

改进层次分析法在公共建筑火灾风险分析中的应用

石龙, 张瑞芳, 谢启源, 付丽华

中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027

E-mail: shilong@mail.ustc.edu.cn

2008-04-10 收稿, 2008-12-11 接受

国家自然科学基金重点项目(批准号: 50536030)、国家科技支撑计划(编号: 2006BAK06B02)和教育部博士后科学基金(编号: 20070410220)资助

摘要 事故树中的结构重要度反映了基本事件对顶上事件的影响程度, 而层次分析法中指标层各因素的权重同样也反映了其对目标层的重要程度. 基于结构重要度和权重的一致性, 结合两种评价法的优点提出了一种改进的层次分析法. 利用改进的层次分析法对影响公共建筑火灾风险的各种因素进行分析, 可在一定程度上减少人主观因素的影响, 提高分析结果的准确性. 奥运场馆是一种非常重要的公共建筑, 其火灾安全评估是一个重要的课题. 改进的层次分析法可以应用到奥运场馆的风险评价, 同样可以推广到其他方面, 具有广泛的应用价值.

关键词
公共建筑
火灾风险分析
层次分析法
事故树分析法
奥运场馆

随着我国经济的发展, 不同规模的商用办公楼逐渐增多, 这就为此类公共建筑内人员的火灾安全提出了更高的要求, 如何更好地对公共建筑进行风险分析就显得尤为重要. 目前应用于建筑火灾风险分析的方法主要有古斯塔夫火灾危险度法^[1]、模糊综合评价法^[2]、事件树^[3,4]、事故树^[5,6]、层析分析法^[7,8]等, 其中事故树分析法由于基本事件概率获取的限制, 其定性分析应用较多, 定量的分析应用不是很广泛. 在层析分析法中判断矩阵的建立是分析结果正确与否的关键, 而构造判断矩阵往往会受到人的主观因素影响. 本文尝试将事故树的定性分析与层次分析法的定量分析结合起来, 克服两种分析方法的不足, 这对公共建筑火灾风险分析以及其他领域的风险评价都有着很重要的意义.

奥运场馆是一种重要的公共场所, 每四年举办一次的奥运会引起了公众高度的重视. 但是, 许多火灾案例的发生对奥运场馆的安全工作敲响了警钟^[9,10]. 1985年5月11日, 英国布拉德福市足球场起火, 造成56人死亡, 250多人受伤. 国家体育场、国家游泳中心、北京大学体育馆等重要场馆的火灾安全引起了消防工程师的高度重视. 这些场馆的特点可以总结为三点: 高密度人群、高大空间以及复杂结构, 这些

特点显示了这些场馆的火灾风险评价的重要性.

1 基本原理

1.1 事故树分析法

所谓事故树, 就是从结果到原因描绘事故发生的有向逻辑树. 事故树遵循逻辑分析原则(即从结果分析原因的原则), 相关事件(节点)之间用逻辑门连接. 利用事故树对事故进行预测的方法称为事故树分析法^[11~14].

在事故树中, 如果所有的基本事件都发生则顶上事件必然发生. 但是在很多情况下并非如此, 而是只要某些基本事件组合在一起就可以导致顶上事件发生. 能够导致顶上事件发生的基本事件集合叫做割集. 在一个事故树中, 割集的数目可能有很多, 而导致顶上事件发生的最低限度的基本事件集合称为最小割集. 在事故树中, 最小割集表明哪些基本事件组合在一起可以使顶上事件发生, 为人们指明事故发生模式. 相反地, 有一组基本事件不发生, 顶上事件就不会发生, 这一组基本事件集合叫做径集. 径集表示系统不发生故障而正常运行的模式, 凡是不能导致顶上事件发生的最低限度的基本事件的集合叫做最小径集. 在事故树中, 一个最小径集表示顶上事件

不发生的可能性就有一种。最小径集越多, 顶上事件不发生的途径就越多, 系统也就越安全。

最小割集和最小径集的求法有许多种, 常用的为布尔代数化简法和行列法^[15], 其中最小径集的求法是利用最小径集与最小割集的对偶性, 首先画事故树的对偶树, 即成功树。求成功树的最小割集, 就是原事故树的最小径集。成功树的画法是: 将事故树的“与门”与“或门”相互转换, 并把全部事件的发生变成不发生, 就是在所有事件上都加“'”, 使之变成原事件补的形式。经过这样变换后得到的树形就是原事故树的成功树。

