

李亚兰, 门玉明. 基于改进层次分析法的地下建筑火灾安全评价研究[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 43-47. [LI Yalan and MEN Yuming. Study on Fire Safety Assessment of Underground Building Based on Improved Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 43-47. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.008.]

# 基于改进层次分析法的地下建筑火灾安全评价研究\*

李亚兰, 门玉明

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 地下建筑由于其密闭性特点, 一旦发生火灾往往造成严重的损失。为了更客观地确定影响火灾因素的权重, 利用事故树的结构重要度对传统层次分析法进行改进。运用改进的层次分析法对地下建筑火灾的各种危险因素进行分析, 分析结果的准确性有所提高。将改进的层次分析法与模糊综合评价相结合应用于某地下建筑火灾危险性评价中, 结果表明, 改进的层次分析法可用于地下建筑火灾危险性评价中, 同时为地下建筑火灾的预防和日常管理提供了科学的依据。

**关键词:** 地下建筑; 改进层次分析法; 安全评价; 事故树

**中图分类号:** X928.7; X45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)03-0043-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.008

随着城市化进程的不断推进, 城市人口大幅度增长和城市用地规模的扩展, 造成了生态空间与生存空间在用地上的矛盾, 地面上已没有多少可以进行城市扩容的有效空间, 因此, 地下建筑空间的开发和利用日益受到重视, 成为城市发展的必然趋势。地下建筑空间的开发和利用, 不仅提高城市容量, 满足了人们的生活需求, 同时也在缓解城市交通、促进社会经济发展、改善城市环境等问题上发挥了重要作用。但是, 地下建筑与地上建筑相比具有密封性大、出入口少、通风和照明条件差等特点, 这使得地下建筑一旦发生火灾, 其危害性更大<sup>[1-3]</sup>。

层次分析法是火灾安全评价中一种常用的方法, 它通过分析复杂系统所包含的因素及相关关系, 将这些因素按支配关系划分成有序的层次结构, 建立准则指标体系, 然后通过两两比较, 确定每一层中各因素的相对重要性, 进而建立判断矩阵。然而在准则指标体系及判断矩阵的建立中往往受到人的主观因素的影响, 使计算结果产生较大的偏差。本文将事故树分析法和层次分析法相结合, 提高了地下建筑火灾风险分析的准确性和有效性。

## 1 基于事故树的层次分析法

### 1.1 地下建筑火灾风险因素分析

目前, 造成地下建筑火灾人员伤亡的主要因

素有以下几个方面: 电气设备、变配电设备、电线存在老化; 私拉乱拉电线; 超负荷用电; 违规用电; 消防设施不健全; 消防安全疏散不到位; 消防检查不及时; 消防安全教育不足等。另外, 地下建筑由于人员流动性大, 缺乏相应的应急救援预案和演练, 人员的安全方法意识不强, 致使地下建筑火灾发生后的人员伤亡严重。

### 1.2 构造事故树

本文以地下建筑火灾事故为顶上事件, 分析造成人员伤亡的各种原因。事故树分析如图1所示, 由顶上事件逐步展开分析, 可得到导致事故发生的27个基本事件(表1)。

### 1.3 构建层次分析模型

从地下建筑火灾事故树中可以看出, 影响地下建筑火灾的主要因素可分为4类(防火能力、灭火能力、安全疏散能力和安全管理能力), 以此构建层次分析模型见表2。

### 1.4 构造判断矩阵

#### (1) 确定判断因子

结构重要度是一个能反映基本事件对顶上事件的影响程度的指标, 将各基本事件结构重要度作为二级指标的判断因子, 结果见表3, 根据层次分析结构模型, 可知目标层、准则层、各指标层之间的相互关系, 上层因素判断因子为其下层因素判断因子之和。

\* 收稿日期: 2017-12-08 修回日期: 2018-02-05

基金项目: 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(310826161006)

