

文章编号: 1009-6094(2020)03-0793-08

## 基于 DEMATEL - ISM 的城市地下综合管廊火灾事故影响因素研究\*

王文和<sup>1,2</sup> 朱正祥<sup>1</sup> 米红甫<sup>1,2</sup>,  
王俊钦<sup>1</sup> 刘亚玲<sup>1</sup> 蒋新生<sup>3</sup>

(1 重庆科技学院安全工程学院 重庆 401331;

2 重庆市安全生产科学研究院 重庆 401331;

3 中国人民解放军陆军勤务学院油料系 重庆 401311)

**摘要:** 针对城市地下综合管廊火灾事故的复杂性和不确定性, 基于人、机、环境、管理、信息 5 个方面的事故致因因素, 考虑事故因素之间的交互与耦合作用, 通过德尔菲法确定了城市地下综合管廊火灾事故的影响指标体系, 提取了 18 个影响因素; 采用实验室决策分析法找出了关键事故致因因素, 在此基础上, 利用解释结构模型法划分事故因素间的层次结构, 构建城市地下综合管廊燃气舱火灾事故影响因素的多级递阶结构模型。结果表明: 城市地下综合管廊火灾事故是近邻致因、过度致因和本质致因因素共同作用的结果, 控制较低层级的影响因素是避免系统全面崩溃的有效途径。

**关键词:** 安全工程; 综合管廊; 火灾事故; 实验室决策分析法; 解释结构模型法; 递阶结构模型

中图分类号: X932 文献标志码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.0092

## 0 引言

城市生命线的各类地下管网现已朝着廊道化、综合化的趋势发展, 综合管廊项目正好迎合这种趋势而成为新兴市政基础设施建设的新趋势<sup>[1-3]</sup>。虽然城市地下综合管廊给城市基础设施功能的发挥带来了极大便利, 但由于其囊括了燃气、电力、通讯、热力、给排水等市政管线, 特别是其中的电力、通讯等管线带来的火灾风险却不容忽视<sup>[4-6]</sup>。火灾作为人类所面临的最严重的灾害之一, 其破坏力虽不及地震、火山喷发、洪涝、泥石流等自然灾害, 但其直接损失甚至达到了地震的 5 倍之多, 而且其发生的频率

也为各灾害之首<sup>[7]</sup>。复杂城市环境下承灾体的人口和建筑物密集、财富集中、重大危险源众多, 这些特点导致其具有很大的脆弱性。而在城市复杂的孕灾环境下, 综合管廊极易发生火灾等重大事故灾害。综合管廊火灾事故灾害一旦加之于城市这个巨大、复杂、多变的承灾体, 便会造成极重大的损失和极恶劣的影响, 故国内外学者针对城市地下综合管廊火灾进行了大量研究。如: Ishii 等<sup>[8]</sup> 最早以具体综合管廊工况为例, 分析了一种光纤火灾监测系统。Vauquelin 等<sup>[9]</sup> 最先搭建了一个综合管廊电缆舱模型, 通过火灾试验对烟气的扩散迁移进行了研究。林俊等<sup>[10]</sup> 首次利用 FDS 数值模拟软件研究了不同工况下管廊火灾烟气温度、蔓延速度、浓度及能见度的变化, 并针对综合管廊内防火分区的划分提出了建议。王立东等<sup>[11]</sup> 结合某小区设计工程实例, 分析了小区综合管廊的消防设计要点及其要求。孙伟俊等<sup>[12]</sup> 以十堰市综合管廊为例, 分析管廊的火灾危险性, 研究了火灾安全隐患监控与报警技术, 为保障管线安全运维提供了可行性措施。杨永斌<sup>[13]</sup> 建立综合管廊模型, 研究了点火源位于不同位置时管廊内部火场温度随时间的变化规律, 分析总结出了火势在不同电缆层间蔓延的趋势及火灾蔓延的范围。郝冠宇<sup>[14]</sup> 利用火灾动力学模拟软件 FDS 建立电缆舱模型, 通过设置不同工况研究了火灾后不同排烟方式的效果, 实现了电缆舱排烟方案的优化设计。钱喜玲<sup>[15]</sup> 采用数值模拟的方法研究了燃气舱发生火灾后在管舱中的烟气流动特性、温度场分布规律和气体后扩散规律, 并在此基础上提出相应的消防对策与措施。上述研究都是针对城市地下综合管廊火灾蔓延特性、消防设计方面的研究, 但是对地下综合管廊的火灾事故影响因素鲜有研究, 很少考虑到管廊内部火灾致因因素之间的交互和耦合作用, 缺乏一套能对城市地下综合管廊的火灾事故影响因素进行评估的模型和方法。鉴于此, 本文借鉴文献 [16-21] 对系统事故影响因素分析的方法, 集成实验室决策分析法 (DEMATEL) 和结构解释模型法 (ISM), 对地下综合管廊火灾事故影响因素进行分析, 挖掘事故的潜在性和系统致因, 识别关键因素, 获得城市地下综合管廊火灾事故系统模型, 以期对事故预防提供初步对策。