事故树是由众多基本事件构成的, 这些基本事件对顶上事件均产生影响, 但影响程度是不同的。在假设各基本事件的发生概率相等的情况下, 可分析这些基本事件对顶上事件发生所产生的影响程度, 即基本事件结构重要度。基本事件结构重要度^[14]的求法如下式:

$$I_{\phi}(i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^m \frac{1}{R_j}, \quad (1)$$

式中 k 为事故树包含的最小割(径)集数目; m 为包含第 i 个基本事件的最小割(径)集数目; R_j 为包含第 i 个基本事件的第 j 个最小割(径)集中基本事件的数目。

1.2 层次分析法

层次分析法是美国运筹学家 Saaty 等人^[16,17]于 20 世纪 70 年代中期提出的一种系统分析方法, 其基本原理是把复杂系统分解成目标、准则、方案等层次, 在此基础上进行定性和定量分析的决策。它把人的决策思维过程层次化、数量化、模型化, 并用数学手段为分析、决策提供定量的依据, 是一种对非定量事件进行定量分析的有效方法。

层次分析的模型一般由最高层(目标层)、若干中间层(准则层)、最底层(指标层)组成。在层次模型中, 分析问题所包含的因素及其相互关系, 将有关的各个因素按照不同的属性自上而下地分解成若干层次。同一层次的各个因素从属于上一层的因素或受下一层因素的作用。

在层次结构中, 对从属于上一层的某个因素的同层各个因素进行两两比较, 比较其相对于上层某因素的重要程度, 并按事前规定的标度量化, 构成矩阵形式, 即判断矩阵。判断矩阵中各元素的数值有多种标度方法^[18], 一般采用 1~9 标度法确定, 判断矩

阵标度及其含义见表 1。

表 1 判断矩阵标度及其含义^[19]

标度	含义
1	表示两个因素相比, 具有同等重要性
3	表示两个因素相比, 一个比另一个因素稍重要
5	表示两个因素相比, 一个比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比, 一个比另一个因素强烈重要
9	表示两个因素相比, 一个比另一个因素极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中值

构造出上述的比较判断矩阵后, 即可计算出判断矩阵的最大特征根及其相对应的特征向量和各个因素的相对权重, 具体的步骤详见文献^[19, 20]。

2 利用事故树建立层次分析模型

2.1 构造事故树

公共建筑火灾对人员造成伤亡主要是由于火灾控制失败以及人员疏散逃生失败这两面的原因。本文以公共建筑火灾造成人员伤亡为顶上事件构造事故树, 分析造成火灾及人员伤亡的各种基本事件, 事故树见图 1。

公共建筑火灾造成人员伤亡的事故树从火灾扩大和人员疏散失败两个中间事件逐步展开, 一共可以归结于 20 个基本事件。事故树中各个符号所代表的含义如表 2 所示。

2.2 构造层析分析模型

为了使事故树中各基本事件能与层次分析模型很好地结合起来, 首先将事故树中各基本事件的描述中性化后转为层次分析的指标层因素, 然后归纳分类, 确定为准则层各因素(如安全管理、消防设施、建筑结构和消防因素)。目标层即为公共建筑的火灾安全, 以此构造的层次分析模型见表 3。

2.3 构造判断矩阵

通过对同一层次各因素之间进行重要度的两两比较, 可以构造层次分析的判断矩阵, 其表示符号为 $A=(a_{ij})$ 。判断矩阵是层次分析的基础, 由此可以得出各个因素相对于目标层的权重。

