

# 机械排烟条件下建筑火灾烟流特性预测

王厚华, 赵 喆

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 阐述了基于网络模型的建筑物火灾烟流特性预测系统的研究背景, 发掘了相关技术中存在的主要问题并作出改进. 在原有的烟气流动网络模型基础上, 对装有送风机或排风机的开口计算式进行改进, 利用拟合出的计算式代替原有的负质量源计算式, 实现网络模型装有机械排烟系统时烟流特性的联立求解. 对重庆大学自主开发的烟气流动模拟软件进行改进后, 可以实现建筑物在机械排烟时的火灾烟流特性模拟.

**关键词:** 火灾; 网络模型; 烟流特性

**中图分类号:** TU 998.12

**文献标识码:** A

## Prediction of Smoke-flow Property in Fire Building Using Mechanical Smoke Extraction

WANG Houhua, ZHAO Zhe

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The research background of smoke-flow property prediction system in fire building based on the network model was expounded. Then a major problem of concerned technology was found and solved. Based on the original network-model of building fire smoke-flow, the expressions related to opening installing ventilator were amended. The new expressions replaced the original negative-mass expressions, and a solvable algebra equation set was obtained. Fire smoke-flow property was calculated by the algebra equations set. Predicting software developed independently by Chongqing University for fire smoke-flow property of high building was modified. As a result, smoke-flow property in fire building using mechanical smoke extraction can be simulated.

**Key words:** fire; network model; smoke-flow property

目前国内的建筑防火设计一般按照现行的规范和设计手册依据防烟分区的面积计算排烟量, 这种“处方式”的防火设计方法已经无法满足人们对建筑安全性和经济型的要求. 而性能化设计方法是建立在消防安全工程学基础上的一种新的建筑防火设计方法. 这种方法根据建筑物的结构、用途、人员载荷和内部可燃物等具体情况, 对建筑物的火灾危险性和危害性进行定量的预测和评估, 从而得出最优化的防火设计方案.

在建筑防火的性能化研究中, 运用计算机对建筑火灾的烟气流动特性进行模拟尤其重要. 严治军<sup>[1-3]</sup>对日本网络模型进行重大改进, 并且在国内首次建立了比较完整的建筑物火灾烟气流动网络模型. 随后王厚华等<sup>[4]</sup>在严治军模型的基础上对网络模型进行了线性化改造, 在此基础上成功开发了《建筑物火灾烟流特性预测系统》软件, 该软件已经历了多次实验验证<sup>[5]</sup>并申请了国家专利. 谢元一等<sup>[6]</sup>解决了软件中计算剧烈波动问题, 并研究了具有送排风情况下的走廊型建筑的烟流性状. 何晟<sup>[7]</sup>将非稳态火源模型引入烟流软件中, 使软件的模拟工况更复合实际. 郭丹等<sup>[8]</sup>研究了火灾情况下的人员安全疏散问题, 并开发了《高层建筑人员疏散行动时间预测系统》软件. 熊杰等<sup>[9]</sup>将烟流软件和疏散软件相结合, 提出了多功能建筑物火灾安全性能评价的思想, 实现了对建筑物各节点人员疏散的动态模拟和安全评价.

软件经过众多研究者的改进已经日趋完善, 但在机械排烟情况下软件将机械排烟量作为负质量源输入计算的方法<sup>[5-6]</sup>明显存在以下问题: ① 该方法并没有考虑到质量变化引起的压差变化, 而压差既决定了其他节点的质量流量, 又会影响风机的排风量; ② 排烟系统工作时, 每个排烟口的排烟量(负质量源)作为初始已知参数输入软件计算, 既不符合排烟

收稿日期: 2011-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178481)

第一作者: 王厚华(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为建筑防排烟、建筑节能及强化传热.

E-mail: whhxinxiang@yahoo.com.cn

量随压差变化的关系,也不利于排烟系统的性能化设计.基于以上分析,本文利用拟合出的  $p=f(Q)$  计算式(式中,  $p$  为开口压差,  $Q$  为开口体积流量)代替原有的负质量源计算式,实现网络模型的联立求解,提高了求解精度,并实现了多功能建筑物具有多风机、多风口的火灾烟流特性模拟.

