

# 商业建筑初期灭火系统分析与决策\*

闫金花<sup>1</sup>, 张兴国<sup>1</sup>, 李慧民<sup>2</sup>, 杨茂盛<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400045 2. 西安建筑科技大学, 陕西西安 710055)

**摘要:** 初期灭火是遏制商业建筑火灾的最佳时机, 针对商业建筑火灾初期灭火过程中出现的问题, 构建系统模型进行分析。数据来源于我国商业建筑特大火灾案例, 采用贝叶斯统计分析方法进行分析, 克服了火灾数据缺乏、且难以进行大量重复实验的困难, 得到参数的条件期望估计与方差。通过对系统故障树的分析, 得到我国商业建筑火灾初期灭火失败概率的期望与方差, 并对参数引起的误差进行系统误差传播分析, 最后进行系统决策。

**关键词:** 初期; 系统; 模型; 贝叶斯统计分析; 误差传播; 决策

**中图分类号:** TU 998.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7329(2007)01-0022-04

## Analysis and Strategic Decision of Extinguishment System at the Initial Stage of Fire in Commercial Buildings

YAN Jin-hua<sup>1</sup>, ZHANG Xing-guo<sup>1</sup>, LIHui-min<sup>2</sup>, YANG Mao-sheng<sup>2</sup>

(1. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045 P. R. China 2. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055 P. R. China)

**Abstract** The best chance to extinguish the fire in commercial buildings is at the initial stage of a fire. For the problems during extinguishment at the initial stage of fire, a fire extinguishment system model at initial stage of fire in commercial buildings is designed. The fire data come from the fire cases in Chinese commercial buildings. The expected value and Variance of probability of basic events are calculated by using Bayesian statistical analysis method, which has overcome the difficulty from inefficient fire datum and obtaining repeated fire experience. Then the failure probability of extinguishment system at initial stage of fire is concluded from fault tree analysis and the error propagation analysis of fault tree is made. A systematic strategic decision has been made finally.

**Keywords** initial stage; system; model; Bayesian statistical analysis; error propagation; strategic decision

商业建筑特大火灾事故频繁发生, 火灾初期灭火不利是其主要原因。通过对我国商业建筑特大火灾案例调查, 建立初期灭火故障树模型进行系统分析<sup>[1~3]</sup>。由于商业建筑火灾具有低概率, 高风险的特点, 而且难以进行大量的重复试验, 要想获得大量的统计数据几乎是不可能的。通过采用了贝叶斯统计分析方法, 将参数作为随机变量, 统计分析建立在由验前分布和抽样分布所确定的后验分布的基础上, 从而得到了各部件概率的条件期望估计与方差。然后对系统进行误差传播分析, 最后进行系统决策。

### 1 系统模型分析

#### 1.1 模型的建立

调查 1990~2003 年发生在我国大中型商业建筑

的特大火灾事故案例<sup>[4]</sup>, 分析初期灭火失败的原因, 按照各基本事件之间的逻辑关系, 建立系统故障树模型(图 1~4)<sup>[5]</sup>, 其中各基本事件分别表示为:  $a_i, i=1, \dots, 6, b_j, j=1, \dots, 6, c_k, k=1, 2, 3, m_r, r=1, \dots, 15$ 。

#### 1.2 数据分析

1.2.1 统计分析方法 经典的统计分析方法需要大量的统计数据, 认为母体分布中的未知参数为一常量, 但由于火灾数据的缺乏难以采用。贝叶斯统计分析方法将母体分布中的未知参数看作随机变量, 认为考虑抽样结果是必要的, 但还应考虑先验分布, 由二者确定的后验分布来确定未知参数的分布。在同样的精度条件下, 所需要的抽样量少, 因此火灾数据分析采用贝叶斯统计分析方法, 伴随着先验信息的增加, 逐步加深对母体未知参数的认识。