利用(1)式对事故树中各个基本事件的结构重要度进行计算。对各个结构重要度分母计算其最小公倍数 LCM。各个基本事件的判断因子(χ)计算为

$$\chi(i) = I_{\phi}(i) \cdot \text{LCM}. \quad (2)$$

各个因素的判断因子反映了基本事件对顶上事

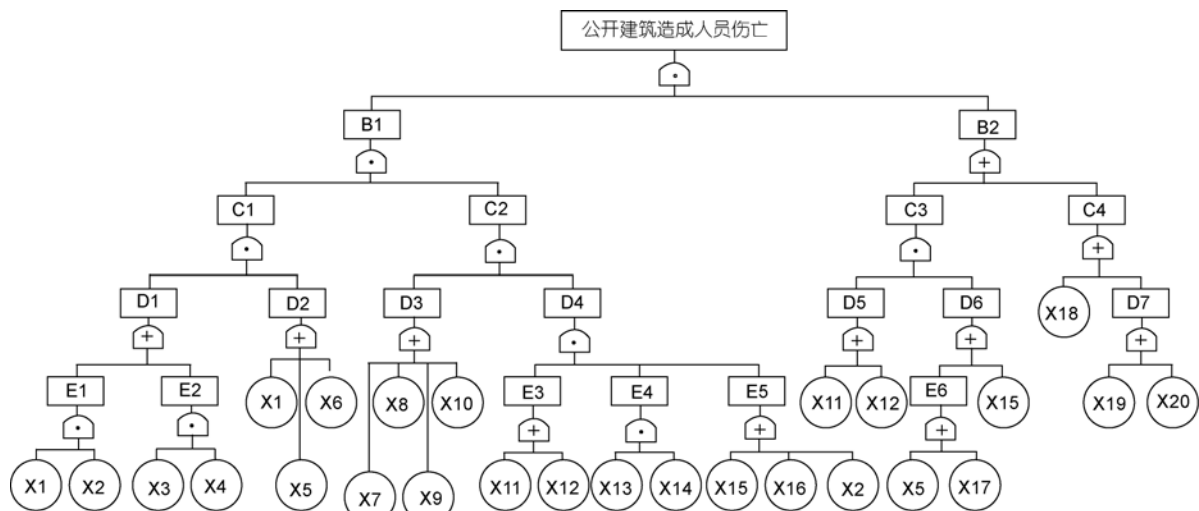


图 1 公共建筑火灾造成人员伤亡事故树

表 2 公共建筑火灾造成人员伤亡事故树的符号及含义

符号	含义	符号	含义	符号	含义
B1	火灾扩大	E2	消防队灭火不力	X8	建筑的耐火等级不够
B2	人员疏散失败	E3	建筑自身灭火能力不够	X9	防排烟系统失效
C1	发生火灾	E4	人员灭火不及时	X10	防火分区划分不合理
C2	火灾得不到有效控制	E5	人员自救能力不够	X11	消防队灭火能力不足
C3	自救与救援失败	F1	明火使用不慎	X12	消防站点距离太远
C4	无法逃生	F2	电气故障火灾	X13	消防栓系统失效
D1	存在危险源	X1	日常消防安全检查不到位	X14	自动喷淋系统失效
D2	管理不到位	X2	人员的消防素质不足	X15	火灾报警系统失效
D3	建筑防火能力不够	X3	配电设备安全设施不足	X16	消防灭火器材不到位
D4	建筑的灭火能力不够	X4	电气设备防火达不到要求	X17	应急预案与演习不到位
D5	消防队救援失败	X5	安全知识宣传不到位	X18	人员荷载过大
D6	人员自救失败	X6	管理人员业务水平不够	X19	疏散通道狭窄
D7	安全疏散能力不够	X7	建筑内的可燃物	X20	无疏散指示或不清楚
E1	火源				

表 3 层次分析模型表

目标层	准则层	指标层
公共建筑的火灾安全	安全管理(B1)	日常消防安全检查 (X1)
		配电设备的安全设施 (X3)
		电气设备防火状况 (X4)
	消防设施(B2)	防排烟系统 (X9)
		消防栓系统 (X13)
		自动喷淋系统 (X14)
	建筑结构(B3)	建筑的火灾荷载 (X7)
		建筑的耐火等级 (X8)
		防火分区的划分 (X10)
	消防因素(B4)	人员的消防素质 (X2)
		消防队灭火能力 (X11)
		消防站点距离 (X12)

件的影响程度,可以利用基本事件判断因子两两比较来构造判断矩阵.每个准则层因素都含有一定数量的指标层因素,故其判断因子可以用指标层各个因素判断因子的和来表示,即 $\sum_{i=1}^m \chi(i)$.由于在判断矩阵中 a_{ij} 为整数,因而判断因子之间的两两比较可以采用四舍五入近似到整数的方法来近似.准则层的判断矩阵为

$$\begin{cases} a_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^m \chi(i)}{\sum_{j=1}^n \chi(j)}, & \text{当 } \sum_{i=1}^m \chi(i) \geq \sum_{j=1}^n \chi(j), \\ a_{ji} = \frac{\sum_{j=1}^n \chi(j)}{\sum_{i=1}^m \chi(i)}, & \text{当 } \sum_{i=1}^m \chi(i) < \sum_{j=1}^n \chi(j), \end{cases} \quad (3)$$

其中 m, n 为准则层下指标层因素的数目; i, j 为判断矩阵 a_{ij} 的下标,分别表示第 i 行和第 j 列.