## 1 求解方法

### 1.1 原计算方程中存在问题

按照网络模型的方法,将建筑物的各个房间和各个楼梯间作为节点,楼梯并用各层楼面分割成不同节点,走廊型通道按面积近似与房间相等划分成节点,各节点之间的开口称为枝.根据图论原理将建筑物转化为节点和枝构成的建筑物换气树,得出换气回路接续矩阵  $I$  和闭环矩阵  $L$ . 设建筑物内有  $m$  个节点和  $n$  个枝,可建立  $m$  个线性无关的代数方程式,则节点质量平衡方程式可用矩阵表示为

$$I\Delta M = M \quad (1)$$

式中:  $I$  为  $m$  行  $n$  列的换气回路接续矩阵,为  $\Delta M$  的系数矩阵,建筑物换气树建立后,  $I$  即为已知矩阵;  $\Delta M$  为  $n$  行的开口净质量流量列矩阵,为待求矩阵;  $M$  为  $m$  行的质量发生速率列矩阵,为常数矩阵.

由建筑物换气树可以形成  $n-m$  个闭合环路.环路压力平衡关系式是利用任何闭合环路上的节点间的压差代数和为零建立的线性无关方程组.其矩阵形式为

$$L(p + p_s) = 0 \quad (2)$$

式中:  $L$  为  $n-m$  行  $n$  列矩阵,为已知矩阵;  $p$  为开口压差,为待求矩阵;  $p_s$  为浮力和室外风力产生的压力源,根据初始条件可算出;  $0$  为  $n-m$  行的  $0$  列矩阵.

自然排烟情况下,换气树中有  $n$  个枝,每个枝都可得出一个开口压差  $p$  和开口质量流量  $m$  的线性关系式<sup>[4]</sup>,这里不过多阐述.

在机械排烟情况下,原有算法将排烟风机排出的风量看作是一个稳定的负质量流量,即式(1)中矩阵  $M$  按下式计算:

$$M_i = M_{\text{comb},i} + M_{\text{sup},i} \quad (3)$$

式中:  $M_i$  为  $i$  室的质量发生速率;  $M_{\text{comb},i}$  为  $i$  室的燃烧速率;  $M_{\text{sup},i}$  为  $i$  室的通风(排烟)速率,排风(烟)时取负号,即为负质量源.

这样计算可将机械排烟模型理想化,但是没有考虑质量流量变化引起的开口间的压差变化,而压差的变化将影响风机的排风量,即质量流量的变化.

这种理想化模型适用于风机和风口数量较少的情况,当其数量增多时难免会造成误差的进一步加大.本文为解决此问题对原求解方法做出以下修改.

修改原来的负质量源关系式,即使  $M_i$  等于  $M_{\text{comb},i}$ ,然后在有风机的开口(枝)上拟合出  $p=f(Q)$  的线性关系式,然后完成联立求解.

### 1.2 在单风口情况下的求解方法

当开口(枝)上装有排烟风机,并且火灾时只打开一个排风口时,这时生成换气树的开口(枝)的方向从房间指向室外,根据环路压力平衡式可以得出下式:

$$P_i = P_e - H \quad (4)$$

式中:  $P_i$  为  $i$  枝上的开口压差,当室内节点压力高于室外时为正值;  $P_e$  为枝  $i$  上的总阻力,包括沿程阻力和局部阻力;  $H$  为排风机的风机压头.

通常风机压头可以根据风机样本参数拟合合成与排风(烟)量  $Q$  相关的二次多项式,并根据相似律对系数进行修正,可以得到

$$H = C_2 Q^2 + C_1 Q + C_0 \quad (5)$$

枝上的管路总阻力  $P_e$  可由下式计算:

$$P_e = S Q^2 \quad (6)$$

式中  $S$  为管路阻抗,计算公式为

$$S = \frac{(\lambda \frac{l}{d_e} + \sum \zeta) \rho}{2A^2} \quad (7)$$

式中:  $\lambda$  为摩擦阻力系数;  $l$  为管路长度;  $d_e$  为管路的当量直径;  $\sum \zeta$  为局部阻力系数之和;  $\rho$  为管道中气流密度;  $A$  为管道截面的面积.

