

公共场所人群聚集社会风险的研究

李剑峰, 刘 茂, 隋晓琳

(南开大学城市公共安全研究中心, 天津 300071)

[摘要] 城市化进程的加快导致公共场所人群聚集事故时有发生, 试图用泊松分布来描述一段时间内事故发生次数及其对应的概率, 进而推导出事故灾害频率的定量模型; 同时通过统计不同严重程度(死亡人数)事故的发生次数, 用其发生频率表征其发生的条件概率, 根据计算得到的死亡事故发生概率, 即可得到不同死亡人数事故的发生概率, 最终得到 $F-N$ 图。运用 $F-N$ 图就可以分析公共场所人群聚集的社会风险。以公共场所部分事故统计为参考数据, 描述使用该模型的步骤, 结果表明该模型具有一定的合理性和准确性。

[关键词] 人群聚集风险; 社会风险; $F-N$ 图; 定量风险分析

[中图分类号] X913.3 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)06-0088-06

1 引言

公共场所突发重大事故的一个显著特点是大量人群聚集。由于公众在公共场所事故中存在从众心理及盲目恐慌, 往往使事故难以控制并极易引起某些次生事故, 导致灾害扩大化。为了保证公共场所人群的安全, 减少公共场所财产损失, 需要加强对城市公共场所突发重大事故风险的研究。

社会风险指的是单位时期内危险源发生的所有事故中死亡人数等于或大于 N 的事故的发生概率^[1]。社会风险是风险定量的重要指标之一, 体现了事故发生对社会整体的可能危害。社会风险描述事故发生概率与事故造成的人员受伤或致死数之间的关系, 可以用“累计频率/死亡人数曲线”、“余补累计频率分布”或“余补累计函数”等表征。作者用“余补累积频率/死亡人数曲线 (F/N 曲线)”来表征社会风险。

目前, 国内外对工业设施所造成的社会风险已经提出了切实可行的定量计算方法^[2], 但是对于人群聚集社会风险却缺乏定量的方法。理论上说, 社

会风险的描述应对事故灾害频率 (F) 和后果 (N) 分别计算, 然后把所有结果综合起来建立社会风险 $F-N$ 曲线。作者根据前人研究成果“一段时间内事故发生次数及其对应的概率可以用泊松分布来描述”, 推导出事故灾害频率的定量模型; 同时, 通过统计不同严重程度(死亡人数)事故的发生次数, 用其发生频率表征其发生的条件概率, 根据计算得到的死亡事故发生概率, 即可得到不同死亡人数事故的发生概率, 从而最终得到 $F-N$ 曲线。运用 $F-N$ 曲线就可以分析公共场所人群聚集的社会风险。

2 计算社会风险的前期准备

2.1 社会风险的计算思路

社会风险计算分为三步进行: 首先计算死亡事故发生的概率, 得到 $P(A)$; 然后, 计算出引起大于或者等于 N 人死亡的所有事故的条件概率(事故后果), 得到 $P(B|A)$; 最后, 将 $P(A)$ 与 $P(B|A)$ 相乘, 得到大于或者等于 N 人死亡的所有事故的累积频率 $F(N)$ 。

[收稿日期] 2006-07-19; 修回日期 2006-10-26

[基金项目] “十五”国家科技攻关计划滚动课题“城市突发重大事故风险控制与应急技术研究及试点”资助项目(2004BA803B05); 国家自然科学基金资助项目(70373031)

[作者简介] 李剑峰(1979-), 男, 福建三明市人, 南开大学城市公共安全研究中心博士研究生

2.2 公共场所事故统计及分析

获取充足的事故统计资料和数据是进行人群聚集风险计算的前提。作者主要从《安全与环境学报》历年事故统计资料汇编以及中国国家安全生产监督管理局网站上获取了一部分国内公共场所事故统计资料（时间跨度为 2001—2005 年上半年）。虽然是不完全的统计资料，但是可以将这些数据作为完整统计资料的某种随机抽样，籍此作为今后分析的某种参考。