每个准则层因素下都含有一定数量的指标层因素,其两两之间比较的判断矩阵为

$$\begin{cases} a_{ij} = \frac{\chi(i)}{\chi(j)}, & \text{当 } \chi(i) \geq \chi(j), \\ a_{ji} = \frac{\chi(j)}{\chi(i)}, & \text{当 } \chi(i) < \chi(j), \end{cases} \quad (4)$$

其中 i, j 为判断矩阵 a_{ij} 的下标,分别表示第 i 行和第 j 列.

3 改进层次分析法

3.1 权重的结合

通过结构重要度的判断矩阵可以得到各个基本因素的权重 W' .根据传统的层次分析法,即依靠专家的判断也能得到各个基本因素的权重 W'' .事故树中的结构重要度反映了基本事件对顶上事件的影响程度,而层次分析法中指标层因素的权重同样也反映了基本因素对目标层影响程度,故两者可以结合

起来:

$$W = \frac{\alpha W' + \beta W''}{\alpha + \beta}, \quad (5)$$

其中 α, β 为权重系数,为标度因子(ϕ)与CR因子(ε)之和.

标度因子反映了选用不同标度时的误差,而CR因子同样反映了进行判断矩阵的计算中的误差,结合两者的大小可以确定权重结合时的权重系数,具体的计算方法参见下面部分的内容.

3.2 权重系数的确定

() 判断矩阵标度. Saaty将1~9标度同其他26种标度方法^[20]进行了比较.将四把完全一样的椅子放在一条直线上,分别距光源8.230, 13.716, 19.202和25.603 m.假定人站在光源旁边,观察这些椅子的亮度,并成对比较它们的相对亮度,构造视觉判断矩阵,利用求解矩阵最大特征根及其特征向量方法计算出四把椅子的相对亮度 a_i .将按不同标度计算出来的数值,同根据光强反平方定律计算出来的实际相对亮度数值 b_i 进行比较,计算方法详见文献^[20].比较采用了平方差均值平方根(RMS),两组数 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 和 $b_1, b_2, \dots, b_n$ 的平方差均值平方根^[20]由下式计算:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}. \quad (6)$$

不同的平方差均值平方根反映了判断矩阵的可信度,可以用来决定权重系数.标度因子(ϕ)的计算方法如下式所示:

$$\phi = 1 - \frac{\text{RMS} - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}, \quad (7)$$

其中 $R_{\max}$ 为标度对应的最大RMS值,为1~90标度所对应的值; $R_{\min}$ 为标度对应的最小RMS值,为1~9标度所对应的值.

计算不同标度下的RMS值,根据(7)式从而可以得出不同标度下的标度因子.不同标度下标度因子如下表4所示.

表4 不同标度下标度因子^{a)}

标度	3	5	7	9	11	13	15	17	18	26
ϕ	0.4610	0.7597	0.9286	1.000	0.8506	0.7468	0.6948	0.6234	0.5844	0.4091
标度	30	34	36	44	52	60	68	75	85	90
ϕ	0.3831	0.3182	0.2922	0.2078	0.1688	0.1429	0.0909	0.0779	0.0325	0

a) 中间标度的标度因子可采用插值法求得

() 判断矩阵的一致性检验。在专家进行两两比较判断过程中,当判断矩阵的阶数 $n > 2$ 时,可能出现不一致的情况。这时判断信息可靠度降低,以此为依据进一步计算可能导致错误的决策结果。因此,必须对判断矩阵的一致性程度加以校验。层次分析法中引入判断矩阵最大特征根以外的其余特征根的负平均值,来度量判断矩阵的一致性,即下面的公式[19]。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

判断矩阵的CR值同样也反映了判断矩阵的可信度,CR因子(ε)的计算公式为

$$\varepsilon = 1 - \frac{CR - CR_{\min}}{CR_{\max} - CR_{\min}} = 1 - 10CR, \quad (9)$$

其中 $CR_{\max}$ 为总排序随机一致性比率的最大值,值为0.1; $CR_{\min}$ 为总排序随机一致性比率的最小值,值为0。

CR为层次分析模型总排序随机一致性比率,计算公式[19]为

$$CR = \frac{\sum_{j=1}^m a_j CI_j}{\sum_{j=1}^m a_j RI_j}, \quad (10)$$

其中 a_j 为准则层不同因素的权重; CI_j 为准则层不同因素下指标层判断矩阵的CI值。 RI_j 为随机一致性检验指标,如表5所示。

表5 RI值[21]