由式(7)可以看出,  $S$  在初始条件给定下可以直接算出.因此由式(4),(5),(6)可得出开口(枝)上压差与排烟量的关系式为

$$P_i = (S - C_2) Q^2 - C_1 Q - C_0 \quad (8)$$

取时间步长为  $\Delta\tau$ ,按泰勒级数展开,忽略2阶以上无穷小,把式(8)线性化

$$P_{n+1} = [2(S - C_2)Q_n - C_1]Q_{n+1} + P_n - [2(S - C_2)Q_n - C_1]Q_n \quad (9)$$

式中:  $P_n, P_{n+1}$  分别为  $n\Delta\tau$  时刻和  $(n+1)\Delta\tau$  时刻的开口压差;  $Q_n, Q_{n+1}$  分别为  $n\Delta\tau$  时刻和  $(n+1)\Delta\tau$  时刻的开口体积流量.

这样计算  $(n+1)\Delta\tau$  时刻的  $P_{n+1}, Q_{n+1}$  时,  $n\Delta\tau$  时刻的  $P_n, Q_n$  就作为已知数据,所以  $P_{n+1}$  与  $Q_{n+1}$  呈线性关系.当  $\Delta\tau$  取得足够小,式(9)计算的误差是可以忽略的.

当开口(枝)上装有送风机时,建筑物换气树生成的开口(枝)的方向仍是从房间指向室外,这样开

口压差  $P_i$  在室内节点压力高于室外时为正值,根据环路压力平衡式可以得出下式:

$$P_i = H - P_e \quad (10)$$

送风情况下,体积流量方向与开口方向相反,所以  $Q$  为负值,则压头和体积分量的关系式为

$$H = C_2 Q^2 - C_1 Q + C_0 \quad (11)$$

相同方法亦可求出送风情况下的线性方程式

$$P_{n+1} = [2(C_2 - S)Q_n - C_1]Q_{n+1} + P_n - [2(C_2 - S)Q_n - C_1]Q_n \quad (12)$$

### 1.3 在多风口情况下的求解方法

当开口(枝)上装有排烟风机,并且火灾时打开两个排风(烟)口,这时生成换气树的开口(枝)的方向从房间指向室外,图 1 为这种情况下的简单示意图。

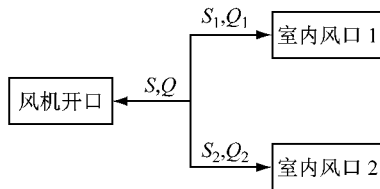


图 1 两个风口情况下的开口(枝)示意图

Fig.1 Opening schematic diagram when two air ports are working

如图 1 所示,这时主管道上的风量为  $Q$ ,为分管道 1 和 2 上的风量  $Q_1$  和  $Q_2$  之和,主管道上的管路阻抗为  $S$ ,分管道上的管路阻抗为  $S_1$  和  $S_2$ . 这时根据环路压力平衡式可得出下式:

$$P_1 = S Q^2 + S_1 Q_1^2 - H \quad (13)$$

式中  $P_1$  为室内风口 1 与室外的开口压差,且室内节点压力高于室外时为正值。

根据管路的平衡可以得出

$$S_1 Q_1^2 = S_2 Q_2^2 \quad (14)$$

然后可以得出主管道风量  $Q$  和支管  $Q_1$  的关系式

$$Q = \left(1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\right) Q_1 \quad (15)$$

将式(15)带回到式(13)中可得出

$$P_1 = \left[ (S - C_2) \left(1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\right)^2 + S_1 \right] Q_1 - C_1 \left(1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\right) Q_1 - C_0 \quad (16)$$

