

一种模拟疏散流程的疏散时间计算方法

祝佳琰, 张和平

(中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

[摘要] 在工程实际中, 通过人员安全疏散所需要的时间与人员安全疏散可用的时间进行比较来判断建筑的疏散设施能否满足突发情况下人员安全疏散的要求。将建筑的疏散设施抽象成网络的节点, 从而将人员在建筑中的疏散流程简化成节点的串联系统模型, 并联系统模型或者是串、并联系统组成的复杂模型, 并给出了计算的方法。

[关键词] 人员疏散; 疏散设施; 串联模型; 并联模型

[中图分类号] TU998 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)08-0073-04

前言

现代建筑设计贯彻以人为本的理念, 主要的安全目标是保证建筑内人员的安全, 即在发生突发事件时首先要确保人员安全疏散。当前出现的结构新颖, 内部功能越来越复杂化和综合化的超大规模建筑往往突破了现有建筑、消防等规范中关于人员疏散设施的相关规定。作者提出通过将人员安全疏散所需要的时间与人员安全疏散可用的时间进行比较, 对建筑疏散设计的合理性进行评价的方案。如果人员安全疏散需要的时间小于人员安全疏散可用的时间, 可以认为建筑的疏散设计是合适的; 反之, 则要求对疏散设施进行整改。人员安全疏散可用的时间是指从危险状况发生并发展到对人员生命构成危害所经历的时间, 该时间可根据突发事件的实际情况得到。人员安全疏散需要的时间是指建筑内的人员疏散到安全区域所需要的时间, 该时间与建筑的结构以及人员的行为特征有关。计算得到的人员安全疏散所需要的时间是进行安全评价的重要依据。

作者基于人员疏散网络模型, 提出了一种进行人员安全疏散流程分析以及人员安全疏散所需时间

预测的方法。这种方法将建筑的疏散设施抽象成网络的节点, 从而将人员在建筑中的疏散流程简化成节点的串联系统模型, 并联系统模型或者是串、并联系统组成的复杂模型, 能在一定程度上反映人员疏散的过程。

1 基本假设

在实际逃生过程中, 人员安全疏散需要的时间包含疏散开始时间和疏散运动时间^[1]。疏散开始时间是指从危险发生到开始疏散的时间, 一般与报警系统、危险发生场所、人员相对位置、疏散人员状态、建筑物形状、管理状况及疏散诱导手段等因素有关。疏散运动时间是指疏散开始至疏散结束的时间。作者的计算仅针对疏散运动时间并以如下的假设为基础^[1]:

a. 疏散开始前, 建筑单元中人员根据建筑的不同功能以不同的密度分布; b. 疏散过程中, 人群的流量与疏散通道的宽度成正比分配; c. 所有人员从每个可用的疏散出口疏散, 并主动选择最近的疏散设施疏散; d. 所有人员在突发事件发生后同时疏散, 且疏散路线连续, 中途不退回; e. 所有人员通过走廊、门厅等水平通道的速度一致且始

[收稿日期] 2005-04-08

[基金项目] 科技奥运资助项目(2001BA904B10)

[作者简介] 祝佳琰(1981-), 女, 江苏无锡市人, 中国科学技术大学研究生

始终保持不变；f. 所有人员都具有足够的身体条件疏散到安全区域，且疏散人员全部具有相同的特征，疏散能力，疏散运动速度一致。

2 模型

计算建筑内人员安全疏散需要的时间存在2种方法：一是将整个疏散时间作为一个整体，等于人员在疏散区域运动的时间和人流通过疏散出口的时间之和。另一种将整个疏散分为2类，即当待疏散人数较少时，疏散时间由疏散的最远距离决定；当待疏散人数很多，在疏散出口造成拥塞时，疏散时间由通过出口的最长时间决定^[2]。作者采用后一种方法。

2.1 单元体

图1所示的单元体是最简单的建筑结构。e为疏散出口，图1b为图1a简化结构。人员在平地疏散区域内运动，疏散时间 $t = \frac{L}{v}$ 。人流通过疏散出口一般会发生拥塞，疏散时间 $t = \frac{p}{e \cdot w}$ 。单元体人员安全疏散需要的时间等于人员通过疏散出口的时间与距离疏散出口最远的人员到达疏散出口的时间中的最长时间，即：

$$t_e = \max\left(\frac{L}{v}, \frac{p}{e \cdot w}\right)^{[3]}$$

其中 L 是距离疏散出口的最远距离 (m)， v 是人员运动的速度 (m/s)， p 是待疏散的人数 (人)， e 是疏散出口的疏散能力 (人/ms)， w 是疏散出口的有效宽度 (m)。