矩阵大小	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI 值	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

4 应用实例

4.1 构造判断矩阵

() 利用事故树。由于本文中涉及的事故树割

集数量较多,利用割集来计算各个基本事件的结构重要度比较复杂,所以本文中的结构重要度是通过将事故树转变为成功树求其最小径集的方法来计算,求出的12个最小径集分别为

$$\begin{aligned} P_1 &= \{X'_1, X'_3\}, & P_2 &= \{X'_1, X'_4\}, \\ P_3 &= \{X'_2, X'_3\}, & P_4 &= \{X'_2, X'_4\}, \\ P_5 &= \{X'_7\}, & P_6 &= \{X'_1, X'_5, X'_6\}, \\ P_7 &= \{X'_8, X'_9, X'_{10}\}, & P_8 &= \{X'_{11}, X'_{12}\}, \\ P_9 &= \{X'_{13}\}, & P_{10} &= \{X'_{14}\}, \\ P_{11} &= \{X'_2, X'_5, X'_{16}\}, \\ P_{12} &= \{X'_5, X'_{15}, X'_{17}, X'_{18}, X'_{19}, X'_{20}\}. \end{aligned}$$

利用(1)式的计算公式,可得出各个因素的结构重要度见表6。

根据各个基本事件的结构重要度,可以得出分母的最小公倍数LCM为72,然后根据(2)式可得到判断因子 $\chi(i)$,详细数值见表6。由表3可知准则层因素安全管理包含的指标层因素为 $X'_1, X'_3, X'_4, X'_5,$

X'_6, X'_{17} ,故其判断因子 $\sum_{i=1}^m \chi(i)$ 为该指标层因素判断因子之和,即26。消防设施、建筑结构和消防因素准则层因素的判断因子依次为19,12,15。构造准则层的判断矩阵时,根据(3)式,可得

$$a_{14} = \sum_{i=1}^m \chi(i) / \sum_{i=1}^m \chi(4) = 1.7 \approx 2.$$

准则层判断矩阵如表7所示。

根据(4)式,同理可以得出准则层下指标层各个因素的权重大小以及CI值。结合准则层的权重以及各个指标层因素的权重,可以得到各个因素的层次总排序,见表8。

() 依靠传统层次分析法。传统的层次分析法通过引入合适的标度用数值来表示各个因素之间的相对重要度大小,从而确定其权重大小。在分析过程中,一般选用1~9标度来构造判断矩阵,数值越大,说明两者的相对重要度越悬殊,判断矩阵标度及其含义如表1所示。本文中的准则层主要包括安全管

表6 基本事件的结构重要度以及判断因子

基本事件	X'_1	X'_2	X'_3	X'_4	X'_5	X'_6	X'_7	X'_8	X'_9	X'_{10}
结构重要度	1/9	1/9	1/12	1/12	1/24	1/36	1/12	1/36	1/36	1/36
判断因子 $\chi(i)$	8	8	6	6	3	2	6	2	2	2
基本事件	X'_{11}	X'_{12}	X'_{13}	X'_{14}	X'_{15}	X'_{16}	X'_{17}	X'_{18}	X'_{19}	X'_{20}
结构重要度	1/24	1/24	1/12	1/12	1/24	1/36	1/72	1/72	1/72	1/72
判断因子 $\chi(i)$	3	3	6	6	3	2	1	1	1	1

表 7 利用事故树构造的准则层判断矩阵

	B1	B2	B3	B4	权重
安全管理(B1)	1	1	2	2	0.3381
消防设施(B2)	1	1	2	1	0.2881
建筑结构(B3)	1/2	1/2	1	1	0.1690
消防因素(B4)	1/2	1	1	1	0.2048

理、消防设施、建筑结构以及消防因素等方面,通过两两之间的重要度比较,得出的判断矩阵及其权重如表 9 所示.

同样也可以构造准则层(安全管理、消防设施、建筑结构以及消防因素)下指标层因素的判断矩阵,从而可以确定各因素的相对准则层的权重大小.结合各准则层因素与指标层因素的权重大小,可以确定各因素相对目标层(公共建筑的火灾安全)的权重.各个指标层因素相对目标层的权重大小如表 8 所示.