## 1 DEMATEL - ISM 方法简介

实验室决策分析法<sup>[22]</sup> (DEMATEL) 由美国 Bastille 国家重点实验室学者 Gabus 和 Fontela 于 20 世

\* 收稿日期: 2019-03-22

作者简介: 王文和, 教授, 从事油气化工过程及装备安全技术研究, whwang@cqst.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51704054); 国家应急管理部重大事故预防科技攻关项目 (Chongqing-0001-2018AQ); 重庆科技学院研究生科技创新项目 (YKJXCX1720723, YKJXCX1720715, YKJXCX1820717)

纪 70 年代提出,该方法不仅考虑了因素之间的两两直接影响关系,还考虑了所有因素之间的间接影响关系,是一种分析因素集对系统综合影响的有效方法。解释结构模型法<sup>[23]</sup>(ISM)是结构模型化技术的一种,被广泛应用于现代系统工程分析中,它将复杂的系统分解为若干子系统要素,利用人们的实践经验和知识及计算机的帮助,最终构成一个多级递阶的结构模型,该方法以定性分析为主,可以把模糊不清的思想、看法转化为直观且具有良好结构关系的模型。

复杂系统事故的成因复杂,致因因素众多。采用 DEMATEL-ISM 方法可有效确定因素间的因果关系,得到导致事故发生的深层次因素。DEMATEL-ISM 方法的思路是基于 DEMATEL 方法得到综合影响矩阵,鉴于因素对本身的影响,再利用 ISM 方法得到整体影响矩阵,通过给定阈值的优化获得可达矩阵,最终划分事故之间的层次结构,进而得到事故系统之间的关系。

## 2 城市地下综合管廊火灾事故影响因素指标体系的构建

在事故致因方面,Leveson<sup>[24]</sup>指出复杂系统的事故致因包括部件失效、交互紊乱和外界环境扰动,当

这 3 种致因因素缺乏约束或者约束失效就可能導致事故发生。汪送等<sup>[25-26]</sup>指出部件失效、交互紊乱、环境扰动、适应性衰退和信息缺乏是复杂系统安全事故的 5 类致因因素。本文基于人、机、环境、管理、信息 5 个方面,通过文献调研和典型事故分析,总结得到城市地下综合管廊火灾事故影响因素 22 个,分别是机械设备故障、人为失误、安全文化薄弱、生产水平低、安全监管失效、非功能性交互、知识层次低、不合理控制、物质交互受阻、能量交互受阻、信息交互受阻、人员安全意识差、系统结构脆性、安全知识更新慢、事故应急能力差、认知缺陷、信息不确定性、事件通报缺失、施工质量不达标、管廊监测仪器失效、消防设备缺陷、设备线路老化。为保证指标体系建立的可靠性,采用德尔菲法对所确定的因素进行修正。本次共邀请 5 名火灾安全相关专家参与事故因素修正,针对初选的 22 个城市地下综合管廊火灾事故影响因素,制作专家问卷来对初选因素的影响程度进行评定。经与专家反复讨论(考虑到在管廊建设阶段的前期,生产水平低和施工质量不达标 2 因素造成管廊火灾事故发生的可能偏低;知识层次低和人员安全意识差 2 因素可划分为认知缺陷的下一级因素指标)最终确定出 18 个城市地下综合管廊火灾事故影响因素,见表 1。

表 1 城市地下综合管廊火灾事故影响因素指标体系

Table 1 Index system of influencing factors for fire accident of urban underground integrated pipe gallery

编号	影响因素	含义
$\alpha_1$	机械设备故障	主要指管廊运维过程中机械设备未能按照正常条件运行
$\alpha_2$	人为失误	指人员未按照规定进行的错误操作或人员故意破坏
$\alpha_3$	安全文化薄弱	指人员安全观念淡薄,安全文化氛围低,安全教育培训不足
$\alpha_4$	安全监管失效	指对管廊监管不足
$\alpha_5$	非功能性交互	指管廊运维过程中运行参数的误调节
$\alpha_6$	不合理控制	指系统智能调度失当或者控制指令失当
$\alpha_7$	物质交互受阻	指管廊内各输送介质无法正常交互
$\alpha_8$	能量交互受阻	指管廊内提供能量的设备无动力输出
$\alpha_9$	信息交互受阻	指管廊内各项监控指标数据未能及时反馈到控制中心
$\alpha_{10}$	系统结构脆性	指管廊系统和设施设备的隐性缺陷
$\alpha_{11}$	安全知识更新慢	指安全技能知识陈旧,新的安全知识和技能未被及时接受和掌握
$\alpha_{12}$	事故应急能力差	指不能及时采取有效应急措施应对突然情况
$\alpha_{13}$	认知缺陷	指对管廊内存在的安全隐患和事故缺乏认知和辨识
$\alpha_{14}$	信息不确定性	指信息缺失导致的决策不当
$\alpha_{15}$	事件通报缺失	指出现事故事件未及时通报,或者对于同类单位发生的事故事件缺乏重视
$\alpha_{16}$	管廊监测仪器失效	指管廊内气体、温度、湿度监测仪器失效
$\alpha_{17}$	消防设备缺陷	指消防设备不足或者消防设备失效
$\alpha_{18}$	设备线路老化	指管廊内电线电缆老化

### 3 基于 DEMATEL - ISM 法的城市地下综合管廊火灾事故影响因素模型的建立

#### 3.1 规范化直接影响矩阵的计算

根据德尔菲法修正后的城市地下综合管廊火灾事故影响指标, 将指标体系的集合记为  $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{17}, \alpha_{18}\}$ , 将两个指标之间的影响关系记为  $\beta$  (表