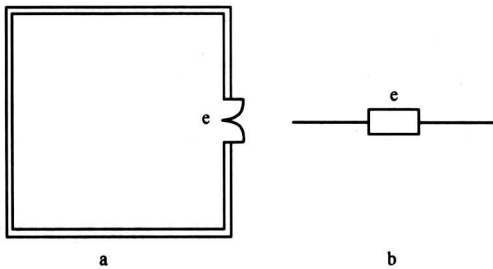


图1 单元体及简化图

Fig.1 Simplified unit

2.2 并联系统

如图2所示的建筑结构 (图2b为图2a的简化)，一个单元房间有多个疏散出口。可以看出这是一个疏散出口相互并联的系统。当疏散出口处未发生拥塞，即 $p \leq e \cdot w$ 时，距离疏散出口最远处

到达疏散出口的时间决定了人员安全疏散需要的时间；当疏散出口处发生拥塞，即 $p > e \cdot w$ 时，人流通过疏散出口的时间决定了人员安全疏散需要的时间。即：

$$t_e = \begin{cases} \max\left(\frac{L_1}{v}, \frac{L_2}{v}, \frac{L_3}{v}\right) & p \leq e \cdot w \\ \max\left(\frac{p}{e_1 \cdot w_1}, \frac{p}{e_2 \cdot w_2}, \frac{p}{e_3 \cdot w_3}\right) & p > e \cdot w \end{cases}$$

依此类推，当一个房间有 n 个疏散出口可供同时疏散，即有 n 个疏散出口相互并联时，人员安全疏散需要的时间可以表示为

$$t_e = \begin{cases} \max\left(\frac{L_1}{v}, \frac{L_i}{v}, \frac{L_n}{v}\right) & p \leq e \cdot w \\ \max\left(\frac{p}{e_1 \cdot w_1}, \frac{p}{e_i \cdot w_i}, \frac{p}{e_n \cdot w_n}\right) & p > e \cdot w \end{cases}$$

其中， L_1, L_2, L_3, L_i, L_n 分别是距离疏散出口 1, 2, 3, i, n 的最远距离 (m)； w_1, w_2, w_3, w_i, w_n 分别是疏散出口 1, 2, 3, i, n 的有效疏散宽度 (m)； e_1, e_2, e_3, e_i, e_n 分别是疏散出口 1, 2, 3, i, n 的疏散能力 (人/ms)； p 是单位时间内房间流出的人数 (人/m)。

可见，在并联系统中，疏散时间最长的节点对整个系统的疏散时间有重要的影响。

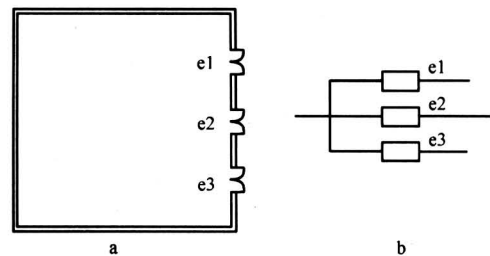


图2 并联系统及简化图

Fig.2 Shunt-wound unit

2.3 串联系统

如图3所示的建筑结构 (图3b为图3a的简化)。位于最终房间的人员依次通过多个疏散出口才可到达安全区域。可以看出这是一个疏散出口相互串联的系统。房间1人员安全疏散需要的时间同单元体人员安全疏散需要的时间，即：

$$t_{1e} = \max\left(\frac{L_1}{v}, \frac{p_1}{e_1 \cdot w_1}\right)$$

房间2的疏散分2部分完成^[3]：第一，房间2的人员离开房间2，即： $t_{21} = \max\left(\frac{L_2}{v}, \frac{p_2}{e_2 \cdot w_2}\right)$ ；第二，

房间 1 的人员流入房间 2，当疏散出口 2 处未发生堵塞，即 $\dot{p}_2 \leq e \cdot w$ 时，距离疏散出口最远处到达疏散出口的时间决定了疏散完成时间，即 $t_{22} = \frac{L_2}{v}$ ；当疏散出口处发生堵塞，即 $\dot{p}_2 > e \cdot w$ 时，人

流通过疏散出口的时间决定了疏散完成时间，即 $t_{22} = \frac{(\dot{p}_1 - \dot{p}_2) t_{21} + p_{20}}{e_2 \cdot w_2}$ 。房间 2 人员安全疏散需要的时间为：

$$t_{2e} = \begin{cases} t_{21} = \max\left(\frac{L_2}{v}, \frac{p_2}{e_2 \cdot w_2}\right) \\ t_{22} = \begin{cases} \frac{L_2}{v} & \dot{p}_2 \leq e_2 \cdot w_2 \\ \frac{(\dot{p}_1 - \dot{p}_2) \cdot t_{21} + p_{20}}{e_2 \cdot w_2} & \dot{p}_2 > e_2 \cdot w_2 \end{cases} \end{cases}$$

