-493X(2020)-04-0169-07

Research on quantitative analysis method for causal factors of construction accidents based on STAMP model

LI Hua, JIN Meng, ZHONG Xingrun

(College of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China)

Abstract: In order to reveal the interrelationship between the casual factors of construction safety accidents, and thus prevent and control them effectively, a new quantitative analysis method of STAMP model was discussed, which was used to deeply analyze the logical relationship and attribute characteristics of the casual factors of accidents. Based on the STAMP system accident theoretical model, the causal factors of the accidents were analyzed qualitatively layer-by-layer starting from the safety control structure of construction engineering. The combination of grey DEMATEL and ISM was introduced to classify the levels of complex logical relationship between the system accidents. The MICMAC analysis was used to calculate the driving force and dependency values of each causal factor and determine the attribute categories. The results showed that the analysis results of the collapse accident of cooling tower in Fengcheng, Jiangxi Province by using the proposed quantitative analysis method were consistent with the accident investigation report, and it can fully explain the interaction between various layer structure.

Key words: construction accident; safety control structure of construction engineering; causal factor; Interpretative Structural Modeling (ISM); Matrix Impacts Cross-reference Multiplication Applied to a Classification (MICMAC)

0 引言

建筑工程是工序复杂性高、人员流动性大和环境不确定性高的特殊生产过程, 其具有周期长、参与主体多、作业任务交叉等特点, 因此, 建筑业是事故高发的行业之一^[1]。根据我国住房和城乡建设部事故通报, 2018

年全国共发生安全事故 734 起、死亡 840 人, 比 2017 年事故起数增加 42 起、死亡人数增加 33 人, 分别上升 6.1% 和 4.1%^[2]。我国建筑安全生产形势依然严峻, 因此, 识别事故致因因素, 剖析致因因素之间的相互逻辑影响关系, 从而有针对性地进行事故预防管控具有重要意义。

收稿日期: 2020-01-19

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51408463); 西安建筑科技大学基础科研项目 (X20180011)

作者简介: 李 华, 博士, 副教授, 主要研究方向为企业风险评估与安全管理、建筑防火与安全监控、公共安全与应急管理。

通信作者: 金 萌, 硕士研究生, 主要研究方向为企业风险评估与安全管理。

事故致因理论是分析事故原因和预防事故的理论基础。建筑安全事故涉及的组织较多且关系复杂,传统的事事故致因模型不能有效分析多组织之间因素及因素间的交互影响。系统理论事故建模与过程(Systems-Theoretic Accident Modeling and Process, STAMP) 是针对复杂系统提出的事故致因模型,其可从控制的角度厘清各组织内及组织间的事事故原因。牛丰等^[3]运用 STAMP 模型对杭州地铁 1 号线湘湖站基坑坍塌事故进行分析,结果表明 STAMP 模型在地铁事故致因分析方面具有较高的可行性;祝楷^[4]首次将 STAMP 模型运用到煤矿事故原因的分析,为探求复杂煤矿系统的安全隐患提供更广泛的视角;Gong 等^[5]基于 STAMP 模型对中国东黄输油管道泄漏爆炸事故进行系统分析,表明 STAMP 模型在管道运输领域的适用性。从已有研究可知,STAMP 模型虽已广泛应用于不同领域复杂系统事故中,但其仅限于定性分析事故原因,未能定量剖析事故原因间的逻辑关系及相互作用。近年来,许多学者运用解释结构模型(Interpretative Structural Modeling Method, ISM) 分析复杂系统因素间的相互作用关系。江新等^[6]运用 ISM 分析地下洞室施工人员风险感知影响因素间相互作用关系,耦合 ANP 确定因素权重,从而建立地下洞室施工人员风险感知系统脆弱性仿真模型;罗周全等^[7]运用 DEMATEL 和 ISM 相结合的方法对地下金属矿山人机系统的 15 个重要影响因素进行层次分析。

综上所述,本文基于 STAMP 模型的建筑工程安全控制结构,从物理层、基层、管理层、政府层 4 个层面,系统分析遴选事故的致因因素,运用灰色 DEMATEL 耦合 ISM 和 MICMAC 联合模型对致因因素进行量化分析,深入挖掘致因因素间的因果关系、影响路径及属性类型,以期为事故预防管控提供决策依据。