示事故因素  $\alpha_i$  对  $\alpha_j$  的影响程度)。邀请 5 名火灾安全相关专家对所提出的 18 个事故因素, 按照较强、强、一般、弱、无 5 个等级分别赋值 4、3、2、1、0 来表示两两因素之间的影响程度, 得到 5 个初始直接影响矩阵。为消除专家个体知识差异, 采用求平均值的方法对专家数据进行处理, 得到直接影响矩阵  $B$ , 具体结果如下。

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1.6 & 0.8 & 1.8 & 1.2 & 1.0 & 1.2 & 0.8 & 2.0 & 1.0 & 0.4 & 1.4 & 1.0 & 0.8 & 1.0 & 1.4 & 0.2 & 1.2 \\ 1.2 & 0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.6 & 1.2 & 1.8 & 1.6 & 1.6 & 0.8 & 1.2 & 1.2 & 1.0 & 1.0 & 0.8 & 1.0 & 1.4 \\ 1.6 & 3.2 & 0 & 1.8 & 2.0 & 1.8 & 3.0 & 2.2 & 1.8 & 2.8 & 2.2 & 3.0 & 2.2 & 2.8 & 2.6 & 2.0 & 1.8 & 1.6 \\ 3.0 & 1.2 & 1.2 & 0 & 3.2 & 2.2 & 1.6 & 1.0 & 2.6 & 3.0 & 1.6 & 1.8 & 1.0 & 1.4 & 1.8 & 1.0 & 1.0 & 1.2 \\ 1.2 & 1.2 & 0.6 & 3.6 & 0 & 2.8 & 2.8 & 2.2 & 2.0 & 2.0 & 2.0 & 1.0 & 1.2 & 3.0 & 1.8 & 1.8 & 1.0 & 2.0 \\ 2.8 & 1.2 & 0.8 & 2.0 & 2.0 & 0 & 2.0 & 1.8 & 2.4 & 1.0 & 1.8 & 1.2 & 1.8 & 2.8 & 0.8 & 2.8 & 1.6 & 1.2 \\ 0.8 & 1.4 & 2.0 & 0.8 & 1.2 & 2.0 & 0 & 3.2 & 3.2 & 2.2 & 1.0 & 2.0 & 1.2 & 1.8 & 0 & 0.8 & 1.2 & 1.0 \\ 1.0 & 2.2 & 0.4 & 0.8 & 1.0 & 1.6 & 2.0 & 0 & 1.0 & 0.2 & 0.2 & 1.6 & 1.2 & 1.0 & 1.6 & 1.4 & 0.8 & 1.8 \\ 0.2 & 2.0 & 2.0 & 1.2 & 2.0 & 2.8 & 1.2 & 1.6 & 0 & 1.8 & 1.8 & 3.2 & 2.4 & 2.6 & 0.0 & 1.0 & 1.0 & 0.6 \\ 1.8 & 2.2 & 3.2 & 1.6 & 1.0 & 2.2 & 2.0 & 2.8 & 1.8 & 0 & 3.2 & 2.0 & 1.2 & 2.6 & 1.6 & 0.8 & 1.2 & 1.4 \\ 1.4 & 2.0 & 3.8 & 2.0 & 2.6 & 2.2 & 1.8 & 1.2 & 1.0 & 3.2 & 0 & 2.2 & 1.0 & 2.8 & 0.8 & 1.4 & 2.6 & 2.2 \\ 0.8 & 2.2 & 1.0 & 2.0 & 2.0 & 2.4 & 1.0 & 1.6 & 1.0 & 2.0 & 1.0 & 0 & 2.8 & 3.0 & 1.0 & 1.0 & 0.8 & 1.0 \\ 2.6 & 3.6 & 2.0 & 3.0 & 3.0 & 3.0 & 1.2 & 2.2 & 2.0 & 2.2 & 2.0 & 3.0 & 0 & 2.2 & 2.2 & 2.4 & 1.6 & 1.6 \\ 2.8 & 2.2 & 2.4 & 2.6 & 2.2 & 2.0 & 1.6 & 2.8 & 2.2 & 2.2 & 1.8 & 2.0 & 2.6 & 0 & 2.0 & 1.0 & 1.4 & 2.4 \\ 1.0 & 1.0 & 1.8 & 1.0 & 1.5 & 2.0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 & 0.2 & 2.0 & 1.6 & 1.6 & 0 & 1.0 & 1.2 & 1.0 \\ 1.4 & 1.0 & 1.0 & 1.2 & 1.0 & 2.8 & 0.8 & 2.0 & 1.0 & 0.8 & 1.4 & 1.0 & 0.8 & 1.0 & 1.0 & 0 & 1.0 & 1.2 \\ 0.2 & 0.4 & 0.8 & 1.0 & 1.0 & 1.6 & 1.2 & 1.8 & 1.6 & 1.6 & 0.6 & 1.2 & 1.2 & 1.0 & 1.0 & 1.4 & 0 & 1.4 \\ 1.6 & 1.2 & 0.4 & 2.0 & 1.2 & 1.4 & 1.8 & 2.2 & 2.2 & 1.2 & 0.8 & 1.0 & 1.2 & 2.6 & 0.8 & 2.8 & 2.0 & 0 \end{pmatrix}$$