第一作者简介: 李亚兰(1976-), 女, 甘肃宕昌人, 讲师, 博士研究生, 主要从事建筑安全工程研究。

E-mail: dcdgx27@chd.edu.cn

表 1 地下建筑火灾事故树的符号及含义

符号	含义	符号	含义	符号	含义
T	地下建筑火灾事故	D3	火灾荷载	X10	火灾荷载布局不合理
A1	火灾扩大	D4	防排烟系统缺陷	X11	防排烟系统设计不合理
A2	人员疏散失败	D5	建筑自身灭火能力不足	X12	防排烟系统故障
B1	发生火灾	D6	人员灭火不及时	X13	火灾自动报警系统故障
B2	火灾得不到有效控制	D7	自救行为慌乱	X14	无消防水源
B3	自救与救援失败	E1	喷水系统故障	X15	自动喷淋系统故障
B4	无法逃生	E2	消防队灭火不及时	X16	灭火器、消防栓系统故障
C1	存在危险源	F1	喷淋装置故障	X17	消防队灭火能力不足
C2	管理缺陷	X1	电气设备、变配电设备、 电线等防火状况不佳	X18	距离最近消防队路程较远
C3	建筑防火能力不足	X2	日常消防安全检查不到位	X19	无消防车道
C4	建筑灭火能力不足	X3	人员消防安全素质较低	X20	应急预案演习不到位
C5	消防队救援失败	X4	管理者工作能力有限	X21	人流密度过大
C6	人员自救失败	X5	动火培训、消防安全知识宣传不到位	X22	人群特征复杂
C7	群集特性较差	X6	建筑结构和装修材料的耐火等级不够	X23	安全出口设置过少
C8	疏散通道不畅	X7	防火、防烟分区划分不合理	X24	安全疏散距离过长
C9	疏散设施故障	X8	布局过于复杂	X25	安全疏散通道不通畅(或过窄)
D1	明火使用不当	X9	火灾荷载密度过大	X26	无疏散标志或应急照明设施
D2	建筑设计缺陷			X27	应急广播系统故障

表 2 层次分析模型表

目标层	准则层	一级指标	二级指标
地下建筑 火灾安全	防火能力 U1	火灾荷载 U11	电器设备防火状况(X1)
			火灾荷载布局(X10)
		火灾荷载密度(X9)	
	建筑设计 U12	建筑材料耐火性(X6)	
		防火防烟分区(X7)	
	布局的复杂性(X8)		
	防排烟能力 U13	防排烟设计合理性(X11)	
		防排烟系统有效性(X12)	
		自身灭火能力 U21	
	灭火能力 U2	火灾自动报警系统(X13)	
		自动喷淋系统(X15)	
		消防水源(X14)	
灭火器、消防栓系统(X16)			
消防灭火能力 U22	消防灭火能力(X17)		
	距离最近消防队路程(X18)		
	无消防车道(X19)		
群集特性 U31	人流密度过大(X21)		
	人群特征复杂(X22)		
	安全疏散能力 U3	安全出口设置过少(X23)	
安全疏散通道不通畅(X25)			
疏散通道 U32			
安全疏散距离过长(X24)			
疏散设施 U33			
无疏散标志(X26)			
应急广播系统故障(X27)			
安全管理水平 U4	规章制度落实 U41	日常消防安全检查不到位(X2)	
		应急预案演习不到位(X20)	
	消防安全知识宣传不到位(X5)		
人员能力 U42	人员消防安全素质较低(X3)		
	管理者工作能力有限(X4)		

表 3 二级指标判断因子

二级指标	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
判断因子	35/216	1/18	1/6	1/27	13/270	1/72	1/72	1/72	1/72
二级指标	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18
判断因子	1/72	1/72	1/72	11/90	1/27	1/27	1/27	1/90	1/90
二级指标	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27
判断因子	1/90	1/90	1/45	1/45	1/45	1/45	1/45	1/45	1/45