从统计角度出发将公共场所事故分为以下六大类，不同事故类型用不同的风险影响因子 R 来表征。

- 1) 火灾风险类事故——火灾因子 R_1
- 2) 爆炸风险类事故——爆炸因子 R_2
- 3) 中毒风险类事故——中毒因子 R_3
- 4) 结构风险类事故——结构因子 R_4
- 5) 人群拥挤类事故——心理扰动因子 R_5
- 6) 其他事故——其它风险因子

基于统计资料，假设公共场所事故的发生是火灾因子、爆炸因子、中毒因子、结构因子以及心理扰动因子共同作用的结果，舍弃了“其它事故”所造成的伤害。根据事故类型及其对应的死亡人数和受伤人数，得图 1、图 2。而图 3 给出了各类事故数、伤亡数在总数中所占的比例。

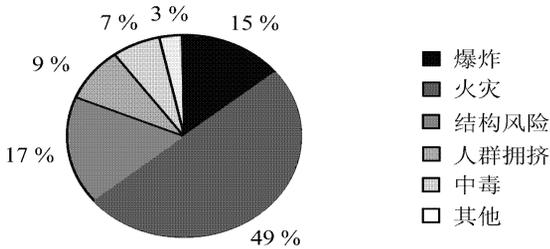


图 1 2001—2005 年上半年各类事故死亡人数

Fig.1 2001—2005 death toll in accidents

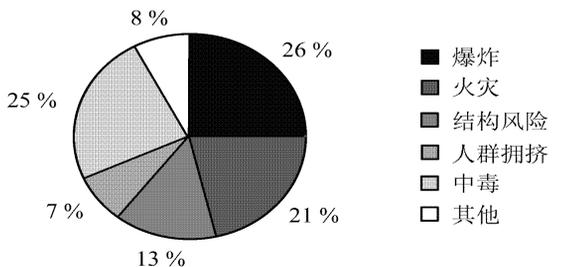


图 2 2001—2005 年上半年各类事故受伤人数

Fig.2 2001—2005 the injured's number in accidents

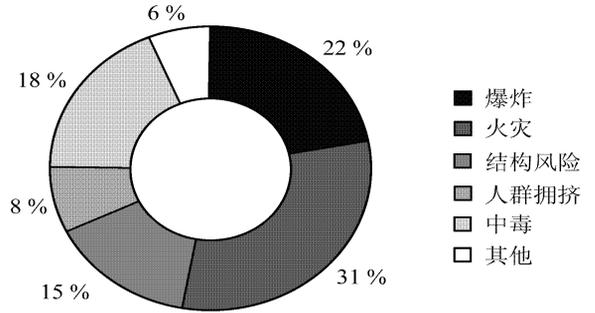


图 3 2001—2005 年上半年各类事故导致的伤亡数在总伤亡数中的比例

Fig.3 2001—2005 the proportion of a specific injured's number in the overall

经分析，可以得到以下基本结论和统计结果：

- 1) 火灾造成的伤亡所占比例最大。
- 2) 火灾、爆炸、结构风险、中毒、人群拥挤五个风险因子所造成的伤亡比例大于 90 %。

3) 从全国事故统计资料看，火灾所带来的伤亡，仅次于道路交通事故，排第二位。但是就该研究范围而言，上述五个风险因子的作用强度（以其伤亡总数衡量）之间不存在数量级上的差距（以百分比衡量）。

4) 在足够长的统计时间内， $R_1 \sim R_5$ 各种事故数之间的比例可以简单认为服从以下比例： $R_1 : R_2 : R_3 : R_4 : R_5 = 33 : 26 : 16 : 13 : 5$ 。

3 死亡事故发生的概率

3.1 死亡事故发生概率计算思路

一段时间内事故发生次数及其对应的概率可以用泊松过程来描述^[3]，但是它是一个离散的随机过程，必须运用数学方法将整体泊松过程分解为多个独立的指数分布，然后分析单个指数分布，得出具体的伽马分布表达式；然后建立相对应的叠加模型，进而计算出事故发生的概率。

3.2 泊松过程与指数分布的关系

设 X_1 和 X_2 为相互独立且均服从参数为 $\lambda > 0$ 的指数分布^[4]，即它们的密度函数为：

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

由密度函数的卷积公式知道 $Z = X_1 + X_2$ 的密度函数是：

$$C_{2,\lambda}(z) = \begin{cases} \int_0^z \lambda e^{-\lambda x} \lambda e^{-\lambda(z-x)} dx = \int_0^z \lambda^2 e^{-\lambda z} dx \\ = \lambda^2 z e^{-\lambda z}, & z \geq 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases} \quad (2)$$