对直接影响矩阵进行规范化处理, 得到规范化直接影响矩阵  $C$ 。

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

式中  $\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n \beta_{ij}$  为行和最大值, 规范化处理后有  $0 < c_{ij} < 1$ 。将取平均后的直接影响矩阵  $B$  带入式 (1), 计算出行和最大值为 39.8, 最终可求得规范直接影响矩阵。

#### 3.2 综合影响矩阵、中心度和原因度的计算

本文考虑到事故因素之间的间接影响及事故因素变化导致的波及效应, 采用直接影响和间接影响的综合累加方式, 通过式 (2) 可以确定每个因素相对于系统中最高因素的最终影响, 利用 Matlab 软件计算得到综合影响矩阵  $T$ 。将综合矩阵采用式 (3) 进行行相加得到事故因素影响度  $f$ , 采用式 (4) 进行列相加得到事故因素被影响度  $e_i$ 。利用式 (5) 和 (6) 将影响度和被影响度相加得到其中心度  $M_i$ , 相减得到其原因度  $N_i$ , 计算结果见表 2。

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

$$f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$e_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$M_i = f_i + e_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$N_i = f_i - e_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

#### 3.3 整体影响矩阵和可达矩阵的计算

利用式 (7) 可得到整体影响矩阵, 式中  $I$  为单位矩阵, 整体影响矩阵中元素的定义见式 (8)。为了得到可达矩阵  $K$ , 对于给定阈值  $\lambda$ , 采用式 (9) 和 (10) 计算。由于  $\lambda$  的取值直接影响可达矩阵的构成和后续层次结构的划分, 因此在本文中  $\lambda$  分别取 0.1, 0.15, 0.18, 0.2 得到不同阈值下事故因素的节点度表, 见表 3。并对不同阈值下的节点度进行重排列得到节点度衰减散点图, 见图 1。根据节点度适中和节点度较大节点落在 DEMATEL 方法所确定的关键节点域内的原则, 本文最终选取  $\lambda = 0.18$  作为给定阈值进行后续研究。

表2 DEMATEL法计算结果表  
Table 2 Calculation results table of DEMATEL

编号	影响因素	影响度	被影响度	中心度	原因度	中心度排序
$\alpha_1$	机械设备故障	1.572 658	2.160 209	3.732 867	-0.587 552	16
$\alpha_2$	人为失误	1.705 146	2.492 392	4.197 538	-0.787 246	13
$\alpha_3$	安全文化薄弱	3.154 175	2.088 366	5.242 541	1.065 809	4
$\alpha_4$	安全监管失效	2.487 023	2.459 563	4.946 586	0.027 460	8
$\alpha_5$	非功能性交互	2.681 121	2.432 286	5.113 407	0.248 834	6
$\alpha_6$	不合理控制	2.473 191	2.922 956	5.396 147	-0.449 765	3
$\alpha_7$	物质交互受阻	2.183 093	2.225 924	4.409 017	-0.042 831	11
$\alpha_8$	能量交互受阻	1.599 253	2.612 520	4.211 773	-1.013 266	12
$\alpha_9$	信息交互受阻	2.399 326	2.646 690	5.046 016	-0.247 364	7
$\alpha_{10}$	系统结构脆性	2.739 117	2.395 375	5.134 492	0.343 741	5
$\alpha_{11}$	安全知识更新慢	2.900 199	1.943 784	4.843 983	0.956 415	11
$\alpha_{12}$	事故应急能力差	2.296 169	2.549 793	4.845 961	-0.253 624	9
$\alpha_{13}$	认知缺陷	3.246 291	2.171 863	5.418 154	1.074 428	2
$\alpha_{14}$	信息不确定性	2.994 053	2.825 726	5.819 779	0.168 326	1
$\alpha_{15}$	事件通报缺失	1.684 289	1.763 805	3.448 094	-0.079 515	17
$\alpha_{16}$	管廊监测仪器失效	1.692 582	2.065 482	3.758 064	-0.372 900	15
$\alpha_{17}$	消防设备缺陷	1.602 469	1.775 286	3.377 756	-0.172 817	18
$\alpha_{18}$	设备线路老化	2.146 689	2.024 823	4.171 512	0.121 867	14

表3 不同 $\lambda$ 值下事故因素的节点分布表  
Table 3 Node distribution table of accident factors under different  $\lambda$  values

事故因素	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.18$	$\lambda = 0.2$
$\alpha_1$	15	5	1	0
$\alpha_2$	20	7	3	2
$\alpha_3$	28	19	9	4
$\alpha_4$	29	14	3	1
$\alpha_5$	29	13	5	3
$\alpha_6$	33	18	8	3
$\alpha_7$	24	10	1	0
$\alpha_8$	20	8	4	0
$\alpha_9$	29	13	6	0
$\alpha_{10}$	30	16	6	0
$\alpha_{11}$	26	16	5	1
$\alpha_{12}$	30	11	4	2
$\alpha_{13}$	29	19	10	6
$\alpha_{14}$	33	24	13	4
$\alpha_{15}$	14	2	1	0
$\alpha_{16}$	16	4	1	0
$\alpha_{17}$	13	1	1	0
$\alpha_{18}$	24	4	1	0