1 基础理论

1.1 STAMP 模型

系统理论事故建模与过程(Systems Theoretic Accident Modeling and Process, STAMP) 是由美国麻省理工学院 Leveson 教授^[8]于 2004 年提出的将安全问题转化为控制问题的 1 种事故致因理论模型。该模型认为事故是由不充分的控制和安全约束的缺失造成的。

STAMP 模型采用 3 种基本结构分析事故原因,即安全约束、分层控制结构和过程模型。系统是由各组件构成的,各组件间通过安全约束保证整个系统的安全性。分层控制结构按控制关系自上而下划分,如图 1 所示。上层子系统为下层子系统的安全操作提供安全约束,并接受来自下层的反馈信息;下层在上层为其制定的安全约束下运行,反馈实施结果给上层,供其做出决策^[3]。各控制层次之间的交互关系用过程模型表示,一般过程

模型包含控制器与控制过程、二者间的输出与反馈过程,以及过程输入和输出、外界信息的干扰,如图 2 所示。



图 1 分层控制结构

Fig. 1 Hierarchical control structure

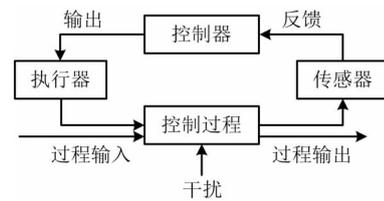


图 2 过程模型

Fig. 2 Process model

构建建筑工程安全控制结构是运用 STAMP 模型进行事故致因分析的基础。根据我国建筑工程项目运行实际,将安全控制结构层次分为政府层、管理层、基层、物理层。1) 政府层包含国家级监管部门和地方行业主管部门。国家级监管部门通过立法和出台规范标准,整体上把控建筑行业安全管理工作;地方政府和相关部门制订相应地方规章,并直接把控辖区内各工程项目的开展^[9]。2) 管理层包含建筑工程项目的各参建单位,采取组建项目部的组织形式使参建各方相互协调,互相约束,控制工程项目的安全和进度。建设单位是建设工程项目的投资方和管理方,通过向其他参建单位描述需求,接受来自其反馈等方式实现约束;勘察单位和设计单位接受建设单位的委托需求,为其提供真实、准确的勘察文件和设计文件;监理单位接受建设单位的委托需求,对施工现场进行安全生产监管和事故隐患整改落实;施工单位对施工现场的工程进度、质量管理、安全管理等进行全过程控制,是施工现场项目管理工作的主体。3) 基层包含施工现场的作业人员、管理人员等,作业人员接受施工单位的指令和约束,按照施工组织计划和安全规章制度施工,同时施工单位通过现场巡查、培训教育等方式对作业人员进行约束。4) 物理层包含机械设备、材料物资以及施工环境等,一线员工在实际的施工作业执行过程中,可能会遇到来自物理层各种因素的干扰。

1.2 灰色 DEMATEL—ISM 方法

解释结构模型(Interpretative Structural Modeling

Method,ISM) 是通过专家知识分析系统任意 2 因素间的影响关系,结合矩阵运算和计算机辅助方法,以有向图表示系统各因素之间的相互关系,从而构建更为直观可解释的结构模型^[10]。在传统 ISM 方法中,通过假设系统 2 因素之间仅存在二进制关系确定直接关系构建解释结构模型,而引入决策试验和评价试验法(Decision-making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL) 可更深入剖析 2 因素间的影响关系强度。灰色 DEMATEL—ISM 方法的具体步骤如下:

- 1) 定义系统因素集为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。
- 2) 确定 2 因素的初始影响关系矩阵 Z^k 。

邀请 m 位专家采用 0~4 评价分值对 2 因素的影响关系强度进行打分,专家打分的灰色语言量表见表 1。由于每个因素的分值并不是确定的数值,因此通过区间灰数处理来提高数据结果的客观性^[11]。将专家的评价分值转化为灰色评价变量,即: $\otimes x_{ij}^k \in (\underline{\otimes} x_{ij}^k, \overline{\otimes} x_{ij}^k)$ 。对灰色评价变量进行清晰化处理得到各专家对因素集的初始影响关系矩阵 Z^k 。