若 X_1, X_2, \dots, X_r 是 r 个相互独立并且具有相同参数 λ 的指数分布随机变量, 则从上面的 $C_{2,\lambda}(z)$ 出发, 利用归纳法可以证明 $Z = X_1 + X_2 + \dots + X_r$ 的密度函数是:

$$C_{r,\lambda}(z) = \begin{cases} \frac{\lambda^r}{(r-1)!} z^{r-1} e^{-\lambda z}, & z \geq 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases} \quad (3)$$

从式 (3) 看出 $C_{r,\lambda}(z)$ 含有两个参数 r 和 λ , 记做 $\Gamma(r, \lambda)$ 。当 $t = n$ 为一正整数时, 具有参数 r 和 λ 的伽马分布在应用上通常是 n 个事件发生所需时间量的分布, 证明如下。

对于任意正数 k , $\Gamma(k, \lambda)$ 分布是 k 个相互独立的具有相同参数 λ 的指数分布随机变量之和, 故对 $k=1, 2, \dots$ 有:

$$\begin{aligned} P(N_t = k) &= P(T_1 + \dots + T_k \leq t < T_1 + \dots + T_{k+1}) = \\ &= P(T_1 + \dots + T_k \leq t) - \\ &= P(T_1 + \dots + T_{k+1} \leq t) = \\ &= \int_0^t \{ e^{-\lambda x} (\lambda x)^{k-1} \lambda / (k-1)! \} dx - \\ &= \int_0^t \{ e^{-\lambda x} (\lambda x)^k / k! \} dx = \\ &= \int_0^{\lambda t} \{ e^{-y} y^{k-1} / (k-1)! \} dy - \\ &= \int_0^{\lambda t} \{ e^{-y} y^k / k! \} dy \end{aligned} \quad (4)$$

对式 (4) 右端第一项作分步积分得:

$$\int_0^{\lambda t} \{ e^{-y} y^{k-1} / (k-1)! \} dy = [e^{-\lambda y} (\lambda t)^k / k!] + \int_0^{\lambda t} \{ e^{-y} y^k / k! \} dy \quad (5)$$

$$\text{故 } P(N_t = t) = e^{-\lambda t} (\lambda t)^k / k! \quad k = 1, 2, \dots \quad (6)$$

又由 $(N_t = 0)$ 等价于 $(T_1 > t)$ 得:

$$P(N_t = 0) = P(T_1 > t) = e^{-\lambda t} \quad (7)$$

通过上面的定理证明得到:

$$P(T_1 + \dots + T_k \leq t) - P(T_1 + \dots + T_{k+1} \leq t) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!} \quad (8)$$

因为 $T_1 + \dots + T_k$ 和 $T_1 + \dots + T_{k+1}$ 分别为参数为 (k, λ) 和 $(k+1, \lambda)$ 的 Γ 分布, 故上式即是:

$$F_{k,\lambda}(t) - F_{k+1,\lambda}(t) = e^{-\lambda t} (\lambda t)^k / k! \quad (9)$$

由式 (9) 得:

$$\begin{aligned} F_{k,\lambda}(x) &= F_{k-1,\lambda}(x) - e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^{k-1}}{(k-1)!} = \\ &= F_{k-2,\lambda}(x) - e^{-\lambda x} \left[\frac{(\lambda x)^{k-1}}{(k-1)!} + \frac{(\lambda x)^{k-2}}{(k-2)!} \right] = \\ &= \dots = \\ &= 1 - e^{-\lambda x} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda x)^i}{i!} \end{aligned} \quad (10)$$

因此, 设 T_1, T_2, \dots 是一串相互独立且具有相同参数 λ 的指数分布随机变量, t 是任意固定正数, 则由:

$$T_1 + T_2 + \dots + T_{N_t} \leq t < T_1 + T_2 + \dots + T_{N_t+1} \quad (11)$$