\* 收稿日期: 2006-07-12

作者简介: 闫金花(1973-), 女, 内蒙古人, 讲师, 博士后, 主要从事建筑防火, 管理科学与工程研究。

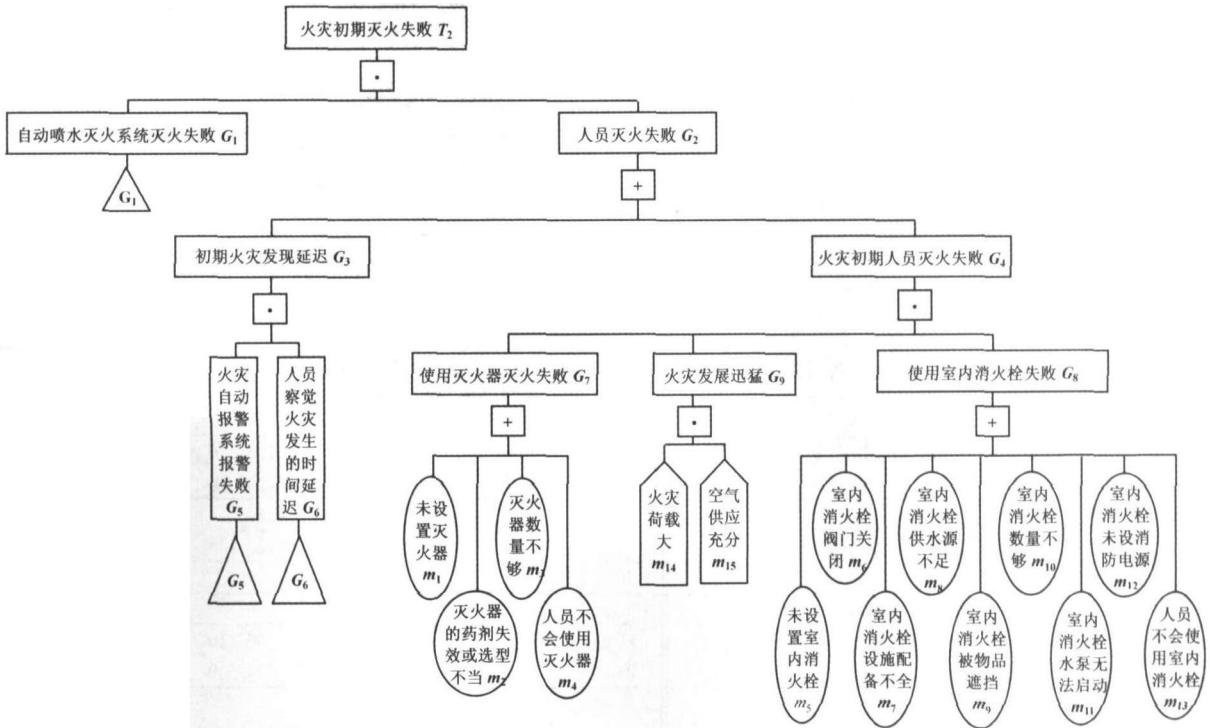


图 1 商业建筑火灾初期灭火失败故障树

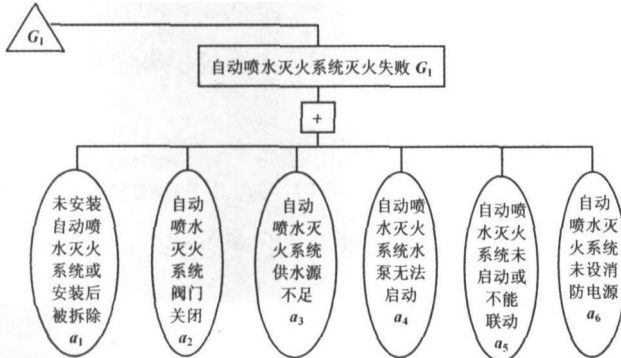


图 2 自动喷水灭火系统灭火失败故障子树

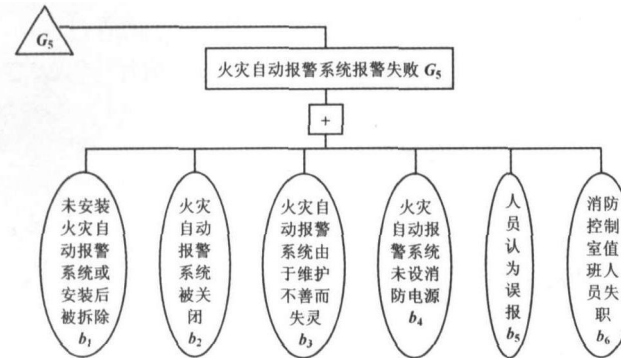


图 3 火灾自动报警系统警失败故障子树

贝叶斯参数统计模型:

定义 1: (1) 参数  $\theta$  的参数空间  $\Theta$  上的一个概率分布称为  $\theta$  的先验分布, 其 (连续或离散) 密度记为  $\{\pi(\theta); \theta \in \Theta\}$ 。(2) 样本  $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)^T$  的条件密度函数族  $\{f(x|\theta); \theta \in \Theta\}$  (连续或离散) 称为样本分布族。(3) 先验分布  $\{\pi(\theta); \theta \in \Theta\}$  与样本分布族  $\{f(x$