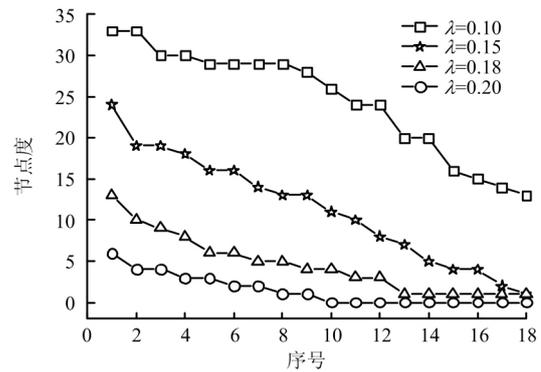


图1 不同 $\lambda$ 下事故因素节点度衰减散点图  
Fig.1 Accident factor nodal attenuation scatter plot under different  $\lambda$  values

$$H = I + T \tag{7}$$

$$h_{ij} = \begin{cases} > 0 & \text{当因素 } i \text{ 和因素 } j \text{ 有关联时} \\ 0 & \text{当因素 } i \text{ 和因素 } j \text{ 无关联时} \end{cases} \tag{8}$$

$$k_{ij} = 1 \quad \text{if } h_{ij} \geq \lambda (i, j = 1, 2, \dots, n) \tag{9}$$

$$k_{ij} = 0 \quad \text{if } h_{ij} < \lambda (i, j = 1, 2, \dots, n) \tag{10}$$

### 3.4 多级递阶结构模型的构建

对节点度为 0.18 的可达矩阵进行层级间的划

分 根据式 (11) 和 (12) 可计算出可达集合  $R_i$  及前因集合  $S_i$ 。对所求的可达集合和前因集合进行验证, 判断是否满足式 (13)。经验证, 当  $i=1, 2, 4, 6, 7, 8, 15, 16, 17, 18$  时, 满足  $R_i = R_i \cap S_i$ , 则表明这些因素为第一层因素, 即第一层因素指标集为  $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_{15}, \alpha_{16}, \alpha_{17}, \alpha_{18}\}$ , 这时划除矩阵中这些因素指标所对应的行和列。同理可得, 第二层因素指标集为  $\{\alpha_5, \alpha_{10}, \alpha_{12}, \alpha_{14}\}$ , 第三层因素指标集为  $\{\alpha_9\}$ , 第四层因素指标集为  $\{\alpha_3, \alpha_{11}\}$ , 第五层因素指标集为  $\{\alpha_{11}\}$ 。

$$R_i = \{\alpha_j | a_{ij} \in A, k_{ji} \neq 0\} \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{11}$$

$$S_i = \{\alpha_j | a_{ij} \in A, k_{ji} \neq 0\} \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{12}$$

$$R_i = R_i \cap S_i \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{13}$$

### 4 城市地下综合管廊火灾事故影响因素结构模型的分析

#### 4.1 城市地下综合管廊火灾事故影响因素指标分析

根据 DEMATEL - ISM 法计算出的因素中心度和原因度, 可绘制城市地下综合管廊火灾事故影响因素原因—结果图, 见图 2。

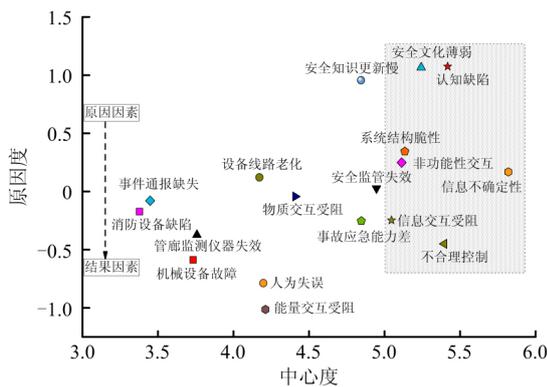


图 2 事故影响因素原因—结果图

Fig. 2 Cause-result diagram of influencing factors of accident

在城市地下综合管廊火灾事故影响因素中, 因素的中心度越大, 其重要程度就越大。由图 2 可知, 城市地下综合管廊火灾事故影响因素中, 安全文化薄弱、认知缺陷、系统结构脆性、非功能性交互、信息不确定性、信息交互受阻、不合理控制的重要性较大, 消防设备缺陷、事件通报缺失、管廊监测仪器失效、机械故障的重要性偏小, 其他因素处于中间

水平。这表明进行综合管廊火灾事故控制和分析时应重点考虑重要性较大的因素, 但也不能忽视重要性较小的因素对系统事故的影响。影响因素的原因度大于零, 则表明该因素在因素系统中为原因因素。分析可知原因因素按原因度由大到小分别是认知缺陷、安全文化薄弱、安全知识更新慢、系统结构脆性、非功能性交互、设备线路老化、信息不确定性、安全监管失效, 表明这些因素对于综合管廊火灾事故有着重要影响, 其中认知缺陷和安全文化薄弱是造成管廊火灾事故的主要动因。影响因素的原因度小于零, 则该因素为结果因素, 在结果因素中人为失误和能量交互受阻是结果要素中较重要的因素, 由此可知, 为有效预防和控制城市地下综合管廊火灾事故的发生应加强企业安全文化建设, 加大安全教育培训力度, 同时安全监督管理人员应着重监督现场人员正确进行生产活动, 防止人员误操作。