确定的随机变量 N_t 有参数为 λt 的泊松分布。

3.3 伽马分布的引入

如果事故发生服从泊松过程, 那么第 r 次事故发生的时间可以用伽马分布描述。设 T_r 表示整个公共场所内第 r 次事故发生的时间, 那么直到第 r 次事故发生的平均时间是 $E(T_r) = r/\lambda$, 服从指数分布或者泊松过程, 直到第 r 次事故发生的等待时间 t 是以 λ 和 r 为参数的伽马分布。同样, 对于被分割成不同部分的对象, 第 1 次和第 r 次事故发生以及第 1 次和第 r 次事故发生的预期时间也可以用指数分布和伽马分布描述。

令 T_n 表示第 n 个事件发生的时间, T_n 小于或等于 t 的充要条件为到时间 t 时所发生的事件数不小于 n 。也就是说, 若以 $N(t)$ 表示在时间区间 $[0, t]$ 内发生的事件数, 则:

$$\begin{aligned} P(T_n \leq t) &= P\{N(t) \geq n\} = \sum_{j=n}^{\infty} P\{N(t) = j\} \\ &= \sum_{j=n}^{\infty} \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^j}{j!} \end{aligned} \quad (12)$$

将式 (12) 微分得 T_n 的密度函数如下:

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{j=n}^{\infty} \frac{e^{-\lambda t} j(\lambda t)^{j-1} \lambda}{j!} - \sum_{j=n}^{\infty} \frac{\lambda e^{-\lambda t} (\lambda t)^j}{j!} \\ &= \frac{\lambda e^{-\lambda t} (\lambda t)^{(n-1)}}{(n-1)!} \end{aligned} \quad (13)$$

因此 T_n 具有参数是 (n, λ) 的伽马分布。

3.4 伽马分布的物理意义及其表达式

设历年平均的发生在城市公共场所的事故次数为 θ (单位: 次/年), 则相应的指数分布概率密度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\theta} e^{-\frac{x}{\theta}}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

令： $\frac{1}{\theta} = \lambda$ ，则相应的概率密度函数变为

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

设 T_r 表示公共场所内第 r 次事故发生的时间，

$$\text{则 } T_r \sim C_{r,\lambda}(t) = \begin{cases} \frac{\lambda^r}{(r-1)!} t^{r-1} e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (16)$$

其中，设影响因子 $R_1 \sim R_5$ 相对应的事故年平均发生次数 r 为 r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 。

这样就可以建立如下五个影响因子的对应的伽马分布表达式：

$$R_1 \sim \Gamma(r_1, \lambda); \dots; R_5 \sim \Gamma(r_5, \lambda)。$$

此外，若相互独立的随机变量 X 和 Y 分别由分布 $\Gamma(r, \lambda)$ 和 $\Gamma(s, \lambda)$ ，则 $Z = X + Y$ 有分布 $\Gamma(r + s, \lambda)$ ，因此，最终的伽马分布为： $R \sim \Gamma(r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5, \lambda)$ ，其分布函数为：

$$F_{r,\lambda}(H) = \left[1 - e^{-\lambda H} \sum_{i=0}^{(r_1+r_2+r_3+r_4+r_5)-1} \frac{(\lambda H)^i}{i!} \right] \quad (17)$$

上述表达式称为死亡事故发生概率计算模型。

4 计算示例——体育场馆社会风险曲线的绘制

4.1 体育场馆死亡事故发生概率的计算

目前掌握的体育场馆事故统计资料^[5]比较有限，可以认为是小概率，重后果的事件。因此需要加大统计时间跨度。资料的时间跨度为 1902—2005 年，约 104 年，所以 $T=100$ （表 1）。

在死亡事故发生概率计算模型中， r 取上表的 34； λ 为泊松分布强度的倒数，取值需要讨论：由于目前统计资料的原因，无法收集到 100 年来体育场馆事故，以上统计资料都是有记录的大事故，因此有必要提高事故的总量，作者拟人为提高事故总数 1 个数量级，即 $\lambda = 1/340$ ； T 为统计跨度 100 年； H 则根据研究需要，确定为 $T/100$ ，即 1 年。