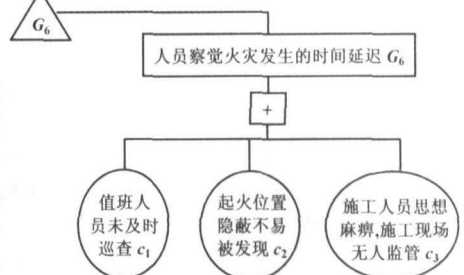


图 4 人员察觉火灾时间延迟故障树

构成贝叶斯参数统计模型<sup>[6-7]</sup>。

在  $X=x$  时,  $\theta$  的条件密度函数:

$$h(\theta|x) = \frac{f(x|\theta)\pi(\theta)}{\int_{\Theta} f(x|\theta)\pi(\theta)d\theta} \quad (1)$$

称贝叶斯公式。

定义 2 在  $X=x$  的条件下,  $\theta$  的条件分布称为  $\theta$  的后验分布, 后验分布由后验密度函数  $\{h(\theta|x), \theta \in \Theta\}$  描述。

当给定样本  $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ , 记  $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 则样本密度  $f(x|\theta)=f(x_1, x_2, \dots, x_n|\theta)$ , 即似然函数, 记为  $L(\theta|x)$ , 由于分母  $\int_{\Theta} f(x|\theta)\pi(\theta)d\theta$  与  $\theta$  无关, 故有

$$h(\theta|x) \propto \pi(\theta)L(\theta|x) \quad (2)$$

参数统计结果 在初期灭火系统中, 由于各基本事件只有“发生”和“不发生”两种情况, 因此母体服从 0-1 分布  $B(1, \theta)$ 。设母体分布律为  $P\{x|\theta\}=\theta^x(1-\theta)^{1-x}$ ,  $x=0, 1$ 。  $X(X_1, X_2, \dots, X_n)$  为取自总体  $X$

中的一个样本, 其似然函数<sup>[8]</sup>为

$$L(\theta | x) = \prod_{i=1}^n p(x_i | \theta) = \theta^{\sum x_i} (1 - \theta)^{n - \sum x_i} = \theta^{n\bar{x}} (1 - \theta)^{n - n\bar{x}} \quad (3)$$

假设抽样前无关于  $\theta$  的信息, 取区间  $(0, 1)$  上的均匀分布  $U(0, 1)$  作为  $\theta$  的先验分布, 即

$$\pi(\theta) = \begin{cases} 1 & 0 < \theta < 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

表 1 各基本事件参数的条件期望 ( $\times 10^0$ ) 与方差 ( $\times 10^{-3}$ )

事件	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
期望	0.692 308	0.051 282 1	0.128 205	0.076 923 1	0.102 564	0.076 923 1	0.358 974	0.153 846	0.076 923 1	0.076 923 1
方差	5.325 44	1.216 31	2.794 21	1.775 15	2.301 12	1.775 15	5.752 79	3.254 44	1.775 15	1.775 15
事件	$b_5$	$b_6$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$
期望	0.051 282 1	0.076 923 1	0.666 667	0.076 923 1	0.102 564	0.051 282 1	0.051 282 1	0.128 205	0.128 205	0.076 923 1
方差	1.216 31	1.775 15	5.555 56	1.775 15	2.301 12	1.216 31	1.216 31	2.794 21	2.794 21	1.775 15
事件	$m_6$	$m_7$	$m_8$	$m_9$	$m_{10}$	$m_{11}$	$m_{12}$	$m_{13}$		
期望	0.051 282 1	0.076 923 1	0.256 410	0.051 282 1	0.051 282 1	0.051 282 1	0.076 923 1	0.256 410		
方差	1.216 31	1.775 15	4.766 60	1.216 31	1.216 31	1.216 31	1.775 15	0.624 589		

### 1.3 系统故障树分析

由系统模型(图 1~4)得到商业建筑初期灭火失败故障树的结构函数为:

$$\psi = G_1 \cdot G_5 \cdot G_6 + G_1 \cdot G_5' \cdot G_8 + G_1 \cdot G_5 \cdot G_6' \cdot G_7 \cdot G_8$$

其中:

$G_1 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6$ , 其中  $a_1$  与  $a_2, \dots, a_6$

互斥,  $a_2, \dots, a_6$  之间相互独立;

$G_5 = b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6$ , 其中  $b_1$  与  $b_2, \dots,$

$b_6$  互斥,  $b_2, \dots, b_6$  之间相互独立;