#### 4.2 城市地下综合管廊火灾事故影响因素多级递阶结构模型

基于复杂网络理论, 根据 DEMATEL - ISM 法计算出的各级指标集, 可获得城市地下综合管廊火灾事故影响因素多级递阶结构模型, 见图 3。

图 3 表明在地下综合管廊火灾事故影响因素之间有着复杂的联系, 这种联系可以出现在同一层级中, 也会跨越层级。在这些影响因素中, 节点度最多的因素为安全文化薄弱 ( $\alpha_3$ )、非功能性交互 ( $\alpha_5$ )、不合理控制 ( $\alpha_6$ )、系统结构脆性 ( $\alpha_9$ )、信息交互受阻 ( $\alpha_{10}$ )、安全知识更新慢 ( $\alpha_{11}$ )、认知缺陷 ( $\alpha_{13}$ )、信息不确定性 ( $\alpha_{14}$ ), 需要对这些因素进行重点关注。这些因素之间的关系密切相关, 关键因素节点与大多数因子节点具有因果关系, 原因因素可直接影响关键因素节点, 并导致事故的深度演变, 对系统间接导致事故的原因因素进行控制是防止系统全面崩溃而引发事故的关键。在该模型中, 处于层级 1 的因素为事故的近邻致因, 处于层级 2~4 的因素为事故的过度致因, 处于层级 5 的因素为事故的本质致因。安全知识更新慢是最底层的本质致因, 这表明应该强化对安全的认知能力, 增强对事故机理的了解, 及时学习和采纳新的安全知识。在层级 4 中, 安全文化薄弱和认知缺陷的节点度偏多, 需要对其进行重点关注, 因此要大力开展安全培训和教育。导致综合管廊火灾事故关键影响因素大部分分布于层级 1 和层级 2, 层级 1 中致因因素间关系复杂, 一旦发生风险容易迅速相互传递; 人为失误、不合理控制、物质交互受阻、能量交互受阻、事件通报缺失等

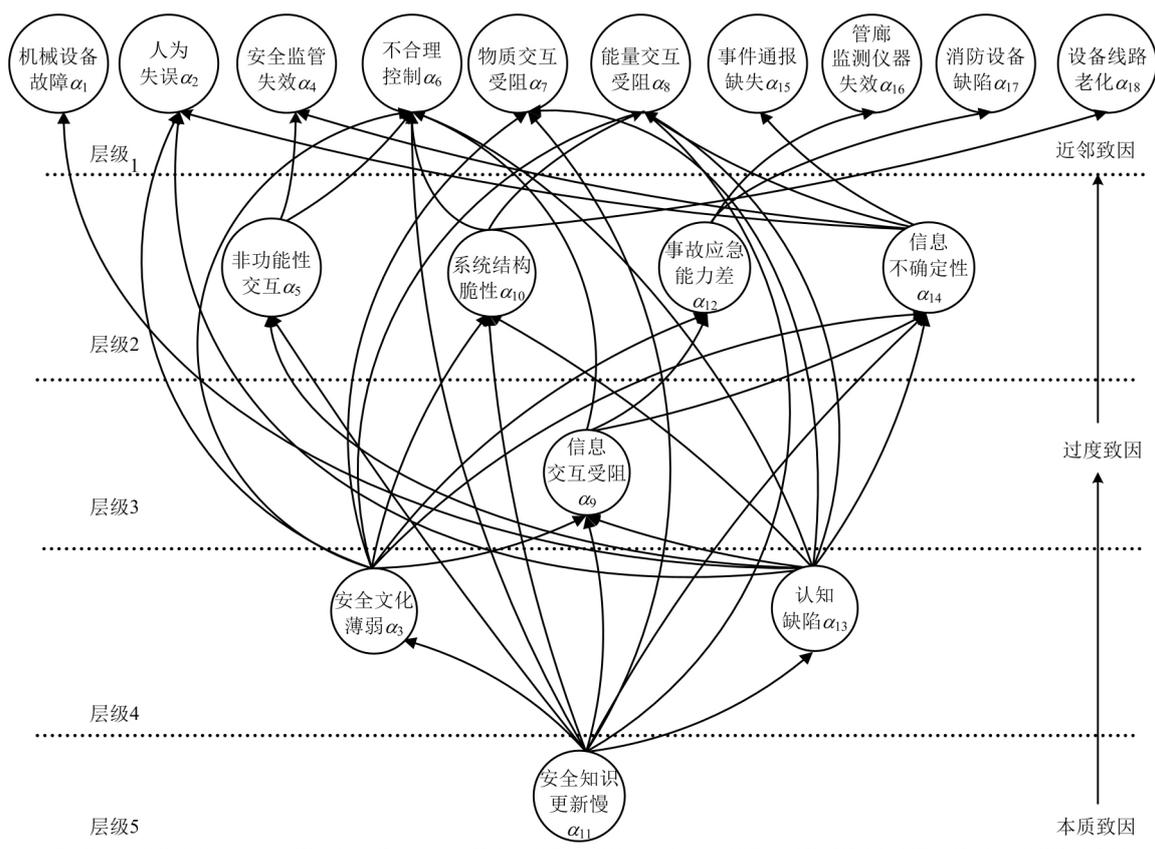


图3 城市地下综合管廊火灾事故影响因素多级递阶结构模型图

Fig. 3 Multilevel hierarchical structure model diagram influencing factors of fire accident in urban underground integrated pipe gallery