计算结果为 $P_{34,0.00294}(0.01) = 1.47 \times 10^{-5}$ ，从 100 年的统计时间跨度来看，可以认为每年体育场馆死亡事故发生的概率在 10^{-5} 数量级。

4.2 引起大于或者等于 1, 10, 100, 1 000 人死亡的所有事故的条件概率的计算

通过表 1 中的事故数据，统计不同严重程度（死亡人数）事故的发生次数，用其发生频率表征不同严重程度事故发生条件概率 $P(B|A)$ ，即实际计算引起大于或者等于 N 人死亡的所有事故的条件概率时，直接应用统计得到的现场死亡人数及其对应的事故发生次数在总的事故发生次数中所占的比例，亦即，用事故发生频率表征不同严重程度事故（与现场死亡人数相对应）发生的条件概率（表 2）。

4.3 根据 $P(A) \times P(B|A)$ ，求出 $F(N)$

根据计算得到的体育馆死亡事故发生概率以及引起大于或者等于 1、10、100、1 000 人死亡的所有事故的条件概率，即可得到不同死亡人数事故的发生概率，如表 3 所示，并可据此绘制出 F/N 图（图 4）。

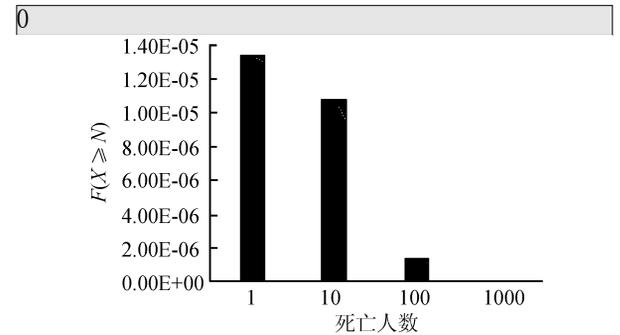


图 4 体育场馆社会风险 F/N 图

Fig.4 The F/N curve shows the social risk of stadium

5 结论

目前，国内外对于公共场所人群聚集的社会风险没有能够提出一套风险定量的方法，作者所提出的公共场所人群聚集社会风险计算方法基本解决了这一问题。

通过三个步骤，就可以得到描述某一个特定公共场所社会风险的 $F-N$ 图。但是从计算过程中可以看到，现有的统计资料不易满足模型对数据的要求，所以对数据进行了修正，因此所列计算实例主要用于说明计算步骤，其特定的计算结果尚缺乏统计意义上的验证，仅供参考。

用条件概率的形式给出不同死亡人数事故的发生概率是作者提出的计算方法，计算模型的合理性

表 1 从 1902—2005 体育场馆重大事故灾害统计表
Table 1 Major accidents' statistics in stadium from 1902—2005

数量	年份	地点	国家	事故描述	受伤人数	死亡人数
1	1902	Ibrox	英国 UK	结构失效	512	26
2	1946	Boston	英国 UK	结构失效	500	33
3	1964	Maryland, Baltimore	美国 USA	拥挤	60	1
4	1964	Lima	秘鲁 Peru	惊慌拥挤	500	318
5	1967	Kayseri	土耳其 Turkey	惊慌	600	40
6	1968	Buenos Aires	阿根廷 Argentina	惊慌拥挤	200+	74 或 73
7	1971	Salvador	巴西 Brazil	惊慌	1 500	4
8	1971	Ibrox	UK	结构失效, 惊慌	140	66
9	1974	Cairo	埃及 Egypt	惊慌踩踏		49 或 48
10	1979		尼日利亚 Nigeria	惊慌踩踏	27	24
11	1981	Athens	埃及 Greece	惊慌踩踏		24
12	1981	Hillsborough	英国 UK	拥挤	38	
13	1982	Lenin, Moscow	前苏联 USSR	拥挤		340
14	1982	Cali	哥伦比亚 Columbia	惊慌踩踏	250	24
15	1985	Bradford	英国 UK	火灾	100+	56
16	1985	Mexico City	墨西哥 Mexico	拥挤	30	10
17	1985	Heysel	比利时 Brussels	结构失效, 拥挤	437	39
18	1988	Kathmandu	尼泊尔 Nepal	惊慌拥挤	700	10or93
19	1989	Hillsborough, Sheffield	英国 UK	拥挤	400+	95or96
20	1991	Orkney	南非 South Africa	拥挤	1 900	40
21	1992	Bastia	法国 Corsica	结构失效		10
22	1992	Maracana, Rio de Janeiro	巴西 Brazil	结构失效, 拥挤	50	0
23	1996	Guatemala City	危地马拉 Guatemala	惊慌	180	83
24	2000	Harare National Sports	南非 South Africa	惊慌拥挤	20	12
25	2000	Sao Januario	巴西 Brazil	惊慌拥挤	200	
26	2001	Eillis Park	南非 South Africa	拥挤	100	47
27	2001	Accra	加纳 Ghana	惊慌拥挤	277	126
28	2001	Akashi	日本 Japan	拥挤	120	10
29	2001	Mottaqi	伊朗 Iran	砸伤	250	15
30	2005	Ouagadougou	西非 West Africa	拥挤踩踏	15	2
31	2005	Antananarivo	马达加斯加 Madagascar	踩踏	47	2
32	2005	Chechen, Grozny	俄罗斯 Russian	爆炸	53	7
33	2005	Tehran	伊朗 Iran	踩踏	40	6
34	2005	Mogadishu	索马里 Somali	爆炸	8	27