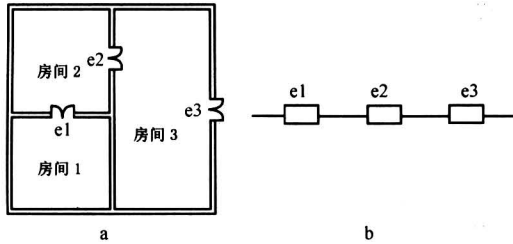


图 3 串联系统及简化图

Fig.3 Series-wound unit

房间 3 的疏散情况与房间 2 相同，房间 3 人员安全疏散需要的时间为：

$$t_{3e} = \begin{cases} t_{31} = \max\left(\frac{L_3}{v}, \frac{p_3}{e_3 \cdot w_3}\right) \\ t_{32} = \begin{cases} \frac{L_3}{v} & \dot{p}_3 \leq e_3 \cdot w_3 \\ \frac{(\dot{p}_2 - \dot{p}_3) \cdot t_{31} + p_{30}}{e_3 \cdot w_3} & \dot{p}_3 > e_3 \cdot w_3 \end{cases} \end{cases}$$

依此类推，当最终的房间要通过 n 个疏散出口才可以到达安全区域，即有 n 个疏散出口相互串联时，人员安全疏散需要的时间可以表示为：

$$t_e = \begin{cases} t_{n1} = \max\left(\frac{L_n}{v}, \frac{p_n}{e_n \cdot w_n}\right) \\ t_{n2} = \begin{cases} \frac{L_n}{v} & \dot{p}_n \leq e_n \cdot w_n \\ \frac{(\dot{p}_{n-1} - \dot{p}_n) \cdot t_{n1} + p_{n0}}{e_n \cdot w_n} & \dot{p}_n > e_n \cdot w_n \end{cases} \end{cases}$$

其中， p_{20}, p_{30}, p_{n0} 是房间 2、3、 n 的初始人数； p_1, p_2, p_3, p_n 是房间 1、2、3、 n 待疏散的人数； $\dot{p}_1, \dot{p}_2, \dot{p}_3, \dot{p}_{n-1}, \dot{p}_n$ 是单位时间内从房间

1、2、3、 $n-1$ 、 n 流出的人数。

可见，在串联系统中，最后一个节点的疏散时间对整个系统的疏散时间有重要的影响。

3 实例

以下给出 2 个在实际建筑中常见的结构，结合上述计算模型，对建筑中人员疏散的流程进行分析，并给出计算人员安全疏散所需时间的方法。

3.1 复杂系统一

如图 4 所示的建筑结构（图 4b 为图 4a 的简化），最终房间 1 可以通过疏散出口 2 经由房间 2，通过疏散出口 3，再由房间 3 的疏散出口 4、5、6 疏散到安全区域；或者可以通过疏散出口 1 进入房间 3 后，从房间 3 的疏散出口 4、5、6 疏散到安全区域。设疏散时人员同时向疏散出口运动，可以看出这是一个多个疏散出口组成的串、并联的复杂系统，即 e_2, e_3 串联后与 e_1 并联， e_{123} 与 e_4, e_5, e_6 组成的并联系统串联。根据上述模型，系统的疏散完成时间取决于 e_{456} (e_4, e_5, e_6 组成并联系统的时间)，而 e_{456} 的时间是 e_4, e_5, e_6 中最长的疏散时间。由此可见，该复杂系统的疏散流程分析为：

$$t_{1-6} = t_{456} \rightarrow t_{456} = \max(t_4, t_5, t_6) \rightarrow t = \begin{cases} \max\left(\frac{L_4}{v}, \frac{L_5}{v}, \frac{L_6}{v}\right) & \dot{p}_3 \leq e \cdot w \\ \max\left(\frac{p_3}{e_4 \cdot w_4}, \frac{p_3}{e_5 \cdot w_5}, \frac{p_3}{e_6 \cdot w_6}\right) & \dot{p}_3 > e \cdot w \end{cases}$$

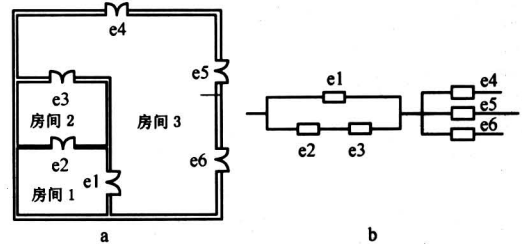


图 4 复杂系统 1 及简化图

Fig.4 Build-up system 1

3.2 复杂系统二

如图 5 所示的建筑结构（图 5b 为图 5a 的简化），第三层有 4 个房间，房间 1、2、3、4 的人员公用疏散楼梯 $sw32$ 和 $sw21$ 。设疏散时人员同时向疏散出口运动，可以看出这也是一个多个疏散出口组成的串、并联的系统，即 e_1, e_2, e_3, e_4 组成的并联系统与 $sw32, sw21$ 串联。根据上述模型，