表 1 专家打分的灰色语言量表

Table 1 Grey language scale scored by experts

语言类别	评价分值	灰色评价变量
无影响(NI)	0	0
非常低的影响(VL)	1	>0~0.25
低影响(LI)	2	>0.25~0.5
高影响(HI)	3	>0.5~0.75
非常高的影响(VHI)	4	>0.75~1

清晰化处理过程如下:

- ①灰数上、下限进行标准化处理,如式(1)所示:

$$\begin{aligned} \overline{\otimes} x_{ij}^k &= (\overline{\otimes} x_{ij}^k - \min \overline{\otimes} x_{ij}^k) / \Delta_{\min}^{\max} \\ \underline{\otimes} x_{ij}^k &= (\underline{\otimes} x_{ij}^k - \min \underline{\otimes} x_{ij}^k) / \Delta_{\min}^{\max} \\ \Delta_{\min}^{\max} &= \max \overline{\otimes} x_{ij}^k - \min \underline{\otimes} x_{ij}^k \end{aligned} \quad (1)$$

式中: k 为专家数, $k = 1, 2, \dots, m$; $\otimes x_{ij}^k$ 为专家 k 对因素 C_i 和 C_j 影响关系强度评价分值; $\overline{\otimes} x_{ij}^k, \underline{\otimes} x_{ij}^k$ 为灰色评价变量上限、下限; $\overline{\otimes} x_{ij}^k, \underline{\otimes} x_{ij}^k$ 为灰色评价变量上限标准值、下限标准值; Δ_{\min}^{\max} 为灰色评价变量最大上限与最小下限之差。

- ②清晰化处理,如式(2)所示:

$$Y_{ij}^k = \frac{\{\underline{\otimes} x_{ij}^k (1 - \underline{\otimes} x_{ij}^k) + (\overline{\otimes} x_{ij}^k \times \overline{\otimes} x_{ij}^k)\}}{(1 - \underline{\otimes} x_{ij}^k + \overline{\otimes} x_{ij}^k)} \quad (2)$$

- ③求出清晰值 Z_{ij}^k ,如式(3)所示:

$$Z_{ij}^k = \min \otimes x_{ij}^k + Y_{ij}^k \cdot \Delta_{\min}^{\max} \quad (3)$$

式中: Z_{ij}^k 为第 k 位专家的初始影响关系矩阵 Z^k 的元素。

- 3) 计算加权影响关系矩阵 Z ,如式(4)所示:

$$z_{ij} = \omega_1 z_{ij}^1 + \omega_2 z_{ij}^2 + \dots + \omega_k z_{ij}^k \quad (4)$$

式中: z_{ij} 为加权影响关系矩阵 Z 的元素; ω_i 为专家权重比例,且 $\sum_{i=1}^k \omega_i = 1$ 。

- 4) 计算标准化影响关系矩阵 C ,如式(5)所示:

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n z_{ij}}, (i, j = 1, 2, \dots, n) \\ C &= S \cdot Z \end{aligned} \quad (5)$$

式中: S 为加权影响关系矩阵中最大行向量之和的倒数。

- 5) 计算综合影响关系矩阵 T ,如式(6)所示:

$$T = C(I - C)^{-1} \quad (6)$$

式中: I 为单位矩阵。

- 6) 计算整体影响关系矩阵 H ,如式(7)所示:

$$H = I + T \quad (7)$$

- 7) 建立可达矩阵 K ,如式(8)所示。

给定阈值 λ , 计算可达矩阵。 $k_{ij} = 1$ 表示因素 C_i 可以影响因素 C_j , $k_{ij} = 0$ 表示因素 C_i 不能影响因素 C_j 。阈值 λ 可根据综合影响关系矩阵 T 中所有元素的均值 α 和标准差 β 相加所得^[12]。

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

- 8) 根据可达矩阵 K 进行层级划分,绘制 ISM 模型。首先确定可达集合 P_i 和先行集合 Q_i ,可达集合和先行集合计算如式(9)所示:

$$\begin{aligned} P_i &= \{c_j \mid c_j \in C, k_{ij} \neq 0\}, (j = 1, 2, \dots, n) \\ Q_i &= \{c_i \mid c_i \in C, k_{ij} \neq 0\}, (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (9)$$