因素是最高的近邻致因,这些因素也是综合管廊常见火灾事故发生的直接诱导因素,加强对较低层级关键影响因素的控制是避免系统全面崩溃的主要措施。

## 5 结论

1) 在文献调研和典型事故分析的基础上,同时邀请不同岗位的安全专家学者,利用德尔菲法共提取了18个综合管廊火灾事故影响因素。

2) 利用DEMATEL建模得出地下综合管廊火灾事故各影响因素的属性,根据因素之间的因果关系筛选出了7个重要度较大的关键影响因素,其中信息不确定性、认知缺陷、安全文化薄弱、系统结构脆性、非功能性交互为原因因素,不合理控制、信息交互受阻为结果因素。利用ISM方法得出了8个节点度较大的事故影响因素,同时剖析了这8个因素在整个模型中的重要作用,安全风险管理中需对其进行重点监管。

3) 通过事故影响因素多级递阶结构模型分析,

将城市地下综合管廊火灾事故影响因素分为5个层级,进一步将各因素划分为近邻致因、过度致因和本质致因因素。

## References(参考文献):

- [1] TAN Zhongsheng(谭忠盛), CHEN Xueying(陈雪莹), WANG Xiuying(王秀英), et al. construction management model and key technologies for underground utility tunnels in urban areas [J]. *Tunnel Construction*(隧道建设), 2016, 36(10): 1177-1189.
- [2] BU Lingfang(卜令方), WANG Mingyuan(汪明元), JIN Zhongliang(金忠良), et al. State-of-the-arts and outlook of urban utility tunnel construction in China [J]. *China Water & Wastewater*(中国给水排水), 2016, 32(22): 57-62.
- [3] PU Guibing(蒲贵兵), LÜ Bo(吕波), JIN Junwei(靳俊伟), et al. Problems and suggestions for construction of urban municipal tunnel in Chongqing City [J]. *China Water & Wastewater*(中国给水排水), 2016, 32(4): 24-27.

- [4] XU Qi(徐奇), XU Yuanqing(续元庆), WANG Lijuan(王丽娟). Application analysis of the urban municipal tunnel [J]. *Petroleum Planning & Engineering*(石油规划设计), 2015, 26(2): 35 - 38.
- [5] SUN Yu(孙宇). Fire resisting construction and fire protection design for urban underground synthesis pipe gallery [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*(防灾减灾工程学报), 2012, 32(S1): 109 - 111.
- [6] WANG Hengdong(王恒栋). Several problems about urban underground utility tunnel during construction in China [J]. *Tunnel Construction*(隧道建设), 2017, 37(5): 523 - 528.
- [7] XIAO Guoqing(肖国清), WEN Limin(温丽敏), CHEN Baozhi(陈宝智). Review and perspective in the study of human behavior during evacuation from building fire [J]. *China Safety Science Journal*(中国安全科学学报), 2001, 11(3): 50 - 54.
- [8] ISHII H, KAWAMURA K, ONO T, et al. A fire detection system using optical fibers for utility tunnels [J]. *Fire Safety Journal*, 1997, 29(2): 87 - 98.
- [9] VAUQUELIN O, MÉGRETO. Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel [J]. *Fire Safety Journal*, 2002, 37(5): 525 - 533.
- [10] LIN Jun(林俊), HAN Xin(韩新), CONG Beihua(丛北华), et al. Study on fire characteristics of urban comprehensive pipe gallery based on CFD simulation analysis [J]. *Journal of Catastrophology*(灾害学), 2010, 25(S1): 374.
- [11] WANG Lidong(王立东), SUN Haitao(孙海涛), ZHOU Hong(周宏). A brief analysis of the fire-fighting design of the comprehensive pipe gallery in a cell [J]. *Water & Wastewater Engineering*(给水排水), 2015, 41(7): 66 - 68.
- [12] SUN Weijun(孙伟俊), WAN Jie(万杰). Discussion on fire monitoring and alarm technology for comprehensive pipeline [J]. *Fire Science and Technology*(消防科学与技术), 2017, 36(9): 1257 - 1259.
- [13] YANG Yongbin(杨永斌). Study on effect of fire source location on fire spread in cable cabin of urban underground utility tunnels [J]. *Journal of the Armed Police Academy*(武警学院学报), 2018, 34(2): 14 - 19.
- [14] HAO Guanyu(郝冠宇). Simulation study on the fire smoke in the cable compartment(综合管廊中电缆舱内火灾烟气模拟研究) [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [15] QIAN Xiling(钱喜玲). Research on fire simulation and countermeasures against fire protection for natural gas in underground utility tunnel(地下综合管廊天然气管道火灾模拟及消防对策研究) [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [16] LUO Zhouquan(罗周全), CHENG Pengyi(程鹏毅). Analysis on factors affecting accidents of man-machine system in underground metal mine based on DEMATEL - ISM [J]. *Journal of Safety Science & Technology*(中国安全生产科学技术), 2017, 13(12): 145 - 151.
- [17] YANG Shu(杨姝), LI Junlong(李俊龙). Comprehensive safety capability structure model of civil aviation pilots based on DEMATEL - ISM method [J]. *Safety & Environmental Engineering*(安全与环境工程), 2018, 25(4): 169 - 174.
- [18] CUI Wengang(崔文罡), FAN Houming(范厚明), YANG Yu(杨宇), et al. Risk analysis of the petroleum collection and distribution operation in the oil port based on the interpretative structure model [J]. *Journal of Safety & Environment*(安全与环境学报), 2017, 17(3): 813 - 819.
- [19] ZHONG Shiyong(钟诗颖), LI Shuqing(李树清), YAN Zhi(颜智), et al. Influencing factors analysis of dormitory fire accidents based on ISM [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*(工业安全与环保), 2012, 38(11): 7 - 9.
- [20] CHU Xuxin(初旭新), ZONG Gang(宗刚), PENG Zhaoxia(彭朝霞), et al. Analysis of the key influential factors on the road traffic safety based on the interpretive structural model [J]. *Journal of Safety and Environment*(安全与环境学报), 2017, 17(5): 1668 - 1672.
- [21] FU Gui(傅贵), WANG Xiangyao(王祥尧), JI Hongwen(吉洪文), et al. Analysis of contributing factors to safety culture based on structural equation model [J]. *China Safety Science Journal*(中国安全科学学报), 2011, 21(2): 9 - 15.
- [22] FONTELA E, GABUS A. *The DEMATEL Observer, DEMATEL 1976 Report* [R]. Geneva, Switzerland: Battelle Geneva Research Center, 1976.
- [23] HU Jiawei(胡嘉伟), PENG Wei(彭伟), XUE Weiyi(薛韦一). Research on causation of fire accident in highway tunnel based on ISM [J]. *Journal of Safety Science & Technology*(中国安全生产科学技术), 2014, 10(2): 57 - 62.
- [24] LEVESON N G. Applying systems thinking to analyze and learn from events [J]. *Safety Science*, 2011, 49

