

# 房间之间火灾蔓延过程的网络模型

游宇航, 李元洲, 霍 然

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

**[摘要]** 运用网络模型(networks)对火灾在房间之间的蔓延过程进行了分析;计算不同条件下火灾沿不同路径蔓延的概率和时间,找出其中危险的因素;通过加强安全措施,对火灾蔓延过程进行了有效的控制。结果表明,应用网络模型来分析火灾在房间之间的蔓延过程,可对于蔓延的可能性和危险性作出了较好的预测。

**[关键词]** 火灾蔓延;房间;网络模型;路径

**[中图分类号]** TK121, X93 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)07-0086-04

## 1 引言

火灾蔓延是造成火灾扩大的重要方面。研究火灾蔓延的机理和规律,对于有效防治火灾具有十分重要的意义。

研究火灾蔓延,主要有确定性模型和随机性模型两种。对于连续物体的火灾蔓延,运用确定性模型可以很好地进行描述。然而,对于火灾在房间之间的蔓延,由于存在很多不确定的因素,具有一定的随机性,所以可以使用随机性模型来进行预测。

网络模型是随机性模型的一种,它已受到人们的重视;并被多个学者用于解决火灾安全性的问题。Ling和Williamson<sup>[1,2]</sup>将网络模型应用于火灾蔓延过程之中,而且加入了时间参数。G. Ramachandran<sup>[3]</sup>也提到了网络模型应用于火灾蔓延过程的情况。Elms, Buchanan和Dusing<sup>[4]</sup>研究了火灾在房间之间蔓延的可能路径问题。

作者分析了网络模型的结构特点,并结合一个算例进行分析和计算,得出了火灾沿不同路径蔓延的概率与所需的时间,找出其中的危险因素,从而,可针对性地加强安全措施,改进该区域的火灾安全状况。

## 2 火灾蔓延的网络模型

火灾蔓延的网络模型是根据火灾蔓延的可能路径组合而成的。在分析过程中,首先了解建筑物的空间分布,比如说建筑物内各个房间或者走廊、过道的位置等,并将其各自看成一个节点(对于大房间或者长走廊等,可以根据实际需要看成多个节点),得到火灾蔓延过程的示意图。以相邻节点为研究对象,找出所有可能发生的火灾蔓延路径,建立火灾蔓延的网络模型,其中包括从起火地点蔓延到目标地点的所有可能路径组合。假定每条路径的火灾蔓延过程是独立的,将每种路径组合中所有路径的概率相乘和时间相加,就可以得出每种路径组合发生的概率和所需的时间。对计算得到的结果进行分析,找出其中危险的因素,有针对性地加强安全措施,一旦发生火灾,可对火灾的蔓延过程进行有效的控制。

考虑如图1所示的某层楼内几个房间之间的火灾蔓延情况:有3个房间( $R_1, R_2, R_3$ )和2个走廊过道( $C_1, C_2$ ),设房间 $R_1$ 为起火房间,考察火灾从房间 $R_1$ 蔓延到房间 $R_3$ 的情况;为简化问题起见,假设楼层之间只有门和走廊相通,其余

[收稿日期] 2004-07-22

[基金项目] 国家重点基础研究发展规划专项经费资助项目(2001CB409604)

[作者简介] 游宇航(1980-),男,重庆市人,中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室硕士研究生

均被普通墙和玻璃墙（房间  $R_2$  和房间  $R_3$  之间为玻璃墙）所阻隔，且在走廊上铺满了地毯。根据其空间分布，可以得到火灾蔓延过程的示意图（见图 2）。用  $R_1$  来表示房间着火，而用  $R'_1$  来表示火灾发展到一定程度而向外蔓延。

