

基于FTA-Petri网方法的 拥挤踩踏事件分析

赵义豪 刘英学

上海海事大学商船学院

【摘要】鉴于踩踏事件的突发性及其复杂性,应用FTA-Petri网的综合分析方法,建立集FTA评估和Petri网分析为一体的FTA-Petri网模型。首先利用FTA模型分析并确定导致麦加朝圣踩踏事件的人机环管等主要风险因素,然后,根据FTA因素分析确定对应的Petri网模型,最后利用综合分析方法的关联因素,计算得出麦加踩踏事件的因素关联矩阵,确定麦加朝圣踩踏事件的最小割集,并根据割集途径分析事故成因提出相应对策,为避免此类踩踏事件的发生作出了探索性研究,为拥挤踩踏事件的分析及预防提供新思路 and 途径。

【关键词】拥挤踩踏事件;FTA-Petri网分析;因素关联矩阵;最小割集

近些年来,随着经济的发展,人们生活质量不断提高,公共聚集场所的建设越来越完善,各种社会活动也越来越普及。这些活动聚集人群在带来经济效益的同时,也导致了一系列的公共安全问题,引起了各界人士的广泛关注^[1]。

拥挤踩踏事件因其突发性及破坏性,已经成为现在公共安全问题研究的热点之一。踩踏事件主要是因为是在有限的空间内公共场所人群流动的频度和密度较大,特别是在整个队伍产生拥挤移动时,在这种情况下如果产生突发原因,导致有人跌倒,极有可能会造成恶性的拥挤踩踏事件^[2]。

由于FTA和Petri网分析方法都存在一定的局限性,把FTA和Petri网分析综合运用起来,更有利于发挥这两种方法的优势,对事件进行分析可以得到更好的效果^[3],因此本文采用FTA-Petri网的安全分析

法,对拥挤踩踏事件进行分析。

1 理论简介

1.1 FTA分析

故障树分析(Fault Tree Analysis,简称FTA)是安全系统工程中常用的一种分析方法。故障树分析是一种演绎推理法,这种方法把系统可能发生的某种事件与导致事件发生的各种原因之间的逻辑关系用树形图表示,形象地进行事件的分析工作,特点是直观、逻辑性强,既可以做定性分析,又可以做定量分析^[4]。

通常,FTA将系统不希望发生的事件作为顶事件,逐级向下找出导致该事件发生的所有致因。然后采用相应的符号表示这些事件,再用描述事件间逻辑因果关系的逻辑门符号把顶事件、中间事件与底

事件连接成倒立的树状图形,用以表示系统特定顶事件与其各子系统或各元件的故障事件及其他有关因素之间的逻辑关系。

1.2 Petri网分析

Petri网是一种网状信息流模型,也是一种描述系统过程的图形演绎法,包括库所(place)和变迁(transition)两类节点,状态用库所表示,活动用变迁表示,变迁的作用是改变库所,库所的作用是决定变迁是否发生。变迁和库所这种相互关系用流关系表示。按照一定的规则使得事件状态发生改变,从而反映整个系统的动态运行过程。

通常,在Petri网图形中,用圆圈表示库所结点,用小长方形表示变迁结点,库所结点与变迁节点之间的有向弧表示流关系。Petri网能够刻画系统结构和系统的动态运行过程,适合于并发、异步、分步式系统分析的研究方法^[5]。

1.3 FTA-Petri方法

传统的FTA对于分析事件致因方面是强项,但应用于原因导致事件发生的可能性推测和动态描述是弱项。并且在实际分析中,对于复杂系统的故障树进行FTA分析时,计算量会非常大。而Petri网在判断事件成因方面有一定的局限性。若能将它们的优势结合起来,可以更好的适用于系统分析过程。

FTA-Petri网方法将顶事件作为顶库所,逐步将对应的故障树中的中间事件与底事件找出来作为中间库所和底库所。故障树中一般只含有与门和或门。可以将不同位置的与门和或门用不同的变迁替代。因此,可以很方便地用FTA-Petri网方法进行安全性分析。

2 踩踏事件分析

2.1 故障树模型

案例分析:

2015年9月25日,沙特阿拉伯麦加朝圣的朝觐者在参加一个宗教活动时发生拥挤踩踏事件。在此次麦加朝圣踩踏事件中至少造成769人死亡,934人受伤。在事故发生之后,调查发现,踩踏事件发生初始主要是由于一些老人在天气炎热以及人群拥挤的情况下中暑,后面不知情群众的渲染导致恐慌引发的

踩踏事件,而之后由于相关应急处置的不到位导致事故情景愈演愈烈,才造成了此次恶性踩踏事件。

事件尘埃落定之后经过相关部门调查分析事件成因,对导致麦加踩踏事件的成因和存在的潜在危险状态进行分析研究,发现此次恶性事件主要是由于人员、管理和环境因素的不协调导致此次拥挤踩踏事件的发生。为了维护公共安全,避免此类事件的发生,本文通过应用FTA-Petri综合分析方法,对麦加朝圣拥挤踩踏事件进行安全性分析。针对麦加朝圣踩踏事件,本文主要从人员和环境不协调因素方面进行分析,建立故障树模型^[6],如图1。图1中相应符号所表示的事件,见下表。

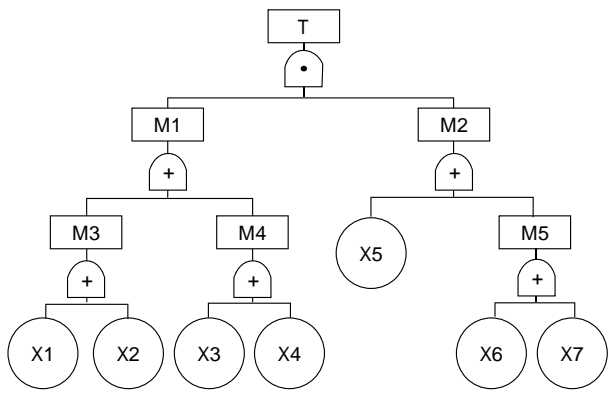


图1 麦加朝圣踩踏事件故障树

表 麦加朝圣踩踏故障树事件及相应Petri网库所符号说明

FTA符号	Petri网符号	事件名称
X1	P1	人流量大
X2	P2	安全意识缺乏
X3	P3	秩序管理缺乏
X4	P4	事件预案不足
X5	P5	天气因素
X6	P6	疏散标识不足
X7	P7	道路狭窄
M3	P8	人群因素
M4	P9	管理不善
M5	P10	基础设施
M1	P11	人的因素
M2	P12	环境因素
T	P13	踩踏事件
-	t	结点变化

2.2 Petri网模型

将图1中所示的麦加朝圣踩踏事件故障树模型用对应的Petri网模型表示,如图2。图2中相应符号所表示的库所,见上表。

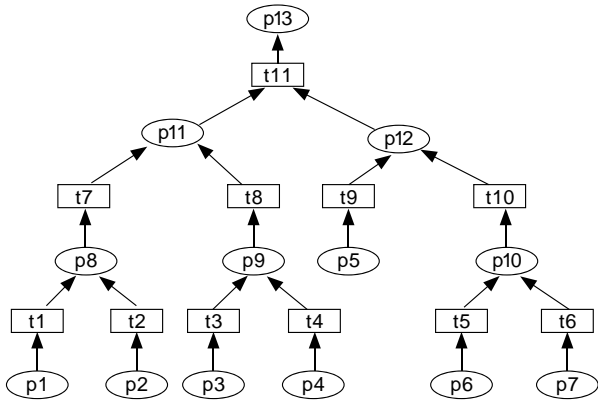


图2 麦加朝圣踩踏事件Petri网模型

在Petri网模型中,可以由以下的五个部分组成 $PN=(P, T, I, O, M_0)$, 这五个部分分别为:

P —有限库所的集合;

T —有限变迁的集合;

I —输入函数,方向由库所到变迁;

O —输出函数,方向由变迁到库所;