按泰勒级数展开,忽略 2 阶以上无穷小,可将式(16)线性化为

$$P_{n+1} = \left\{ 2 \left[ (S - C_2) \left(1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\right)^2 + S_1 \right] Q_n - \right.$$

$$\left. C_1 \left(1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\right) \right\} Q_{n+1} -$$

$$\left\{ 2 \left[ (S - C_2) \left(1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\right)^2 + S_1 \right] Q_n - \right.$$

$$\left. C_1 \left(1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\right) \right\} Q_n + P_n \quad (17)$$

同样方法亦可求出管道 2 上的关系式. 如果开口(枝)上装的是送风机时,这时生成换气树的开口(枝)的方向从房间指向室外,这时根据环路压力平衡式可以得出下式:

$$P_1 = H - S Q^2 - S_1 Q_1^2 \quad (18)$$

式中  $P_1$  为室内风口 1 与室外的开口压差,且室内节点压力高于室外时为正值。

利用相同的步骤,可以整理送风情况下节点压差和体积分量的线性关系式为

$$P_{n+1} = \left\{ 2 \left[ (C_2 - S) \left(1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\right)^2 - S_1 \right] Q_n - \right.$$

$$\left. C_1 \left(1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\right) \right\} Q_{n+1} -$$

$$\left\{ 2 \left[ (C_2 - S) \left(1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\right)^2 - S_1 \right] Q_n - \right.$$

$$\left. C_1 \left(1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\right) \right\} Q_n + P_n \quad (19)$$

以上是两个风口的情况,假设有  $m$  个风口并联时,利用管路的平衡关系式可得出总风量  $Q$  和支管  $i$  上风量  $Q_i$  的关系式

$$Q = \sum_{1 \leq j \leq m} \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} Q_i \quad (20)$$

然后利用相同的方法求出排烟风机支路上的线性关系式为

$$P_{n+1} = \left\{ 2 \left[ (S - C_2) \left( \sum_{1 \leq j \leq m} \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right)^2 + S_i \right] Q_n - \right.$$

$$\left. C_1 \left( \sum_{1 \leq j \leq m} \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right) \right\} Q_{n+1} -$$

$$\left\{ 2 \left[ (S - C_2) \left( \sum_{1 \leq j \leq m} \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right)^2 + S_i \right] Q_n - \right.$$

$$\left. C_1 \left( \sum_{1 \leq j \leq m} \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right) \right\} Q_n + P_n \quad (21)$$

送风机支路上的线性关系式为

$$P_{n+1} = \left\{ 2 \left[ (C_2 - S) \left( \sum_{1 \leq j \leq m} \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right)^2 - S_i \right] Q_n - \right.$$

$$\begin{aligned}
 & C_1 \left( \sum_{1 \leq i \leq m} \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right) \left\{ Q_{n+1} - \right. \\
 & \left. 2 \left[ (C_2 - S) \left( \sum_{1 \leq i \leq m} \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right)^2 - S_i \right] Q_n - \right. \\
 & \left. C_1 \left( \sum_{1 \leq i \leq m} \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right) \right\} Q_n + P_n \quad (22)
 \end{aligned}$$

至此,多风机、多风口情况下开口(枝)上的压差和体积流量关系式已经全部求出,通过已知密度对体积流量和质量流量进行换算,即可得开口(枝)上的压差和质量流量的关系式.如果节点总数为  $m$  (不包括室外空气节点),开口(枝)总数为  $n$ ,则得到质量平衡方程式为  $m$  个,压力平衡方程式为  $n-m$  个,每个开口都可得出一个压差与流量的线性方程,则有  $n$  个压差与流量的线性方程,可以组成  $2n$  个线性无关的代数方程组.开口两端压差和开口流量组成的  $2n$  个未知数个数刚好等于方程总数,联立求解后可得所有开口两端压差和开口质量流量.

## 2 算例分析

算例为某综合教学楼建筑,该建筑为 5 层,取第 1 层进行模拟.建筑 1 层平面图如图 2 所示.运用图论原理,根据网络模型方法,即可生成换气树,如图 3 所示.计算时间步长为 5 s,计算时间 1 200 s,共 240 步,各计算所用初始参数见文献[10].