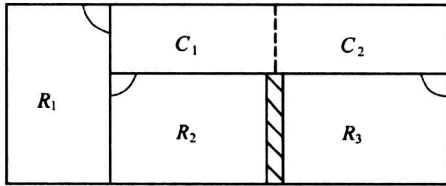


图 1 房间以及走廊的位置示意图  
Fig.1 The rooms and corridors' position

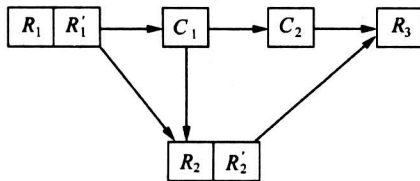


图 2 火灾蔓延过程的示意图  
Fig.2 The fire spread process

### 3 火灾蔓延网络模型的计算

根据火灾蔓延过程示意图，分析相邻节点之间的火灾蔓延路径，得到火灾蔓延的网络模型。在火灾蔓延网络模型中，相邻节点之间可能存在多条火灾蔓延路径，而且每一条路径都有各自发生的概率和所需时间。例如，当火灾将要蔓延出房间  $R_1$  到走廊  $C_1$  时，在房间  $R_1$  和走廊  $C_1$  之间的门的开关状态对火灾蔓延的概率以及所花的时间有很大的影响。作一个简化的假设：门的开、关几率各是 0.5。当门敞开时，可以认为火灾经过此门蔓延至走廊  $C_1$  的时间为 0；当门是关着的时候，可以假定在火发展到可以向外蔓延时，需要经过 10 min 才能把门烧坏从房间  $R_1$  中蔓延出来。由此，得到的火灾蔓延的网络模型如图 3 所示。其中， $l_1$  代表火在房间  $R_1$  中燃烧发展到可以向外蔓延的情况， $l_2$  代表火经过开着的门从房间  $R_1$  蔓延到走廊  $C_1$ ， $l_3$  代表火烧坏关着的门从房间  $R_1$  蔓延到走廊  $C_1$ ， $l_4$  代表火从走廊  $C_1$  蔓延到走廊  $C_2$ ， $l_5$  代表火经过开着的门从走廊  $C_2$  蔓延到房间  $R_3$ ， $l_6$  代表火烧坏关着的门从走廊  $C_2$  蔓延到房间  $R_3$ ， $l_7$  代表火烧坏了墙从房间  $R_1$  蔓延到房间  $R_2$ ， $l_8$  代

表火经过开着的门从走廊  $C_1$  蔓延到房间  $R_2$ ， $l_9$  代表火烧坏关着的门从走廊  $C_1$  蔓延到房间  $R_2$ ， $l_{10}$  代表火在房间  $R_2$  中燃烧发展到可以向外蔓延的情况， $l_{11}$  代表火烧坏了玻璃墙从房间  $R_2$  蔓延到房间  $R_3$  的情况。由此可以看出，整个火灾的发展过程一共只有 4 个主要的事件：a. 火在房间里的燃烧发展；b. 火经过门（门可能是开着的，也可能是关着的）的蔓延；c. 火在走廊里的蔓延；d. 火烧坏墙的蔓延。

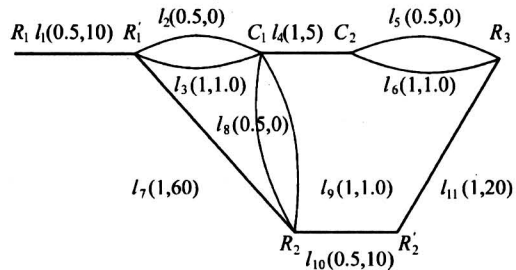


图 3 火灾蔓延的网络模型  
Fig.3 The network model of fire spread

确定了每一条路径发生的概率和所用的时间，就可以计算出各种火灾蔓延过程发生的概率和需要的时间。每一条路径发生的概率和所需要的时间，可根据实际情况和相关的文献进行了合理的假设。对于火在房间里的燃烧，假设有 0.5 的概率火可以发展到具有向外蔓延的能力，需要的时间是 10 min；火经过开着的门的蔓延时间为 0，设门可能开着的概率是 0.5；而火经过关着的门时，10 min 之后可以把门烧坏，此时火一定会蔓延出去，概率设为 1。对于火在走廊里的蔓延，因为假定了地面铺满了地毯，所以可以认为火一定会从走廊  $C_1$  蔓延到走廊  $C_2$ ，即发生的概率为 1，所用的时间设为 5 min。最后火突破房间边界的蔓延，指的是火烧坏墙和玻璃墙的蔓延。在没有达到耐火极限的情况下，火是无法蔓延的。在达到了耐火极限后，可以认为墙失效，火通过墙蔓延，其概率定为 1。对于普通的墙，其耐火极限可设为 60 min。对于普通的玻璃墙，其耐火极限可设为 20 min。这几种主要的火灾发展过程中的事件的数据列于表 1 中。

在考虑火灾从房间  $R_1$  蔓延到房间  $R_3$  这一事件时，可以根据图 3 找出所有可能的路径组合，如表 2 所示。这里共有 9 种路径组合。对于第一种路径组合，由路径  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_4$  和  $l_5$  组成。具体地可

**表1 火灾发展过程中事件发生的概率和所需的时间**

Table 1 The probability and time of event in fire process

火灾发展的事件	发生的概率	时间/min
火在房间里燃烧发展到向外蔓延	0.5	10
火经过开着的门的蔓延	0.5	0
火烧坏关着的门的蔓延	1	10
火在走廊里的蔓延	1	5
火烧坏墙的蔓延	1	60
火烧坏玻璃墙的蔓延	1	20