$G_6 = c_1 + c_2 + c_3$ , 其中  $c_1, c_2, c_3$  之间相互独立;

$G_7 = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$ , 其中  $m_1$  与  $m_2, m_3, m_4$  互

斥,  $m_2, m_3, m_4$  之间相互独立;

$G_8 = m_5 + m_7 + \dots + m_{13}$ , 其中  $m_5$  与  $m_6, \dots, m_{13}$  互

斥,  $m_6, \dots, m_{13}$  之间相互独立。

$G_1, G_5, G_6, G_7, G_8$  发生的概率  $F_{G_1}, F_{G_5}, F_{G_6}, F_{G_7}, F_{G_8}$  分别为:

$$F_{G_1} = F_{a_1} + 1 - \prod_{i=2}^6 (1 - F_{a_i}) = 1.0$$

$$F_{G_5} = F_{b_1} + 1 - \prod_{i=2}^6 (1 - F_{b_i}) = 0.727 580$$

$$F_{G_6} = 1 - \prod_{i=2}^3 (1 - F_{c_i}) = 0.723 866$$

表 2 各基本事件的关键重要度

基本事件	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
关键重要度	0.692 308	0.034 186 9	0.093 008 3	0.052 704 8	0.072 280 8	0.052 704 8	0.341 024	0.109 059	0.049 985 2	0.049 985 2
基本事件	$b_5$	$b_6$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$
关键重要度	0.032 422 8	0.049 985 2	0.527 347	0.021 972 7	0.030 133 9	0.022 698 2	0.017 251 2	0.046 933 3	0.046 933 3	0.046 933 3
基本事件	$m_6$	$m_7$	$m_8$	$m_9$	$m_{10}$	$m_{11}$	$m_{12}$	$m_{13}$		
关键重要度	0.006 850 50	0.010 561 2	0.043 701 1	0.006 850 50	0.006 850 50	0.006 850 50	0.010 561 2	0.003 335 10		

则其后验密度为:

$$h(\theta | x) \propto \pi(\theta)L(\theta | x) \propto L(\theta | x) = \theta^t (1 - \theta)^{n-t} \quad (t = n\bar{x}) \quad (5)$$

是  $\beta$  分布  $\beta(t+1, n-t+1)$  的核。由于先验分布  $U(0, 1)$  分布即为  $\beta(1, 1)$  分布, 与后验分布  $h(\theta | x)$  同属于  $\beta$  分布族, 因此  $U(0, 1)$  也是  $0-1$  分布的共轭分布。根据公式(1)~公式(5), 得到各基本事件发生概率的条件期望估计与方差, 见表 1。

$$F_{G_7} = F_{m_1} + 1 - \prod_{i=2}^4 (1 - F_{m_i}) = 0.330 231$$

$$F_{G_8} = F_{m_5} + 1 - \prod_{i=6}^{13} (1 - F_{m_i}) = 0.576 800$$

得到商业建筑火灾初期灭火系统顶事件发生的概率为:

$$F = F_{G_1} F_{G_5} F_{G_6} + F_{G_1} (1 - F_{G_5}) F_{G_7} F_{G_8} + F_{G_1} F_{G_5} (1 - F_{G_6}) F_{G_7} F_{G_8} = 0.616 829$$

因此商业建筑火灾初期灭火系统顶事件发生的概率为 0.616 829。

在故障树分析中各基本事件对系统的影响程度通过重要度来衡量, 由于关键重要度表示基本事件故障概率的变化率所引起的系统故障概率的变化率, 较好地反映了基本事件对系统的影响程度, 因此通过基本事件的关键重要度来衡量其对系统的影响程度。表 2 为各基本事件的关键重要度。

基本事件  $x_i$  的关键重要度为:

$$I_i^r(t) = \frac{F_i(t)}{F(t)} I_i^r(t) \quad (6)$$

其中  $I_i^r(t)$  为部件的概率重要度,

$$I_i^r(t) = \frac{\partial F(t)}{\partial F_i(t)} \quad (7)$$

各基本事件的关键重要度按照由大到小的顺序排列如下:

$$\begin{aligned} & f_{a_1}^r > f_{c_1}^r > f_{b_1}^r > f_{b_2}^r > f_{a_3}^r > f_{a_5}^r > f_{a_4}^r, f_{a_6}^r > f_{b_3}^r, f_{b_4}^r, f_{b_6}^r > \\ & f_{m_3}^r, f_{m_4}^r > f_{m_8}^r > f_{a_2}^r > f_{b_5}^r > f_{c_3}^r > f_{m_1}^r > f_{c_2}^r > f_{m_5}^r > f_{m_2}^r > f_{m_7}^r > \\ & f_{m_6}^r, f_{m_9}^r, f_{m_{10}}^r, f_{m_{11}}^r > f_{m_{13}}^r \end{aligned}$$