随后对每个因素验证 $P_i = P_i \cap Q_i, i = 1, 2, \dots, n$,若成立,则因素 C_i 为最底层因素。然后从可达矩阵 K 中删除对应的行和列,并重复上述过程直至所有因素分配完毕,绘制因素之间的多级递阶层次模型图。

1.3 MICMAC 方法

交叉影响矩阵相乘法(Matrix impacts cross-reference multiplication applied to a classification, MICMAC) 是运用系统中因素的反应路径和层次循环研究因素间相互关系的扩散性,通过 ISM 的可达矩阵中元素之和计算各因素的驱动力和依赖度,并进行分类以便于理解因素在系统中的实质作用^[13]。MICMAC 分析步骤如下:

- 1) 计算系统各因素的驱动力 DR_i 和依赖度 DE_j ,如

式(10)所示:

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

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

(10)

式中: 驱动力 DR_i 表示该因素对系统其他因素的驱动程度; 依赖度 DE_j 表示该因素受到系统其他因素的依赖程度。

2) 根据各因素的驱动力和依赖度, 将因素分成 4 类: 自治簇 (Autonomous)、依赖簇 (Dependents)、联系簇 (Linkage) 和独立簇 (Independent)。自治簇因素具有较低的驱动力和较低的依赖度, 此集群的因素与其他因素几乎无相互作用; 依赖簇因素具有较弱的驱动力和较强的依赖度, 此集群的因素对其他因素有很强的依赖性; 联系簇因素具有强大的驱动力和依赖度, 此集群的因素会影响其他因素, 也可能会受到其他因素的影响; 独立簇因素具有较强的驱动力和较弱的依赖度, 此集群的因素对其他因素有重大影响。

2 实例分析

2016 年 11 月 24 日, 江西丰城发电厂 3 期扩建工程 D 标段的 7 号冷却塔筒壁混凝土突然坍塌, 随后施工平台、模架体系及平桥上的作业人员一起坠落, 事故持续时间 24 s, 造成 73 人死亡、2 人受伤, 直接经济损失 10 197.2 万元^[14]。

2.1 丰城发电厂 3 期扩建工程安全控制结构

为系统地分析造成江西丰城冷却塔坍塌事故的相关方原因, 根据工程项目实际的运行过程, 构建江西丰城发电厂 3 期扩建工程的安全控制结构, 如图 3 所示。

2.2 事故致因因素的遴选分析

根据《江西丰城发电厂“11·24”冷却塔施工平台坍塌特别重大事故调查报告》, 结合江西丰城发电厂 3 期扩建工程的安全控制结构, 从物理层、基层、管理层、政府层 4 大系统层次出发, 剖析各层次控制结构中导致

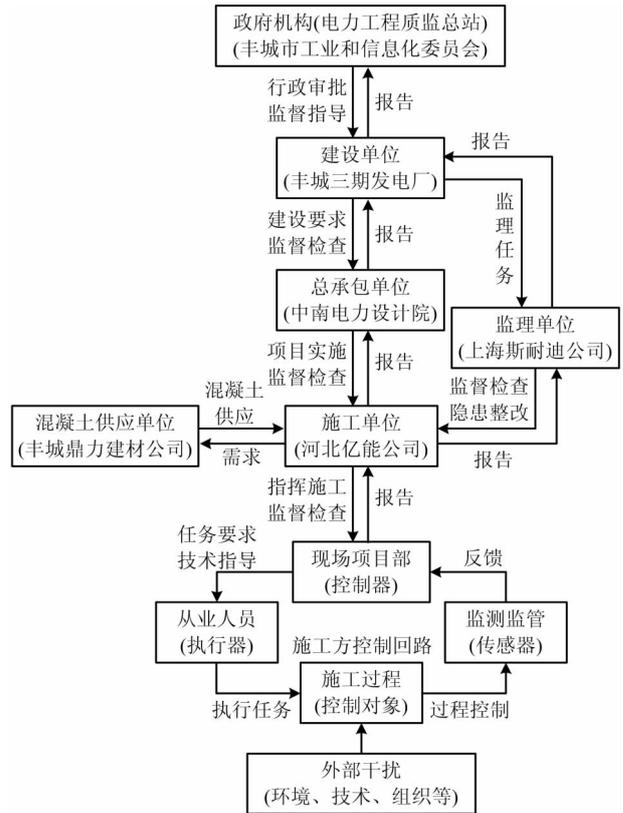


图 3 江西丰城发电厂 3 期扩建工程安全控制结构
Fig. 3 Safety control structure of Jiangxi Fengcheng power plant phase III expansion project