4.2 确定权重系数 α 和 β

由事故树构建的层次分析模型中,准则层最大的标度为 26,查表 4 可知标度因子(φ)为 0.4091.由(10)式和(9)式可得出 CR 因子(ε)为 0.9590.故权重系数为

$$\alpha = \text{标度因子}(\varphi) + \text{CR 因子}(\varepsilon) = 1.3681.$$

根据传统的层次分析法构建的模型中,准则层

的最大标度为 9,故查表可得标度因子(φ)为 1.0,由(10)式可得 CR 为 0.0435,代入(9)式可得 CR 因子为 0.5650.故权重系数为

$$\beta = \text{标度因子}(\varphi) + \text{CR 因子}(\varepsilon) = 1.5650.$$

4.3 结果与分析

将以上分别由两种判断矩阵求出的各个基本因素的权重 W'' 和 W''' ,应用(5)式综合起来,即可得到改进层次分析法的各因素权重 W .计算结果见表 8.

由表 8 中改进层次分析法和传统层次分析法的对比可知,三个基本因素在改进层次分析法中的排名有大幅度的提高.例如人员的消防素质(X2)、配电设备安全设施(X3)以及电气设备防火状况(X4),其中人员的消防素质(X2)的排名由第 20 位提高到了第 7 位.据消防年鉴对火灾原因的调查显示,在 2004 年全年共有 42987 起火灾事故发生,由于人为因素造成火灾数量占 30.2%,由于电器问题原因造成的占 20.7%^[22].人为因素归根结底表现为人员的消防素质,是造成火灾事故的一种主要因素.在传统层次分析法中,人员的消防素质(X2)的排名仅为 20,低估其火灾风险性.人员的消防素质在改进层次分析法中排名的上升表明了改进层次分析法能有效降低人主观判断带来的误差,有利于客观地对各个因素进行评

表 8 两种权重结合表

指标层	因素名称	W''	排序	W'''	排序	W	排序
X1	日常消防安全检查	0.0965	2	0.1237	1	0.1110	1
X3	配电设备安全设施	0.0817	6	0.0218	15	0.0497	9
X4	电气设备防火状况	0.0817	6	0.0270	14	0.0525	8
X5	安全知识宣传	0.0404	9	0.0871	3	0.0653	5
X6	管理人员业务水平	0.0249	16	0.0422	10	0.0341	15
X17	应急预案与演习	0.0130	20	0.0544	8	0.0351	14
X9	防排烟系统	0.0285	12	0.0216	16	0.0248	17
X13	消防栓系统	0.0902	3	0.0371	11	0.0619	6
X14	自动喷淋系统	0.0902	3	0.1152	2	0.1035	2
X15	火灾报警系统	0.0508	8	0.0873	4	0.0703	4
X16	消防灭火器材	0.0285	12	0.0639	6	0.0474	10
X7	建筑的火灾荷载	0.0845	5	0.0753	5	0.0796	3
X8	建筑的耐火等级	0.0282	14	0.0131	19	0.0201	19
X10	防火分区的划分	0.0282	14	0.0521	9	0.0410	11
X19	疏散通道	0.0141	17	0.0322	13	0.0238	18
X20	疏散指示	0.0141	17	0.0210	17	0.0178	20
X2	人员的消防素质	0.1135	1	0.0120	20	0.0593	7
X11	消防队灭火能力	0.0390	10	0.0202	18	0.0290	16
X12	消防队站点距离	0.0390	10	0.0347	12	0.0367	13
X18	人员荷载	0.0134	19	0.0583	7	0.0374	12

表 9 依靠传统层次分析法构造的判断矩阵

	B1	B2	B3	B4	权重
安全管理(B1)	1	1	2	3	0.3562
消防设施(B2)	1	1	2	2	0.3250
建筑结构(B3)	1/2	1/2	1	2	0.1937
消防因素(B4)	1/3	1/2	1/2	1	0.1251

价。电器问题是导致火灾发生第二大因素, 配电设备安全设施(X3)以及电气设备防火状况(X4)在改进层次分析法中排名的上升同样地也证明了改进层次分析法的客观性。

相对于传统层次分析法, 在改进层次分析法中一些因素的排名下降了。例如疏散通道(X19)就从第 13 位下降到了第 18 位。这种排名的下降显示了其重要性相对于其他因素要小。1948 年伊利诺州立医院发生火灾, 尽管有足够的疏散通道, 但是由于大量使用可燃材料导致了火灾的急剧蔓延, 造成了 74 人死亡^[23]。从这个案例可以看出, 建筑的火灾荷载(X7)相对于疏散通道(X19)重要性更为明显, 这些因素在改进层次分析法中的排名也说明了这一点。人员荷载(X18)是造成公共建筑人员伤亡的一个重要的因素, 高密度的人员荷载可能导致人员伤亡。但是在良好疏散引导的情况下, 高密度的人群同样能安全疏散。日本仙台市一家大型超市发生火灾, 借助良好的疏散次序, 2000 多人安全疏散, 火灾未造成人员伤亡^[23]。这个案例进一步证明了改进层次分析法的客观性。