M_0 —Petri网内所有库所的初始状态。

Petri网可以用一个矩阵表示,即为Petri网的关联矩阵,若Petri网有 m 个库所和 n 个变迁 $P=(p_1, p_2, \dots, p_m)$ 、 $T=(t_1, t_2, \dots, t_n)$,则对应的关联矩阵就是一个 mn 矩阵,库所和变迁的下标即为矩阵元素的下标^[7]。其矩阵元素为 $a(p_i, t_j)=a(t_j, p_i)-a(p_i, t_j)$,可简写为:

$$(a_{ij})_{mn} = (a_{ij}^+)_{mn} - (a_{ij}^-)_{mn} \quad (1)$$

式中:

a_{ij}^+ —从变迁 t_j 到它的库所 p_i 的权重;

a_{ij}^- —从库所 p_i 到变迁 t_j 的权重。

因此可利用公式(1)求得图2中麦加朝圣踩踏事件Petri网模型的因素关联矩阵为:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 & t_8 & t_9 & t_{10} & t_{11} \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

3 模型分析

3.1 最小割集

根据以上的拥挤踩踏因素关联矩阵求最小割集^[8]:

(1)关联矩阵中,第13行只有1和0,所以,顶库所为 P_{13} ,由13行的1向上查找有两个-1,在第11和12行,对应为 P_{13} 的两个输入库所 P_{11} 和 P_{12} ,并且是相与关系 $P_{13}=P_{11} \times P_{12}$ 。

(2)搜索第12行,搜索到这一行中有两个1分别在第9列和第10列。

搜索第9列,搜索到有一个-1在第5行,搜索第5行,只有一个-1,说明对应的只有一个底库所 P_5 ;

搜索第10列,搜索到有一个-1在第10行,搜索第10行,搜索到这一行有两个1分别第5列和第6列,对应的是 P_{10} 的两个输入库所,相或关系。搜索第5列,搜索到有一个-1在第6行,搜索第6行,只有一个-1,说明对应的只有一个底库所 P_6 。

搜索第6列,搜索到有一个-1在第7行,搜索第7行,只有一个-1,说明对应的只有一个底库所 P_7 , $P_{10}=P_6+P_7$;

$$P_{10}=P_5+P_{10}=P_5+P_6+P_7$$

(3)搜索第11行,搜索到这一行中有两个1分别第7列和第8列。

$$\text{同理得 } P_{11}=P_8+P_9=P_1+P_2+P_3+P_4$$

(4)根据以上步骤可得:

$$\begin{aligned} P_{13} &= P_{11} \times P_{12} = (P_8+P_9) \times (P_5+P_{10}) \\ &= (P_1+P_2+P_3+P_4) \times (P_5+P_6+P_7) \end{aligned}$$

(5)用布尔代数化简法,求最小割集为^[9]: $\{P_1, P_5\}, \{P_1, P_6\}, \{P_1, P_7\}, \{P_1, P_5\}, \{P_2, P_6\}, \{P_2, P_7\}, \{P_3, P_5\}, \{P_3, P_6\}, \{P_3, P_7\}, \{P_4, P_5\}, \{P_4, P_6\}, \{P_4, P_7\}$

3.2 事故原因及其对策

(1)事故原因

通过上述模型分析可得:该模型最小割集总数为12个,也就是说导致麦加朝圣踩踏事件发生的途径有12种可能,总结麦加朝圣拥挤踩踏事件原因是由人和环境两方面因素发展的不协调引起的。通过笔者的分析和探讨可以从以下两方面来说明。

从人的因素来说:

麦加朝圣组织者秩序管理缺乏和应急预案不充

分是此次拥挤踩踏事件发生的重要影响因素；

朝觐人群聚集密集、流量大和群众安全意识的缺乏对紧急疏散工作造成很大压力。

从环境因素来说：

朝觐当天天气炎热部分人群中暑，导致连环踩踏；道路狭窄、标识不足等公共场所基础设施设置不合理。

(2) 对策措施

在故障树模型中顶上事件的发生，是在割集中基本事件均发生的情况下导致的。也就是说割集中任一基本事件不发生，顶上事件就不会发生。如果能使每个最小割集中至少有一个底事件发生概率极低，则潜在事故的发生概率就能降至最低，这同样适用于麦加踩踏事件因素关联矩阵所确定的割集之中。