事故发生的原因^[15]。经分类汇总后得到丰城冷却塔坍塌事故的致因因素 21 个, 各致因因素所处的系统层次、控制结构、具体表现见表 2。

2.3 事故致因因素的定量计算分析

事故致因因素定量计算分为 3 个步骤: 确定致因因素的影响关系强度; 运用灰色 DEMATEL - ISM 进行致因因素的多级递阶层次划分; 运用 MICMAC 进行驱动力、依赖度分析。

1) 通过对丰城冷却塔坍塌事故调查报告分析, 结合

表 2 基于 STAMP 模型的丰城冷却塔坍塌事故致因因素分析

Table 2 Analysis on casual factors for Fengcheng cooling tower collapse accident based on STAMP model

系统层次	控制结构	致因因素	具体表现
物理层	材料问题	混凝土存在问题 C_1	拆除模板时, 上节模板的混凝土强度未达到设计规定的 6 MPa; 混凝土未按要求添加外加剂, 导致混凝土质量不符合要求
	环境影响	天气条件恶劣 C_2	当地气温骤降, 且为阴有小雨天气
	施工人员	违规作业 C_3	在混凝土强度未达到设计标准之前, 工人违规拆除模板
基层	管理人员	模板拆除作业管理失控 C_4	未将混凝土同条件养护试块送至指定的第三方试验室进行强度检测, 未对拆模作业进行管理规定和书面控制记录, 未在拆模前通知总承包和监理单位
		违规指挥 C_5	安排施工人员违规进行垂直交叉作业

表2(续)

系统层次	控制结构	致因因素	具体表现
管理层	施工单位	安全生产管理机构缺失 C_6	未按规定设置独立安全生产管理机构,安全管理人员数量不符合规定要求,对施工现场的安全、质量管理重点把控不准确
		现场安全检查缺失 C_7	对施工现场检查不深入,未发现施工现场拆模等关键工序管理失控和技术管理存有漏洞等问题
		安全技术措施缺失 C_8	未将筒壁工程作为危险性较大的分部分项工程进行管理,施工方案存在重大缺陷,未按要求制定拆模管理控制措施,未按要求制定冬期施工方案
		安全培训教育缺失 C_9	安全培训教育不扎实
		安全技术交底缺失 C_{10}	未组织全员交底,安全技术交底不认真,交底内容缺乏针对性
	监理单位	施工方案审查不严 C_{11}	对施工方案审查不严格,未发现方案中缺少拆模工序管理措施的问题
		专职监理人员配备不足 C_{12}	监理单位对项目监理部的人员配置不满足监理合同要求,项目监理部土建监理工程师数量不能满足日常工作需要
		现场监理工作严重失职 C_{13}	对垂直交叉作业问题未进行有效监督,未按要求在浇筑混凝土时旁站,对施工单位项目经理长期不在岗的问题监理不到位等
		安全监管职责缺失 C_{14}	履行总承包施工管理职责缺位,组织安全检查不认真、不深入,未发现和制止施工单位项目部违规拆模和浇筑混凝土等不按施工技术标准施工的行为
		总承包单位	压缩工期技术论证缺失 C_{15}
安全生产应急演练缺失 C_{16}	对安全生产和应急演练工作不重视,自项目部成立以来未组织开展过项目全员安全生产应急演练		
建设单位	随意压缩工期 C_{17}	在没有进行技术论证和评估的基础上,将7号冷却塔筒壁工程的项目工期从212 d减少至110 d	
	对参建各方监督管理不力 C_{18}	对不符合要求的监理人员资格审查不严,未按规定对现场监理人员进行季度评议;未发现施工方案存在缺陷;未发现施工现场违章作业等问题	
	项目建设组织权责混乱 C_{19}	工程建设指挥部成员无明确分工,也未对有关部门和人员确定工作职责,相关领导权责不一	
	违规组建工程项目站 C_{20}	违反规定使用建设单位人员组建工程质量监督项目站,导致政府委托的质量监督缺失	
政府层	政府机构	监督检查工作失察 C_{21}	未发现和查处建设单位未按照规定备案安全生产管理情况的问题,未检查丰城发电厂3期扩建工程的工程质量监督工作,对现场施工管理、质量管理存在的严重问题失察、失处