此外, 一些因素在两种层次分析法中有着相同的排名。例如日常消防安全检查(X1)、建筑的耐火等级(X8)、自动喷淋系统(X14)以及火灾报警系统(X15)。自动喷淋系统在建筑火灾安全方面起着重要的作用。一项美国的调查统计表明, 自动喷淋系统在火灾中能减少 74% 的人员伤亡^[24]。同样火灾报警系统对火灾安全也产生重要的影响。1995 年 11 月 29 日, 上海体育馆普通电缆超负荷发热产生烟雾, 火灾报警系统及时发出报警信号, 避免了一起重大火灾事故的发生。

对于传统层次分析法以及改进层次分析法, 其中对各个因素的评价存在着一些差异。事故树结构重要度的分析没有考虑到基本事件的概率, 传统的层次分析法中判断矩阵的形成存在着一些主观的因素, 这些都会在一定程度上造成判断误差。因此, 改进层次分析法结合了以上两种评价方法的优点, 从而提高了判断的准确性。

由最终的权重排序可知, 日常消防安全检查(X1)、自动喷淋系统(X14)、建筑的火灾荷载(X7)以及火灾报警系统(X15)对公共建筑的火灾安全有着重要的影响, 应该引起安全管理人员的重视。

5 奥运场馆的风险评估

5.1 模糊层次分析法

本文利用模糊层次分析法^[25,26]对奥运场馆进行风险评价。在模糊层次分析法中, 不同安全等级有着不同的评价分数, 优秀、良好、中等、较差以及差的分数分别为 95, 85, 75, 65, 55。各种安全等级得分的区间如表 10 所示。

表 10 奥运场馆的安全等级划分

分数	≥ 90	90~80	80~70	70~60	<60
安全等级	优秀	良好	中等	较差	差

结合改进层次分析法中各个因素的权重以及专家对奥运场馆的评价, 可以得出各个奥运场馆的评价得分, 这些评价得分有效的反映了各个场馆的安全等级。从表 8 中可得准则层各因素的权重为

$$W = [0.3477 \ 0.3079 \ 0.1823 \ 0.1624],$$

指标层中各个因素的权重可以通过对各个因素归一化得到。通过改进层次分析法, 指标层各因素对于总目标的权重为

$$W_{B1} = [0.3192 \ 0.1429 \ 0.1510 \ 0.1878 \ 0.0981 \ 0.1009],$$

$$W_{B2} = [0.0805 \ 0.2010 \ 0.3361 \ 0.2283 \ 0.1539],$$

$$W_{B3} = [0.4366 \ 0.1103 \ 0.2249 \ 0.1306 \ 0.0976],$$

$$W_{B4} = [0.3651 \ 0.1786 \ 0.2260 \ 0.2303].$$

5.2 评价与结果

奥运场馆的风险评价是一项浩大的工程, 很难由一个人来完成, 而且单人会导致判断误差。基于以上考虑, 负责评价的专家小组由五位专家组成。各位专家对指标层各因素的评价将基于现场的调查得到。本文以一个奥运场馆为例, 结合了五位专家的评价意见, 从而得出了判断矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R_4 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

模糊综合评价法的计算步骤详见文献[27]。结合改进层次分析法中各因素的权重值以及各位专家的评价,该奥运场馆的最终评价得分为

$$F = [95 \ 85 \ 75 \ 65 \ 55] \cdot [0.4995 \ 0.3351 \ 0.1386 \ 0.0141 \ 0]^T = 87.25$$

从表 10 中可以看出,该奥运场馆的安全等级为良好。

6 结论

事故树分析与层次分析法都已经广泛地应用于各个领域的风险评价,对正确的分析事故原因起着

重要的作用。本文以事故树分析的基本事件构建层次分析模型,将事故树的结构重要度分析结果引入到层次分析的权重计算中,并综合两种方法的评价结果,在一定程度上减少了传统层次分析法中人的主观因素影响,使分析结果更为可靠。