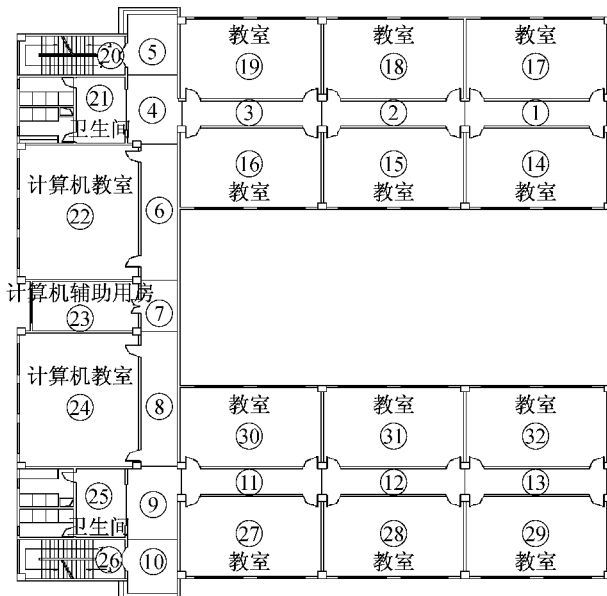


图 2 模拟建筑平面图

Fig. 2 The plan of the simulated construction

根据建筑物的特点,分别在节点 2,3,6,8,11,12 处设置排烟口.考虑到排烟分区的面积大小及其扬

程,决定选取浙江上虞市育才风机厂制造的型号为 HTFC(A)-I-18 的排烟风机,机型的具体参数如表 1 所示.

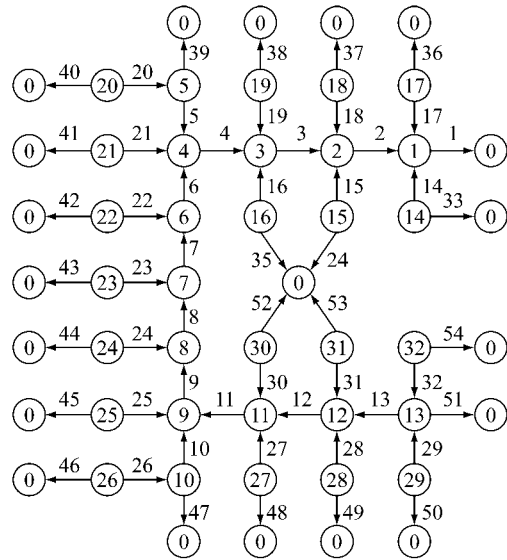


图 3 建筑物网络换气树

Fig. 3 Building air flow tree

表 1 选取风机的参数

Tab. 1 Parameters of selected ventilator

机号	转速/ (r · min <sup>-1</sup> )	风量/ (m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	风压/ Pa	功率/ kW	噪声/ dB(A)
18	600	6 519	276	2.2	66
		7 648	266		
		8 778	260		

模拟场景发生火灾时,设 23 号房间节点着火.假设火灾时火源热释放速率为 290 kW · m<sup>-2</sup>[11],为非稳态火源,热释放速率以  $t^2$  火灾形式增长,火灾蔓延速度取中等水平,火灾发展系数为 0.011 7 kJ · s<sup>-3</sup>,则最大热释放速率为 9 200 kW.先在自然排烟情况下进行模拟,然后用修改过后的烟流性状软件对建筑在机械排烟情况下进行模拟,最后根据新算法得到的模拟结果中的机械排烟量来确定一个固定的机械排烟量,将此排烟量作为负质量源输入,用负质量源法进行模拟计算(此做法便于两种方法的比较).在机械排烟情况下设节点 6,8 的排烟口打开,其余排烟口均关闭.从计算结果中可得到各个时刻的房间温度、烟气浓度、CO<sub>2</sub> 浓度、CO 浓度和各节点间的质量流量等多种火灾参数.取节点 5 数据进行分析,因为 5 号节点为楼梯前室,人员容易在此节点形成拥堵,所以此节点为安全疏散的关键节点.图 4 和图 5 分别为 5 号节点在 3 种模拟情况下的温度曲线和烟气浓度曲线.另外还可以得到 6 号排烟节点

与室外的质量流量,通过质量流量可以得到该排烟节点的瞬时机械排烟量,如图 6.