STAMP模型整理得出导致坍塌事故的21个致因因素。邀请4位专家对各致因因素间的影响关系程度进行打分,设定专家的意见同样重要,并分配相同的权重,即 $\omega_i = 0.25 (i = 1, 2, 3, 4)$ 。

2) 通过4位专家对各致因因素间的影响关系打分,得到 $n \times n$ 的评价分值矩阵,根据表1将4位专家的评价分值矩阵转换成 $n \times n$ 的灰色评价变量矩阵。运用式(1)~(3)将4位专家的灰色评价变量矩阵进行清晰化处理得出初始影响关系矩阵 Z^k ;运用式(4)计算出加权影响关系矩阵 Z ,运用式(5)得到标准化影响关系矩阵 C ,运用式(6)得到综合影响关系矩阵 T ,运用式(7)得

到整体影响关系矩阵 H 。根据综合影响关系矩阵 T ,计算出阈值 $\lambda = 0.0533$,并根据式(8)将整体影响关系矩阵 H 转换为可达矩阵 K 。根据式(9)运用MATLAB软件对可达矩阵 K 进行层级划分,构建丰城冷却塔坍塌事故致因因素的11级递阶层次模型。参照可达矩阵 K 中的元素值,用箭线将各致因因素进行连接,从而得出具有相互作用关系的解释结构模型图,如图4所示。

3) 根据可达矩阵 K ,运用式(10)计算丰城冷却塔坍塌事故各致因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,标出致因因素在坐标系中的位置,绘制出驱动力—依赖度分类图,如图5所示。