(2) 构造判断矩阵

每个准则层因素下都含有一定数量的指标层因素，一级指标层下又含有二级指标层，通过各级指标层判断因子之间的两两比较得到判断矩阵，

表 4 为准则层判断矩阵。同理可得出准则层下各一级指标层的权重大小以及 CI 值，结合准则层的权重以及一级指标因素的权重，可以得到各个因素的权重(表 5)。

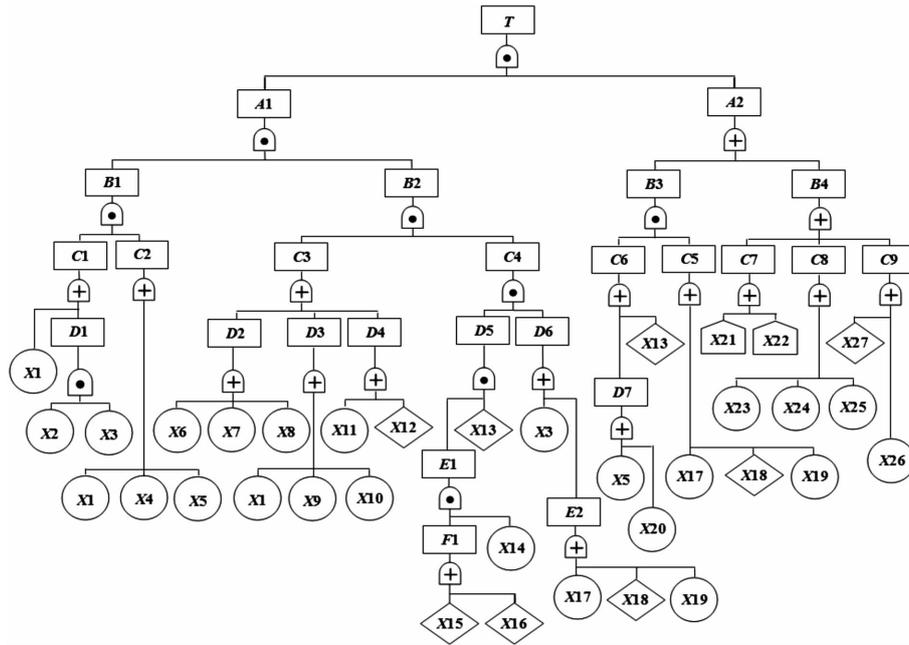


图 1 地下建筑火灾事故树分析图

表 4 利用事故树构造的准则层判断矩阵

$U - U_i$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$W$
防火能力 $U_1$	1	1	2	1	0.259
灭火能力 $U_2$	1	1	2	1	0.267
安全疏散能力 $U_3$	1/2	1/2	1	1/2	0.153
安全管理能力 $U_4$	1	1	2	1	0.316

由于地下建筑空间相对封闭, 一旦发生火灾, 就会造成严重的缺氧, 而且地下建筑火灾发生时人员逃生方向与烟气扩散方向相同, 这就使得地下建筑火灾具有疏散困难的特点; 同时由于地下建筑与地面联系少, 消防人员灭火进攻路线较少, 而且消防人员逆向顶烟从地面进入地下建筑, 这使得地下建筑火灾的扑救难度大大提高。因此, 防止火灾发生或扩散是控制地下建筑火灾的有效措施。火灾自动报警系统、自动喷淋系统、灭火器系统及人员消防安全素质这些因素在防止火灾扩散方面具有重要的作用, 由表 5 的比较可以看出, 火灾自动报警系统、自动喷淋系统、灭火器系统及人员消防安全素质等因素在改进的层次分析法中的排序有较大幅度的提高, 这与实际情况相符。这些因素的排名提升也说明改进的层次分析法有利于客观地对各个因素进行评价。