## 2 系统决策

1) 从各基本事件关键重要度的排序知: 造成商业建筑火灾初期灭火失败的主要原因是  $a_1$  事件——未安装自动喷水灭火系统或安装后被拆除;  $a$  事件——值班人员未及时巡查,  $b_1$  事件——未安装火灾自动报警系统或安装后被拆除,  $b_2$  事件——火灾自动报警系统被关闭。因此必须改善这 4 个部件的故障率, 才能有效降低初期灭火失败的概率。

2) 我国商业建筑发生的特大火灾事故多数是由于未安装自动喷水灭火系统或安装后被拆除, 而导致初期灭火失败的, 如在建筑施工过程中将原有的自动喷水灭火系统的一部分或全部拆除, 而对于未拆除的部分又存在许多故障。对于所安装的自动喷水灭火系统, 供水源不足造成灭火失败的主要原因, 其次是由于维护不善而导致的故障, 如自动喷水灭火系统未启动或不能联动, 阀门关闭, 未设消防电源, 消防电源同照明会用等问题。因此要保证自动喷水灭火系统正常发挥作用, 维护管理是关键环节, 尤其是要注意消防供水源是否充足的问题, 其次是要定期检查自动喷水灭火系统是否能够启动或联动, 阀门是否关闭, 在施工和设计过程中消防电源的设置情况。

3) 商业建筑未安装火灾自动报警系统, 以及所安装的火灾自动报警系统失灵是导致火灾自动报警系统报警失败的主要原因, 从而延误了火灾报警时间, 导致初期灭火失败。许多商业建筑火灾是发生在夜晚或是在下班时间, 由于值班人员的疏忽, 未进行巡查, 擅离岗位等原因, 常常导致人员发现火灾的时间延迟, 错过初期灭火时机, 导致人员初期灭火失败。当人员发现火灾后, 由于灭火器干粉失效, 数量不足、消火栓器具配备不全、水源供应不足、消火栓被物品遮挡、人员因未经过防火训练不会使用等原因, 常常使这些消防器材无法正常发挥作用, 形同虚设。

4) 在商业建筑施工时, 由于违章电焊, 落下的焊

渣或遗留的火种常常引起火灾, 一方面施工人员思想麻痹, 未作好防火准备工作, 另一方面由于施工现场无人监管, 不能及时发现火灾, 这些都将导致人员初期灭火的失败。

5) 有的商场经营者不安排值班人员, 以及起火位置隐蔽等原因, 常常使火灾在初期阶段难以被发现, 从而错过了初期灭火时机。

综上所述, 安装火灾自动喷水灭火系统, 注意管理与维护, 是防止商业建筑特大火灾发生的重点。其次是需要完善火灾自动报警系统, 加强值班人员的巡查工作, 提高人员的防火意识, 掌握灭火技能, 提高火灾初期预警与灭火能力, 才能有效提高初期灭火的概率。

## 4 结论

通过调查商业建筑初期灭火过程中出现的问题, 建立系统故障树模型进行分析。针对火灾数据缺乏、难以进行大量重复实验的困难, 采用贝叶斯统计方法进行分析, 得到了各基本事件的条件期望估计与方差。通过对系统故障树的分析, 得到我国商业建筑火灾初期灭火失败概率的期望与方差, 并对参数引起的误差进行系统误差传播分析。最后对系统进行决策。

## 参考文献:

- [1] Jane I Lataik P. E. Fire Protection Engineering in Building Designs[M]. Fire Protection Engineering Los Alamos National Laboratory 2002
- [2] Bayler C. L. Fire Safety Challenges in the 21st Century[J]. Journal of Fire protection Engineering 2000 11(1): 4-15
- [3] 日本建设省. 孙金香, 高伟译. 建筑物综合防火设计[M]. 天津: 天津科技翻译出版公司, 1994
- [4] 公安部消防局. 中国火灾统计年鉴(1996~2003)[M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 1996~2003
- [5] [美] W. E. 维齐利等. 故障树手册[M]. 北京: 原子能出版社, 1987
- [6] 范金城, 吴可法. 统计推断导引[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [7] 梅启智, 廖炯生, 孙慧中. 系统可靠性工程基础[M]. 北京: 科学出版社, 1992
- [8] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996