表 2 引起大于或者等于 N 人死亡的所有事故的条件概率

Table 2 Conditional probability that brought about all of the accidents whose casualties were equal to or greater than N

死亡人数/人	事故发生次数 /次·a ⁻¹	事故总次数 /次·a ⁻¹	$P(B A)$
大于等于 1	0.31	0.34	0.91
大于等于 10	0.25	0.34	0.74
大于等于 100	0.03	0.34	0.09
大于等于 1 000	0	0.34	0

表 3 大于或者等于 N 人死亡的所有事故的累积频率 $F(N)$

Table 3 Cumulative probability that brought about all of the accidents whose casualties were equal to or greater than N

死亡人数/人	$P(B A)$	$P(A)$	$P(N)$
大于等于 1	0.91		1.34×10^{-5}
大于等于 10	0.74	1.47×10^{-5}	1.08×10^{-5}
大于等于 100	0.09		1.30×10^{-6}
大于等于 1 000	0		0

和可靠性还有待于进一步证实。此外，对于不同的统计时间跨度下计算出来的事故发生概率之间如何进行比较的问题，还需要进一步研究。

参考文献

- [1] Christou M D, Porter S. Guidance on land use planning as required by council directive 96/82/EC (SEVESO II) [S]. Institute for systems informatics and safety, 1999;21
- [2] 吴宗之,高进东,魏利军.工业危险评价方法及应用[M].北京:冶金工业出版社,2001;59~61
- [3] Lin Yuan-Shang. Estimations of the probability of fire occurrences in buildings[J]. Fire Safety Journal, 2005, 40:728~735
- [4] 邓永录.应用概率及其理论基础[M].北京:清华大学出版社,2005;62~63
- [5] <http://angel.elte.hu/~panic>, 2006-01-30/2006-04

Research on Social Risk of the Massing Crowd in Public Venues

Li Jianfeng, Liu Mao, Sui Xiaolin

(Nankai University Urban Public Safety Research Center, Tianjin 300071, China)

[Abstract] As the development of cities becomes more quick, the accidents happened in public venues resulted from massing crowd become more and more. This paper uses social risk to quantify the risk. On one hand, in terms of former research outcome, the paper deems that the occurrences of the accidents in public venues, in a time span, can be described as Poisson distribution, and then, the quantitative model of accident occurrence probabilities can be reasonable. On the other hand, through the sum of the occurrences of accidents of different severity level, which is to embody the situational probability of accidents of different severity level with its frequencies, the outcome of accidents mortalities will be obtained, which is used to figure out the probabilities of the accidents of different casualty numbers. In the end, the $F-N$ curve will be achieved. To use the $F-N$ curve, it is able to analyse the social risk of crowd massing venues. Taking some statistical accidents as references, it describes how to use the model. The result proves the model is reasonable and accurate to a certain extent.

[Key words] crowd massing risk; social risk; $F-N$ curve; quantitative risk analysis