## 2 改进层次分析法在地下建筑火灾评价中的应用

本文以西安市某地下商场为实例, 采用改进层次分析法和模糊综合评价模型相结合的方法对该地下商场安全现状进行综合评价。

表 5 传统层次分析法与改进层次分析法权重比较表

指标层	名称	传统	排序	改进	排序
X1	电器设备防火状况	0.0758	3	0.1619	2
X9	火灾荷载密度	0.1328	2	0.0138	22
X10	火灾荷载布局	0.0290	12	0.0138	22
X6	建筑材料耐火性	0.0117	18	0.0139	17
X7	防火防烟分区	0.0387	10	0.0139	17
X8	布局的复杂性	0.0213	15	0.0139	17
X11	防排烟设计合理性	0.0653	5	0.0139	17
X12	防排烟系统有效性	0.0653	5	0.0139	17
X13	火灾自动报警系统	0.0081	22	0.1224	3
X14	消防水源	0.0062	25	0.0371	6
X15	自动喷淋系统	0.0052	26	0.0371	6
X16	灭火器系统	0.0028	27	0.0371	6
X17	消防灭火能力	0.0268	14	0.0111	24
X18	距离最近消防队路程	0.0089	20	0.0111	24
X19	消防车道	0.0089	20	0.0111	24
X21	人流密度过大	0.0406	9	0.0223	10
X22	人群特征复杂	0.0101	19	0.0223	10
X23	安全出口设置过少	0.0160	17	0.0223	10
X24	安全疏散距离过长	0.0080	23	0.0223	10
X25	安全疏散通道不通畅	0.0080	23	0.0223	10
X26	无疏散标志	0.0603	7	0.0223	10
X27	应急广播系统故障	0.0201	16	0.0223	10
X2	日常消防安全检查不到位	0.1431	1	0.0551	4
X5	消防安全知识宣传不到位	0.0715	4	0.0447	5
X20	应急预案演习不到位	0.0312	11	0.0110	27
X3	人员消防安全素质较低	0.0280	13	0.1654	1
X4	管理者工作能力有限	0.0561	8	0.0368	9

## 2.1 确定评价集

各评价因子安全等级评价集为  $V = \{\text{安全, 比较安全, 一般安全, 比较危险, 危险}\}$ , 评价分为5个等级, 各等级得分区间为:  $I_{a,b} = \{[100, 90), [90, 80), [80, 70), [70, 60), [60, 0]\}$ , 各等级评价分数的标准值为 95, 85, 75, 65, 55。

## 2.2 确定各级评价指标权重集

通过上节改进层次分析法得到各基本事件的权重, 进而确定准则层各因素的权重为:

$$W = [0.259 \quad 0.267 \quad 0.156 \quad 0.316]。 \quad (1)$$

一级指标层各因素的权重分别为:

$$W_{U1} = [0.732 \quad 0.161 \quad 0.107]; \quad (2)$$

$$W_{U2} = [0.875 \quad 0.125]; \quad (3)$$

$$W_{U3} = [0.286 \quad 0.428 \quad 0.286]; \quad (4)$$

$$W_{U4} = [0.36 \quad 0.64]。 \quad (5)$$

## 2.3 建立评价矩阵

根据评价地下商场的情况及相关资料, 结合专家意见对二级指标进行打分, 得到评价矩阵:

$$R_{11} = \begin{bmatrix} 0.32 & 0.66 & 0.02 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0.51 & 0.48 & 0 \\ 0.24 & 0.62 & 0.14 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$R_{12} = \begin{bmatrix} 0.52 & 0.48 & 0 & 0 & 0 \\ 0.68 & 0.32 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.19 & 0.65 & 0.16 & 0 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$R_{13} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.06 & 0.53 & 0.41 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$R_{21} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.55 & 0.35 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.55 & 0.35 & 0 & 0 \\ 0 & 0.42 & 0.54 & 0.04 & 0 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$R_{22} = \begin{bmatrix} 0.75 & 0.25 & 0 & 0 & 0 \\ 0.62 & 0.38 & 0 & 0 & 0 \\ 0.52 & 0.48 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$R_{31} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.37 & 0.54 & 0.09 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$R_{32} = \begin{bmatrix} 0.17 & 0.59 & 0.24 & 0 & 0 \\ 0 & 0.26 & 0.62 & 0.12 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.62 & 0.13 & 0 \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$R_{33} = \begin{bmatrix} 0.11 & 0.56 & 0.33 & 0 & 0 \\ 0.87 & 0.13 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$R_{41} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.26 & 0.63 & 0.11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.04 & 0.65 & 0.31 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$R_{42} = \begin{bmatrix} 0 & 0.16 & 0.75 & 0.09 & 0 \\ 0.65 & 0.35 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。 \quad (15)$$