以这样描述：当火在房间  $R_1$  中发展到可以向外蔓延时，火从房间  $R_1$  中经过开着的门蔓延进入走廊

$C_1$ ，然后从走廊  $C_1$  蔓延至走廊  $C_2$ ，最后通过开着的门蔓延到房间  $R_3$ 。其余的路径组合也可以进行类似的解释。根据表2，路径组合1发生的概率只有0.125，它依赖于火在房间  $R_1$  中发展的概率0.5、房间  $R_1$  的门是开着的概率0.5、火从走廊  $C_1$  蔓延到走廊  $C_2$  的概率1和房间  $R_3$  的门是开着的概率0.5。总的蔓延时间为15 min，其中火在房间  $R_1$  中发展的时间10 min，火经过房间  $R_1$  开着的门蔓延至走廊0 min，火由走廊  $C_1$  蔓延至走廊  $C_2$  5 min，火经过开着的门蔓延至房间  $R_3$  0 min。由此可见，在整个火灾蔓延过程中门是其中一个很重要的因素。

**表2 火灾从房间  $R_1$  蔓延至房间  $R_3$  可能路径组合**

Table 2 The possible paths for fire spread from room 1 to room 3

路径组合的标号	路径的组成	发生的概率	所用的时间/min
1	$l_1-l_2-l_4-l_5$	$0.5 \times 0.5 \times 1 \times 0.5 = 0.125$	$10 + 0 + 5 + 0 = 15$
2	$l_1-l_2-l_4-l_6$	$0.5 \times 0.5 \times 1 \times 1 = 0.25$	$10 + 0 + 5 + 10 = 25$
3	$l_1-l_3-l_4-l_5$	$0.5 \times 1 \times 1 \times 0.5 = 0.25$	$10 + 10 + 5 + 0 = 25$
4	$l_1-l_3-l_4-l_6$	$0.5 \times 1 \times 1 \times 1 = 0.5$	$10 + 10 + 5 + 10 = 35$
5	$l_1-l_2-l_8-l_{10}-l_{11}$	$0.5 \times 0.5 \times 0.5 \times 0.5 \times 1 = 0.063$	$10 + 0 + 0 + 10 + 20 = 40$
6	$l_1-l_2-l_9-l_{10}-l_{11}$	$0.5 \times 0.5 \times 1 \times 0.5 \times 1 = 0.125$	$10 + 0 + 10 + 10 + 20 = 50$
7	$l_1-l_3-l_8-l_{10}-l_{11}$	$0.5 \times 1 \times 0.5 \times 0.5 \times 1 = 0.125$	$10 + 10 + 0 + 10 + 20 = 50$
8	$l_1-l_3-l_9-l_{10}-l_{11}$	$0.5 \times 1 \times 1 \times 0.5 \times 1 = 0.25$	$10 + 10 + 10 + 10 + 20 = 60$
9	$l_1-l_7-l_{10}-l_{11}$	$0.5 \times 1 \times 0.5 \times 1 = 0.25$	$10 + 60 + 10 + 20 = 100$

为了有效控制火灾的蔓延，需要加强安全措施。因为普通门的耐火时间太短，且不会自动关闭，所以可以换成自动关闭的防火门。设它的失灵概率为0.1，其耐火极限采用乙级钢制防火门的标准为54 min。在防火门正常工作的情况下，火需要经过54 min才能使防火门失效而开始蔓延。换成防火门后，火灾发展过程中各事件发生的概率和所需的时间列于表3。火灾从房间  $R_1$  蔓延到房间  $R_4$  的各种路径组合的数据列于表4。由此可以看

**表3 防火门下火灾发展过程中事件发生的概率和所需的时间**

Table 3 The probability and time of event in fire growth process under fireproofing door

火灾发展的事件	发生的概率	时间/min
火在房间里燃烧发展到向外蔓延	0.5	10
火经过失灵的防火门的蔓延	0.1	0
火使防火门失效的蔓延	1	54
火在走廊里的蔓延	1	5
火烧坏墙的蔓延	1	60
火烧坏玻璃墙的蔓延	1	20

出，在采用了自动关闭的防火门这一消防措施之后，与门相关的各种路径组合发生火灾蔓延的概率大大减小了，或者所需的时间大大增加了。对于前述简化的情况来说，在使用了防火门之后，达到了有效控制火灾蔓延的目的。

#### 4 分析与讨论

用随机性模型来研究火灾，只是涉及到了火灾蔓延的一个方面。网络模型是随机性模型的一种，它是把房间（或者走廊）分隔为独立体来处理的。真正的火灾过程还有物体之间连续性的一面，比如说火灾蔓延过程中烟气的流动过程。这些在随机性模型中无法体现，确定性模型却可以很好地描述这一过程，还能计算出由于热烟气的流动引起火灾蔓延的时间，而这个时间恰好可以应用到随机性模型中去。实际上随机性模型中的概率和时间这两个参数，就把确定性模型（连续物体间的火灾蔓延）中的因素都概括了进来，因此这两个模型都可以从一个方面来描述火灾蔓延的过程。