改进后的层次分析法,可定量地分析各个因素对公共建筑火灾风险的影响大小,对制定公共建筑火灾的防范措施具有一定的指导意义。日常消防安全检查、自动喷淋系统、建筑的火灾荷载以及火灾报警系统对公共建筑的火灾安全有着重要的影响,应该引起安全管理人员的重视。此外,可以通过结合改进层次分析法中各因素的权重以及模糊综合评价法,对奥运场馆的火灾风险进行评估。此改进方法也可用于其他事故分析以及风险评价,具有广泛的应用价值。

参考文献

- 付强, 张和平, 王辉, 等. 公共建筑火灾风险评价方法研究. 火灾科学, 2007, 16(3): 137—142
- 杜红兵, 周心权, 张敬宗. 高层建筑火灾风险的模糊综合评价. 中国矿业大学学报, 2002, 31(3): 242—245
- Chu G Q, Chen T, Sun Z H, et al. Probabilistic risk assessment for evacuees in building fires. Build Environ, 2007, 42: 1283—1290[doi]
- 李华敏. 基于事件树法的高校学生宿舍电器火灾分析. 中西部科技, 2008, 1: 62—63
- 刘爱华, 施式亮, 吴超. 高层建筑火灾风险评估的指标体系设计. 中国工程科学, 2006, 8(9): 90—94
- 张光剑, 戴晓江, 李伟. 大型宾馆火灾事故分析. 安全与环境工程, 2007, 4: 83—85
- 郑双忠, 高永庭, 陈宝智. 城市建筑火灾风险评价指标体系的研究. 消防科学与技术, 2001, 5: 12—13
- Hikmat H A, Saba F A N. Developing a green building assessment tool for developing countries - case of Jordan. Build Environ, 2008, 44(5): 1053—1064, [doi]
- Johnson C W. Using evacuation simulations for contingency planning to enhance the security and safety of the 2012 Olympic venues. Safety Sci, 2008, 46: 302—322[doi]
- 史健勇, 任爱珠. 计算机仿真技术应用于奥运场馆火灾安全分析. 自然灾害学报, 2005, 4: 95—102
- Vaurio J K. Common cause failure probabilities in standby safety system Fault Tree Analysis with testing—scheme and timing dependencies. Reliab Eng Syst Safe, 2003, 79: 43—57[doi]
- Reay K A, Andrews J D. A fault tree analysis strategy using binary decision diagrams. Reliab Eng Syst Safe, 2002, 78: 45—56[doi]
- 陈宝智. 危险源辨识、控制与评价. 成都: 四川科学技术出版社, 1996. 10—25
- 伍爱友, 王从陆, 肖国清. 事故树分析方法在建筑物火灾人员伤亡中的应用. 中国安全科学学报, 2005, 15(5): 92—95
- 顾莉, 刘晓东, 鄢洪青. 故障树在油库火灾爆炸事故风险评价中的应用. 环境科学与技术, 2007, 30(6): 52—54
- Saaty T L, Tran L T. On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the analytic hierarchy process. Math Comput Model, 2007, 46: 962—975[doi]
- Saaty T L, Shang J S. Group decision-making: Head-count versus intensity of preference. Socio Econ Plan Sci, 2007, 41: 22—37[doi]
- Dong Y C, Xu Y F, Li H Y, et al. A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP. Eur J Oper Res, 2008, 186: 229—242[doi]
- 刘铁民, 张兴凯, 刘功智. 安全评价方法应用指南. 北京: 化学工业出版社, 2005. 15—38
- 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法——一种简易的新决策方法. 北京: 科学出版社, 1986. 9—24
- Kariuki S G, Löwe K. Integrating human factors into process hazard analysis. Reliab Eng Syst Safe, 2007, 92: 1764—1773[doi]
- 郭铁男. 2004 年火灾形势与当前和今后一个时期火灾趋势及防治对策. 消防科学与技术, 2005, 24(3): 263—266
- 郭瑞璜. 美、英、日等国火灾调查的历史——火灾调查对建筑物疏散安全计划所起的作用. 消防技术与产品信息, 2002, 8: 59—67
- Rohr K D, Hall J R. U.S. Experience with Sprinklers and other Fire Extinguishing Equipment. Technology Report, Fire Analysis and Research Division, National Fire Protection Association. 2005. 1—5
- Wang Y M, Luo Y, Hua Z S. On the extent analysis method for Fuzzy AHP and its applications. Eur J Oper Res, 2008, 186: 735—747[doi]
- 林岭. 人员密集公共建筑安全分级评价初探. 硕士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2006. 23—64
- 于志鹏, 陆愈实. 模糊层次综合评价法在企业安全评价中的应用. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(3): 119—121