通过FTA-Petri网的因素关联矩阵综合分析，对潜在危险状态进行分析研究，从人和环境两方面的不协调出发，对关联矩阵以及对应的割集因素分析，维护公共安全预防踩踏事故的发生可以从以下方面着手：

相关活动组织者要有防范于未然意识，建立良好的应急预案措施，定期组织工作人员进行突发应急演练，增强在紧急事件发生时的秩序管理能力，以便在事故发生时及时对人群进行疏导和分流；

公共场所，控制人流密度，提高公众安全意识，普及紧急情况下的安全防范措施；

公共场所基础设施的合理设置有助于降低事故的发生概率；

在活动策划之初需要考虑到客观条件天气因素的影响，防止不利的天气因素造成事故的发生。

4 结论

(1) FTA-Petri网分析方法克服了在复杂系统中

传统的故障树过程分析计算量大的局限，利用FTA-Petri网模型，建立事故关联矩阵，既发挥传统的FTA分析在确定事故成因方面的优势，又利用Petri网模型将故障树的各种逻辑连接关系简化，对于复杂事件更具有可操作性，极大地简化故障树分析中的计算。

(2) 以2015年麦加踩踏事件为例，针对拥挤踩踏环境中突发特征和众多不确定性因素，用FTA和Petri网结合的方法进行分析，为拥挤踩踏事件分析提供了一种新的思路和途径。拥挤踩踏事件的发生是一个复杂系统，其影响因素多而复杂。对拥挤踩踏事件的影响因素分析应更细化，更具有动态性，要尽可能多得对具体实际情景进行分析，相互之间的横向关系也应该被考虑到。有关拥挤踩踏事件的安全性研究还需在实践中不断完善。

参考文献

- [1] 任常兴,吴宗之,刘茂.城市公共场所人群拥挤踩踏事故分析[J].中国安全科学学报,2005,15(12):102-106,137
- [2] 单雪强,苏国锋.中小校园踩踏事故统计分析及应对措施研究[J].中国安全科学学报,2010,20(4):165-170
- [3] 何杰,张娣,张小辉,等.基于FTA-Petri网的地铁火灾事故安全性研究[J].中国安全科学学报,2009,19(10):77-82,177
- [4] 黄铃琳,吴金洪.城市轨道交通拥挤踩踏事件事故树分析[J].现代城市轨道交通,2012,(1):63-65
- [5] 邢军伟,刘剑.基于Petri网故障诊断及在工程机械中的应用[J].计算机工程与应用,2011,47(31):238-241
- [6] 杨艳丽,任伟,李新,等.校园踩踏事件事故树分析[J].安全与环境工程,2012,19(2):125-127,131
- [7] 赵熙临,周建中,刘辉.基于概率Petri网的故障诊断模型研究[J].计算机工程与应用,2008,(24):224-227
- [8] 于开民,孙时珍,张树团,等.一种基于Petri网的飞机配电系统可靠性分析方法[J].电子设计工程,2010,(10):133-135
- [9] 潘磷玲.最小割集与最小径集在事故树分析中的作用[J].安全与健康,2003,(19):31-33

好书推荐

“居民安全健康科普丛书”是北京市劳动保护科学研究所扎实落实有效推进首都全民科学素质工作深入开展，推动科普基地建设，强化科普场所开放，提升科学传播能力的产物。系列图书包含《PM2.5防护手册》、《室内环境与健康手册》、《居民突发事件应对手册》、《噪声污染防治手册》、《电磁应用防护手册》。

丛书围绕PM2.5、室内环境、应急与疏散、噪声、电磁等社会广泛关注的热点问题，引导公众用科学的方法来认识问题，提高公众的科学认知水平和科学生活能力。本套科普丛书力求以通俗易懂的语言，以图文并茂的形式向公众客观、科学地介绍PM2.5污染防治、室内环境的危害、面对突发事件的有效做法、噪声的危害与防治、以及正确地认识电磁等相关科学知识，希望能为公众了解、学习和主动参与预防安全事故、改善生活环境提供帮助。