表4 防火门下火灾从房间  $R_1$  蔓延至房间  $R_3$  可能路径组合

Table 4 The possible paths for spread from room 1 to room 3 under fireproofing door

路径组合的标号	路径的组成	发生的概率	所用的时间/min
1	$l_1-l_2-l_4-l_5$	$0.5 \times 0.1 \times 1 \times 0.1 = 0.005$	$10 + 0 + 5 + 0 = 15$
2	$l_1-l_2-l_4-l_6$	$0.5 \times 0.1 \times 1 \times 1 = 0.05$	$10 + 0 + 5 + 54 = 69$
3	$l_1-l_3-l_4-l_5$	$0.5 \times 1 \times 1 \times 0.1 = 0.05$	$10 + 54 + 5 + 0 = 69$
4	$l_1-l_3-l_4-l_6$	$0.5 \times 1 \times 1 \times 1 = 0.5$	$10 + 54 + 5 + 54 = 123$
5	$l_1-l_2-l_8-l_{10}-l_{11}$	$0.5 \times 0.1 \times 0.1 \times 0.5 \times 1 = 0.0025$	$10 + 0 + 0 + 10 + 20 = 40$
6	$l_1-l_2-l_9-l_{10}-l_{11}$	$0.5 \times 0.1 \times 1 \times 0.5 \times 1 = 0.025$	$10 + 0 + 54 + 10 + 20 = 94$
7	$l_1-l_3-l_8-l_{10}-l_{11}$	$0.5 \times 1 \times 0.1 \times 0.5 \times 1 = 0.025$	$10 + 54 + 0 + 10 + 20 = 94$
8	$l_1-l_3-l_9-l_{10}-l_{11}$	$0.5 \times 1 \times 1 \times 0.5 \times 1 = 0.25$	$10 + 54 + 10 + 10 + 20 = 104$
9	$l_1-l_7-l_{10}-l_{11}$	$0.5 \times 1 \times 0.5 \times 1 = 0.25$	$10 + 60 + 10 + 20 = 100$

从以上算例,可以清晰地看出网络模型是怎么解决火灾在不同房间之间的蔓延问题的。首先是要根据空间分布得到火灾蔓延过程的示意图;然后分析相邻节点之间可能的火灾蔓延路径确定出火灾蔓延的网络模型;最后计算出不同的路径组合发生的概率和所需的时间,找出其中危险的因素,通过加强安全措施来控制火灾蔓延过程。每一条路径具体数据必须通过大量统计数据 and 实验数据才能得到。

网络模型在研究火灾在不同房间之间的蔓延情况时,显得十分的方便。它的计算量也不大,关键是要得到正确反映实际火灾的网络模型。相邻节点之间火灾蔓延路径的多少以及选择的情况,需要根据实际情况而定,比如说门、窗、通风管道等,这些都可能成为火灾蔓延的路径。因此,在分析实际情况时,必须十分仔细,以免漏掉一些危险的、容易被忽视的火灾蔓延路径。只有这样,才能得到更加接近于实际火灾的网络模型,以达到解决实际问题的目的。当然,具体情况不同,分析后得到的网络模型也是不同的。

## 5 结论

对网络模型应用于火灾蔓延进行了初步的研究,

主要考虑了火灾在房间之间的蔓延过程。在普通门条件下,计算与比较了火灾沿不同路径蔓延的概率和所需的时间,找出其中危险的因素。通过加强消防措施,把普通门换成自动关闭的防火门,达到有效控制火灾蔓延的目的。因此,在分析火灾在房间之间的蔓延问题时,网络模型能对蔓延的可能性和危险性作出较好的预测,实为行之有效的办法。

### 参考文献

- [1] Ling W-C T and Williamson R B. Modeling of fire spread through probabilistic networks[J]. Fire Safety Journal, 1985, 9:287~300
- [2] Ling W-C T and Williamson R B. Using fire tests for quantitative risk analysis [A]. in Castino G T, Harmathy T Z, Eds. Fire Risk Assessment. Special Publication STP 762 [C]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1982
- [3] Ramachandran G. Stochastic models of fire growth. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, section 3, 2nd ed [M]. USA: National Fire Protection Association, 1995. 296~311
- [4] Elms D G, Buchanan A H, Dusing J W. Modeling fire spread in buildings[J]. Fire Technol, 1984, 20(1):11~19

## The Networks Analysis of Fire Spread among the Rooms

You Yuhang, Li Yuanzhou, Huo Ran

(The State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026, China)

[Abstract] This paper introduces the Networks model to analyze the process of fire spread among the rooms. It finds out the dangerous factor through calculating the probability and time of different fire spread path under different conditions. The process of fire spread can be controlled effectively by strengthening the safety precautions. Results indicate the Networks model can predict the possibility and hazard of fire spread among the rooms.

[Key words] fire spread; among the rooms; the Networks model; path