(1): 55–64.

- [25] WANG Song(汪送), WANG Ying(王瑛), DU Chun(杜纯), et al. Emergence and dynamic transmission of risk entropy in complex system [J]. *Safety & Environmental Engineering*(安全与环境工程), 2013, 20(2): 118–120.
- [26] DU Chun(杜纯), WANG Ying(王瑛), WANG Song(汪送), et al. Analysis of safety accident influence factors of complex system based on the integration of DEMATEL and ISM [J]. *Mathematics in Practice & Theory*(数学的实践与认识), 2012, 42(22): 143–150.

## Pursuit and determination of the influential factors of the urban underground integrated pipe gallery fire accidents based on the DEMATEL – ISM

WANG Wen-he<sup>1,2</sup>, ZHU Zheng-xiang<sup>1</sup>, MI Hong-fu<sup>1,2</sup>,  
WANG Jun-qin<sup>1</sup>, LIU Ya-ling<sup>1</sup>, JIANG Xin-sheng<sup>3</sup>

(1 College of Safety and Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China; 2 Chongqing Academy of Safety Science and Technology, Chongqing 401331, China; 3 Department of Petroleum, Army Logistics University of PLA, Chongqing 401311, China)

**Abstract:** The paper is aimed to set up a multilevel hierarchical structure model for the influential factors of the fire accidents in the comprehensive urban underground pipe gallery, so as to provide for the preliminary countermeasure of the decision-makers to deal with the accident prevention. For the said purpose, we have first of all traced and confirmed the influential factors that may account for such underground urban comprehensive pipe gallery fire accidents through literature review and sample-case examination based on the analysis of such factors as of man, machine, environment, management and information availability. And, secondly, we have also invited 5 experts to revise and rectify the index system of the fire accidents in the underground comprehensive pipe gallery via the Delphi method to extract the 18 influential factors. And, thirdly, we have found and worked out the key accident causative factors by decision making trial and assessment tests by dividing the hierarchical structure of the accident factors by interpreting the structure modeling method. And, finally, we have also established a multilevel hierarchical structure model of the influential factors of the fire accidents in the urban underground comprehensive pipe gallery. The results thus show

that the most important factors leading to such accidents lie in the weak security culture, the cognitive defects, the weak system structure, the non-functional interaction, the information inaccuracy, the information detained and irrational control. The less influential factors may lie in the inefficient fire-fighting equipment, the delayed accident warning, failure of the pipe monitoring equipment, and the mechanical equipment inefficiency. Thus, it is also necessary to take into account the important factors in the fire accident control and analysis of the comprehensive pipe gallery, whereas some less influential factors should neither be ignored of the system accidents, which can better be divided into 5 levels to deal with such urban underground pipe gallery fire accidents. Therefore, based on the above said model, it can be concluded that the fire accidents of the urban underground integrated pipe gallery are likely to be caused by the neighborhood abuse of fire, or improper use of fire for warm-making. Therefore, the effective way to avoid fire accidents is to control and contract the influential factors to the lowest levels.

**Key words:** safety engineering; integrated pipe gallery; fire accident; decision making trial and evaluation laboratory; interpretative structural modeling method; hierarchical structure mode

**CLC number:** X932      **Document code:** A

**Article ID:** 1009-6094(2020)03-0793-08