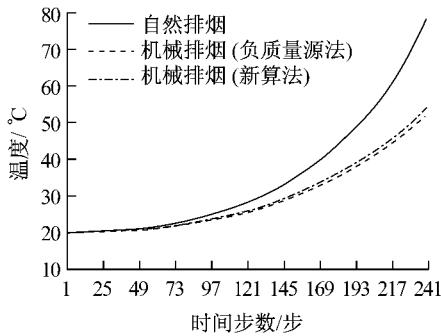


图 4 节点 5 的温度对比曲线

Fig.4 Comparison of NO.5 node temperatures

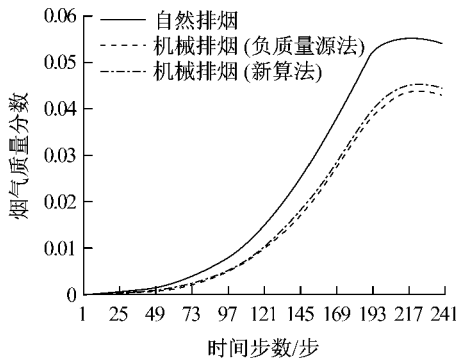


图 5 节点 5 的烟气质量分数对比曲线

Fig.5 Comparison of NO.5 node smoke concentration

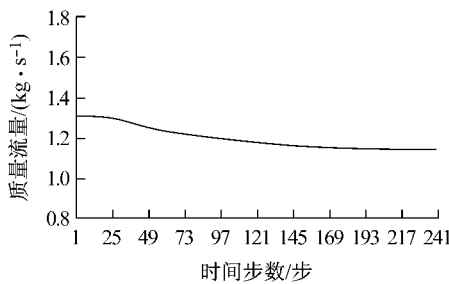


图 6 节点 6 与室外的烟气质量流量曲线

Fig.6 Mass flow of smoke at NO.6 node and the outdoor

从图 4,5 中可以看出机械排烟对火灾的控制起到非常明显的效果.第 3 种模拟条件中固定负质量源的输入数值是根据第 2 种模拟条件得到结果的第 25 步时质量流量输入的(有利于两种算法的比较).在图 4,5 中可以看出用改进后的软件计算的结果和负质量源法计算的结果相比差别很小,这是因为本次模拟条件中负质量源算法的恒定风量是根据新算法时风机稳定工作时的风量确定的.但是在实际工程中,先根据相关规范按照防烟分区的面积来确定风量,然后选取风机,如果用负质量源法模拟计算的

话,由于无法知道所选风机稳定工作时的排风量,所以设定的恒定排风量会和风机实际工作的排风量有所差距,模拟也不能如实地反映火灾建筑的情况.而在实际工程中,新算法在选取风机进行模拟后,可以看出风机工作时各个时间点的工作状态,也可以看出是否在高效区工作,还可如实地反映在所选风机情况下的火灾建筑情况,根据模拟结果可以看出所选风机是否合适.由此可见新算法更接近实际情况,可以得到更精确的模拟结果.

将负质量源算法与新算法在 5 号节点的温度相对差距制成表格,由于火灾初期差别较小,表格从 121 步开始统计,如表 2 所示.从表中可以看出新算法和负质量源算法计算的结果差距很小,而且两者的差距随着火灾的发展有逐渐增大的趋势.这是因为负质量源的固定值是按照新算法计算的第 25 步时的质量流量输入的.而从图 6 可以看出,新算法的排风量随着火灾的发展有所下降,这是由于室内负压增大,排烟风机的效率有所下降的缘故.模拟结果和两种算法模拟的机械排烟量产生的效果相符.