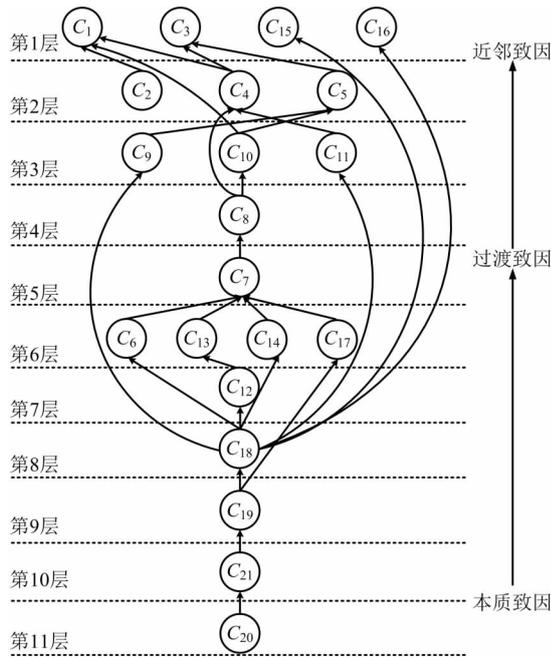


图 4 事故致因因素递阶层次模型

Fig. 4 Hierarchical model of accident causal factors

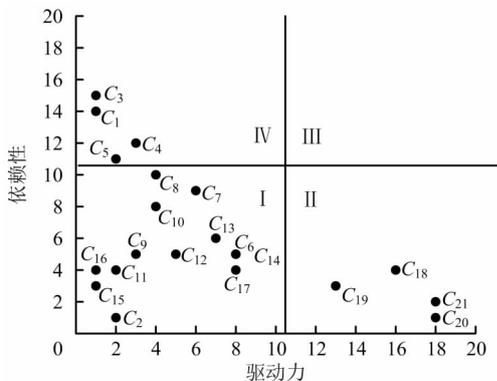


图 5 各致因因素的驱动力—依赖性分类

Fig. 5 Driving force-dependent classification for each causal factor

2.4 结果分析

1) 多级递阶层次模型分析

由图 4 可知,近邻致因位于模型中的第 1 层,包括 C_1, C_3, C_{15}, C_{16} 4 个致因因素,其是导致丰城冷却塔坍塌事故的直接原因。过渡致因位于模型中的第 2 ~ 9 层,包括 $C_2, C_4, C_5, C_9, C_{10}, C_{11}, C_8, C_7, C_6, C_{13}, C_{14}, C_{17}, C_{12}, C_{18}, C_{19}$ 15 个致因因素,此 15 个因素起着连接本质致因与近邻致因因素之间关系的作用,是导致事故发生的间接因素。本质致因位于模型中的第 10 ~ 11 层,包括 C_{20}, C_{21} 2 个致因因素,其为致因因素的宏观表现形式,可通过影响过渡致因因素的方式,对近邻致因因素产生作用。

2) 驱动力—依赖度分类图分析

由图 5 可知,将致因因素分为 3 类:自治簇因素、独立簇因素和依赖簇因素。

①属于自治簇(第 I 象限)的致因因素有 13 个,即 $C_2, C_6 \sim C_{17}$ 。 C_2 属于物理层因素中的环境致因, $C_6 \sim C_{17}$ 属于管理层因素致因。其具有较低的驱动力和较低的依赖性,但对基层因素和政府层因素间的相互影响起到承上启下的作用。政府层一旦出现问题,会影响管理层的决策判断,从而影响基层从业人员的行为,会较大幅度地增加事故发生的可能。因此,自治簇因素是事故预防管控中应首先进行治理的致因。管理层的各单位应贯彻落实安全生产责任制,合理划分安全生产责任及目标,建立健全安全生产奖惩机制,从根本上保障项目的安全管理水平。

②属于独立簇(第 II 象限)的致因因素有 4 个,即 $C_{18} \sim C_{21}$ 。 C_{18} 和 C_{19} 属于管理层因素中的建设单位致因, C_{20} 和 C_{21} 属于政府层致因因素。其具有较高的驱动力和较低的依赖性,其中 C_{20} 和 C_{21} 是驱动力最大的 2 个致因因素,在 ISM 模型中位于最底层,是深层次的致因因素,其会通过影响其他致因因素从而导致事故的发生。政府层因素对管理层及基层的行为均具有较强的影响力和把控力,政府的相关立法、强制规定和合理监督是推动各结构层次有效进行安全生产管理的重要力量。因此,从政府层面规范组织建设、加强执法守力度、加强监督检查违规处理力度,可从根源上遏制事故的发生。

③属于依赖簇(第 IV 象限)的致因因素有 4 个,即 $C_1, C_3 \sim C_5$ 。 C_1 属于物理层因素的材料质量致因, $C_3 \sim C_5$ 属于基层因素中的施工人员和管理人员致因。其通常具有较高的依赖性和较低的驱动力,其中 C_3 的依赖性最高,是导致事故的发生的直接原因。从业人员的行为是否遵守规章制度、建筑材料质量的合格与否均关乎建筑施工的安全。因此,此类因素需要依赖其他因素的解决而被解决。如管理层可以通过继续教育、专业知识讲座、现场观摩、VR 体验式教育等多种形式的安全教育培训来促进从业人员业务能力和安全意识的增强,从而解决违章操作和违规指挥等不安全行为;政府层可加大对设备材料的技术创新和研发,积极引进各种先进技术和先进设备,促进施工工艺水平的提升。

3 结论

1) 基于 STAMP 系统事故理论模型,构建建筑施工安全控制结构,从物理层、基层、管理层、政府层 4 个控制层面入手识别导致事故发生的致因因素;运用灰色 DEMATEL 和 ISM 方法建立致因因素的多级递阶层次模

型;运用 MICMAC 法深层次剖析致因因素的属性特征。

2) 将基于 STAMP 模型的量化分析方法运用到江西丰城发电厂“11·24”冷却塔施工平台坍塌特别重大事故中,从各层次控制结构中识别并筛选出导致事故发生的 21 个致因因素,构建 11 层递阶层次结构模型,并将致因因素分为自治簇因素、独立簇因素和依赖簇因素 3 大类,分析结果与事故调查报告相契合,且能更全面地说明各层次结构间的相互作用。