系统的疏散完成时间取决于 sw_{21} 疏散时间。楼梯多为有该层人员和上层人员流入, 人流再向下层疏散的结构^[5], 作者在计算中将流入楼梯的人数视为一个整体。由此可见, 该复杂系统的疏散流程分析为:

$$t = t_{sw21} \rightarrow t_{sw21} = \begin{cases} t_{sw211} = \max\left(\frac{L_{21}}{v}, \frac{P_{21}}{e_{21} \cdot w_{21}}\right) \\ t_{sw212} = \begin{cases} \frac{L_{21}}{v} & \dot{p}_{21} \leq e_{21} \cdot w_{21} \\ \frac{(\dot{sw}_{32} - \dot{sw}_{21}) \cdot t_{sw211} + P_{210}}{e_{21} \cdot w_{21}} & \dot{p}_{21} > e_{21} \cdot w_{21} \end{cases} \end{cases}$$

其中, p_{210} 是楼梯 21 的初始人数, p_{21} 是楼梯 21 中待疏散的人数, L_{21} 是楼梯 21 的长度, sw_{32} , sw_{21} 是单位时间内从楼梯 32, 楼梯 21 内流出的人数。

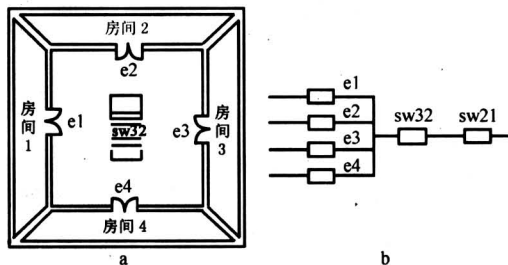


图 5 复杂系统 2 及简化图

Fig.5 Build-up system 2

4 结论

将建筑的疏散设施抽象成网络的节点, 从而将建筑中的疏散过程简化成节点的串联系统模型, 并联系统模型或者是串、并联系统组成的复杂模型, 并给出了计算的方法。

1) 将最简单的单门单室建筑结构简化成单元体, 其人员安全疏散需要的时间为

$$t_e = \max\left(\frac{L}{v}, \frac{P}{e \cdot w}\right)$$

2) 将有 n 个疏散出口的单室建筑结构简化成并联系统, 系统人员安全疏散需要的时间取决于系统中疏散时间最长的节点。

$$t_e = \begin{cases} \max\left(\frac{L_1}{v}, \frac{L_i}{v}, \frac{L_n}{v}\right) & \dot{p} \leq e \cdot w \\ \max\left(\frac{P}{e_1 \cdot w_1}, \frac{P}{e_i \cdot w_i}, \frac{P}{e_n \cdot w_n}\right) & \dot{p} > e \cdot w \end{cases}$$

3) 将需通过 n 个疏散出口的建筑结构简化成串联系统, 系统人员安全疏散需要的时间取决于系统最后一个节点的疏散时间。

$$t_e = \begin{cases} t_{n1} = \max\left(\frac{L_n}{v}, \frac{P_n}{e_n \cdot w_n}\right) \\ t_{n2} = \begin{cases} \frac{L_n}{v} & \dot{p}_n \leq e_n \cdot w_n \\ \frac{(\dot{p}_{n-1} - \dot{p}_n) \cdot t_{n1} + P_{n0}}{e_n \cdot w_n} & \dot{p}_n > e_n \cdot w_n \end{cases} \end{cases}$$

这种计算方法可对人员安全疏散需要的时间进行估算, 对人员疏散过程进行预测分析。

参考文献

- [1] 袁理明, 范维澄. 建筑火灾中人员安全疏散时间的预测[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(2): 28~33
- [2] 霍然, 袁宏永. 性能化建筑防火分析与设计[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2003
- [3] 陈智明, 霍然, 王国栋. 建筑内人员疏散的一种网络模型算法的讨论[J]. 火灾科学, 2004, 13(2): 90~94
- [4] Pauls J. Effective width model for crowd evacuation flow on stairs [A]. Vol 1 6th International Fire Protection Seminar[C]. Karlsruhe West Germany, 1982

An Algorithm of Evacuation Time Which Simulates the Evacuation Course

Zhu Jiayan, Zhang Heping

(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027, China)

[Abstract] In practice, if available safety egress time is longer than required safety egress time, people can evacuate the building in urgency successfully. In this paper, the evacuation facilities such as doors were abstracted as units of the net, and the evacuation course was simplified as series-wound net, shunt-wound net or their built-up system. The expressions of the algorithms for the four different systems were presented.

[Key words] evacuation arithmetic; room unit; series-wound model; shunt-wound model