## 2.4 评价结果

根据最大隶属度原则, 对该地下商场火灾风险的各影响因子进行安全性等级模糊综合评价。

### 2.4.1 三级评判

三级评判公式为:

$$U_{11} = W_{11} \cdot R_{11} = [0.854 \quad 0.073 \quad 0.073] \cdot \begin{bmatrix} 0.32 & 0.66 & 0.02 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0.51 & 0.48 & 0 \\ 0.24 & 0.62 & 0.14 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.290 \quad 0.610 \quad 0.065 \quad 0.035 \quad 0]。 \quad (16)$$

同理可得出其他评价因子的矩阵向量如下。

建筑设计:

$$U_{12} = [0.399 \quad 0.329 \quad 0.217 \quad 0.055 \quad 0]。 \quad (17)$$

防排烟系统:

$$U_{13} = [0.130 \quad 0.565 \quad 0.305 \quad 0 \quad 0]。 \quad (18)$$

商场自身灭火能力:

$$U_{21} = [0.068 \quad 0.521 \quad 0.405 \quad 0.007 \quad 0]。 \quad (19)$$

消防队灭火能力:

$$U_{22} = [0.629 \quad 0.371 \quad 0 \quad 0 \quad 0]。 \quad (20)$$

群集特征:

$$U_{31} = [0.100 \quad 0.300 \quad 0.285 \quad 0.270 \quad 0.045]。 \quad (21)$$

疏散通道:

$$U_{32} = [0.056 \quad 0.366 \quad 0.493 \quad 0.085 \quad 0]。 \quad (22)$$

疏散设施:

$$U_{33} = [0.490 \quad 0.345 \quad 0.165 \quad 0 \quad 0]。 \quad (23)$$

规章制度的制定及落实:

$$U_{41} = [0.496 \quad 0.360 \quad 0.050 \quad 0.064 \quad 0.030]。 \quad (24)$$

人员能力:

$$U_{42} = [0.118 \quad 0.194 \quad 0.613 \quad 0.075 \quad 0]。 \quad (25)$$

### 2.4.2 二级评判

根据  $U_i = W_i \cdot U_{ij} = W_i \cdot [U_{i1} \quad U_{i2} \quad \dots \quad U_{im}]^T$ ,

$$(26)$$

得:  $U_1 = W_1 R_{1j} = [0.732 \quad 0.161 \quad 0.107] \cdot$

$$\begin{bmatrix} 0.290 & 0.610 & 0.065 & 0.035 & 0 \\ 0.399 & 0.329 & 0.217 & 0.055 & 0 \\ 0.130 & 0.565 & 0.305 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.291 \quad 0.559 \quad 0.115 \quad 0.035 \quad 0]。 \quad (27)$$

同理可得出其他评价因子的矩阵向量如下。

灭火能力:

$$U_2 = [0.138 \quad 0.502 \quad 0.354 \quad 0.006 \quad 0]。 \quad (28)$$

安全疏散能力:

$$U_3 = [0.205 \quad 0.239 \quad 0.306 \quad 0.205 \quad 0.045]。 \quad (29)$$

安全管理水平:

$$U_4 = [0.221 \quad 0.221 \quad 0.444 \quad 0.059 \quad 0.055]。 \quad (30)$$

### 2.4.3 一级评判

根据  $U = W \cdot U_i = W \cdot [U_1 \quad U_2 \quad U_3 \quad U_4]^T$ ,

得:

$$U = [0.286 \quad 0.286 \quad 0.143 \quad 0.286] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 0.242 & 0.498 & 0.142 & 0.118 & 0 \\ 0.122 & 0.493 & 0.346 & 0.039 & 0 \\ 0.205 & 0.239 & 0.306 & 0.205 & 0.045 \\ 0.221 & 0.221 & 0.444 & 0.059 & 0.055 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.239 & 0.283 & 0.283 & 0.141 & 0.054 \end{bmatrix}。 \quad (32)$$

$$V = 95 \times 0.239 + 85 \times 0.283 + 75 \times 0.283 + 65 \times 0.141 + 55 \times 0.054 = 80.12。 \quad (33)$$