3) 为预防和控制建筑安全事故的发生,应结合各层次因素属性有针对性地提出预防管控措施。基层和物理层因素的解决需要依赖其他因素,如对于一线员工违规作业,管理层应组织安全教育培训工作来促进其业务能力和安全意识的增强;对于材料设备问题,政府层应加大技术创新和研发,促进施工工艺水平的提升。管理层的各单位也应贯彻落实安全生产责任制,从根本上保障项目的安全管理水平。政府层应规范组织建设、加强执法守力度和违规处理力度,从深层根源上遏制事故的发生。

参考文献

- [1] 王玉光. 浅谈在新形势下做好建筑业安全生产工作的几点建议[J]. 科技资讯,2010(27):87.
WANG Yuguang. Some suggestions on safety production of construction industry in the new situation[J]. Science and Technology Information,2010(27):87.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部 住房和城乡建设部办公厅. 关于 2018 年房屋市政工程生产安全事故和建筑施工安全专项治理行动情况的通报[EB/OL]. (2019-03-22) [2020-03-27]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201903/t20190326_239913.html.
- [3] 牛丰,王昱,周诚. 基于 STAMP 模型的地铁施工安全事故致因分析[J]. 土木工程与管理学报,2016,33(1):73-78.
NIU Feng, WANG Yu, ZHOU Cheng. Analysis of safety accidents caused by subway construction based on STAMP model[J]. Journal of Civil Engineering and Management,2016,33(1):73-78.
- [4] 祝楷. 基于系统论的 STAMP 模型在煤矿事故分析中的应用[J]. 系统工程理论与实践,2018,38(4):1069-1081.
ZHU Kai. Application of STAMP model in coal mine accident analysis[J]. Systems Engineering-Theory&Practice,2018,38(4):1069-1081.
- [5] GONG Y H, LI Y T. STAMP-based causal analysis of China-Donghuang oil transportation pipeline leakage and explosion accident[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2018,56,402-413.
- [6] 江新,陈瑶,胡文佳,等. ISM 耦合 ANP 的洞室施工人员风险感知系统脆弱性仿真分析[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(3):121-127.
JIANG Xin, CHEN Yao, HU Wenjia, et al. Simulation analysis on vulnerability of risk perception system for cavern construction workers with ISM coupling ANP[J]. Journal of Safety Science and Technology,2019,15(3):121-127.
- [7] 罗周全,程鹏毅. 基于 DEMATEL-ISM 的地下金属矿山人机系统事故影响因素分析[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(12):145-151.
LUO Zhouquan, CHENG Pengyi. Analysis on factors affecting accidents of man-machine system in underground metal mine based on DEMATEL-ISM[J]. Journal of Safety Science and Technology,2017,13(12):145-151.
- [8] LEVESON N. A new accident model for engineering safer systems[J]. Safety Science,2004,42(4):237-270.
- [9] 周多. 基于风险矩阵的建筑施工安全风险政府监管研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [10] 周景阳,何鹏旺. 基于解释结构模型(ISM)的装配式建筑成本影响因素分析[J]. 工程管理学报,2019,33(1):39-44.
ZHOU Jingyang, HE Pengwang. Analysis the influence factors of prefabricated building cost based on Interpretative Structural Model (ISM) [J]. Journal of Engineering Management,2019,33(1):39-44.
- [11] CUI L, CHAN H K, ZHOU Y Z, et al. Exploring critical factors of green business failure based on Grey-Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) [J]. Journal of Business Research,2019,98:450-461.
- [12] 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.
- [13] 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.
QIN Xuan, LI Aolei, ZHANG Rong, et al. Research on the relationship between the influencing factors of construction industrialization based on ISM: survey from Xiamen [J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition),2017,23(6):30-40.
- [14] 安全管理网. 江西丰城发电厂“11·24”冷却塔施工平台坍塌特别重大事故调查报告[EB/OL]. (2017-09-18) [2020-03-27]. <http://www.safehoo.com/Case/Case/Collapse/201709/495932.shtml>.
- [15] 章仕杰,傅贵. 基于 STAMP 模型的丰城坍塌事故原因分析[J]. 安全,2019,40(8):46-51.
ZHANG Shijie, FU Gui. Analysis of causes of collapse accident of fengcheng based on STAMP Model [J]. Safety & Security,2019,40(8):46-51.

(责任编辑:袁文静)