用级别特征值来判断评价结果的优劣, 安全等级为 2 级(比较安全), 符合实际情况。不存在大的火灾风险, 但仍有很多方面需要改进, 比如定期进行应急预案的演练、重新调整商铺的数量和布局等以减少火灾荷载密度和事故发生的可能性。

### 3 结论

本文利用事故树分析法中的基本事件建立层次分析模型, 以基本事件的结构重要度系数作为层次分析法两两比较的依据, 将这两者结合能提高层次分析法中各级指标权重的准确性, 使分析结果更为可靠。火灾自动报警系统、自动喷淋系统、灭火器系统及人员消防安全素质等因素在改进的层次分析法中的排序较传统层次分析法有大幅度的提高, 这与实际情况相符, 说明改进的层次分析法对地下建筑火灾安全评价及预防措施的制定有一定的实际指导意义。

### 参考文献:

[1] 娄树立, 刘华伟. 地下商业建筑火灾的特点及预防措施[J].

重庆科技学院学报(自然科学版), 2008, 10(6): 146-149.

- [2] 安永林, 彭立敏. 地铁火灾风险性的多级可拓综合评估[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(5): 566-571.
- [3] 唐勇, 季蓉蓉. 地下建筑消防安全问题及对策研究[J]. 武警学院学报, 2011, 27(12): 51-53.
- [4] 刘铁民, 张兴凯, 刘功智. 安全评价方法应用指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] 石龙, 张瑞芳, 谢启源, 等. 改进层次分析法在公共建筑火灾风险分析中的应用[J]. 中国科学(科学通报专题), 2009, 54(3): 329-336.
- [6] 张村峰, 卞奇侃, 蒋军成. 基于“事故树-层次分析法”的高校学生宿舍火灾风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(10): 100-105.
- [7] 田玉敏, 蔡晶菁. 层次分析法在商场火灾风险评价中的应用研究[J]. 灾害学, 2009, 24(2): 91-94.
- [8] Dong Y C, Xu Y F, Li H Y, et al. A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP[J]. Eurjoper Res, 2008, 186(1): 229-242.
- [9] 赵长勇. 改进层次分析法在油库全评价中的运用[J]. 石油化工安全环保技术, 2010, 26(1): 14-18.
- [10] 宋飞, 赵法锁. 地下工程风险分析的层次分析法及 MATLAB 应用[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(3): 292-296.
- [11] 王慧飞. 影剧院火灾风险评估体系的构建与分析[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 12-15.
- [12] 张天军, 苏琳, 乔宝明, 等. 改进层次分析法在煤与瓦斯突出危险等级预测中的应用[J]. 西安科技学学报, 2010, 30(5): 536-542.
- [13] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [14] 伍爱友, 肖国清. 基于模糊重心的建筑物火灾危险性评价[J]. 工业安全与环保, 2004, 1(10): 157-159.
- [15] 应国柱, 汪鹏程, 朱大勇, 等. 模糊层次分析法的改进及其在地铁施工风险评估中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(10): 1244-1248.

## Study on Fire Safety Assessment of Underground Building Based on Improved Analytic Hierarchy Process

LI Yalan and MEN Yuming

(School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Because of the tightness of the underground building, serious losses is caused once the fire happen. In order to determine the weight of the fire factors more objectively, the structure importance of fault tree is used in analytic hierarchy process. The accuracy of the analysis result is improved by using improve analytic hierarchy process at the risk factors of underground building. The result of assessment is consistent with the fault when improve analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation are used together. The results show that improved analytic hierarchy process can be used in the fire hazard assessment of underground buildings, and provides a scientific basis for the prevention and management of underground fire.

**Key words:** underground building; improved analytic hierarchy process; safety assessment; fault tree