表 2 两种算法模拟的温度数据比较

Tab.2 Comparison of temperatures simulated by two methods

时间步数/步	121	145	169	193	217	241
相对差距	1.96	2.43	3.03	3.17	3.37	3.85

利用改进后的软件还可以在前期研究的基础上进行火灾人员安全疏散和最佳机械排烟量的进一步研究,这些研究将在今后进行.

### 3 结论

本文总结了近年来重庆大学对火灾烟流特性预测问题所进行的一系列研究,并从中发现了问题.在前期研究的理论基础上,对发现的问题进行了深入研究,并取得了以下成果:

- (1) 修改了原软件采用的负质量源法,采用线性化方法,在装有风机的开口(枝)上拟合出  $p = f(Q)$  计算式,然后进行网络模型的联立求解,从而得到了机械排烟条件下的新算法.
- (2) 新算法克服了负质量源法需要事先设定排烟量且排烟量与压差无关的算法缺陷.
- (3) 负质量源算法需要输入预先设定的排风量,新算法只需输入风机各项参数即可模拟,可得到风机的瞬时工作情况,模拟结果也更精确.
- (4) 新算法可以用来分析优选送、排风口的最

佳布置位置和满足人员安全疏散条件的送、排风量等问题. 计算结果可由软件直接输出, 可实现建筑物送、排风系统的性能化设计.

### 参考文献:

- [1] 严治军. 火灾建筑的室温预测法[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, 18(3):1.  
YAN Zhijun. Prediction method of fire building room temperature[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1996, 18(3):1.
- [2] 严治军. 建筑物火灾烟气流动性状解析[J]. 重庆建筑大学学报, 1995, 17(2):23.  
YAN Zhijun. Analytical solution of building fire smoke-flow property[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1995, 17(2):23.
- [3] 严治军. 火灾建筑的热传导解析[J]. 重庆建筑大学学报, 1997, 19(5):107.  
YAN Zhijun. Analytical solution of fire building heat conduction [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1997, 19(5): 107.
- [4] 王厚华, 罗嘉陵, 罗庆, 等. 建筑物火灾烟气流动网络模型的线性化求解方法[J]. 暖通空调, 2003, 33(5):101.  
WANG Houhua, LUO Jialing, LUO Qing, et al. Method of linear expressions for network model of fire smoke flow in buildings[J]. Journal of H V & A C, 2003, 33(5):101.
- [5] 罗庆. 建筑物火灾烟气流动性状实验研究及其预测软件的完善[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2002.  
LUO Qing. Experimental research on properties of fire smoke flow in building and modification of the application software[D]. Chongqing: Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering of Chongqing University, 2002.
- [6] 谢元一, 王厚华. 建筑物走廊型通道中火灾烟气流动特性的研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(1):88.  
XIE Yuanyi, WANG Houhua. Study on properties of fire smoke flow in building's corridor[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(1):88.
- [7] 何晟. 非稳态火源在火灾网络模型中的应用及其烟控系统性能化设计研究[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2006.  
HE Sheng. On application of instable fire to network model of fire and the performance-based design on the smoke control system[D]. Chongqing: Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering of Chongqing University, 2006.
- [8] 王厚华, 郭丹, 郭勇. 建筑物人员疏散行动时间的预测研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(11):54.  
WANG Houhua, GUO Dan, GUO Yong. Research on the prediction of evacuation action time for personnel in building [J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(11):54.
- [9] 王厚华, 李慧, 熊杰. 多功能建筑火灾人员安全疏散模拟[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(8):1141.  
WANG Houhua, LI Hui, XIONG Jie. Simulation of safety evacuation in multi-building fire [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(8):1141.
- [10] 李慧. 基于人员安全疏散的多节点排烟在火灾网络模型中的应用[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2009.  
LI Hui. Research on application of multi-node smoke exhaust-based safety evacuation [D]. Chongqing: Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering of Chongqing University, 2009.
- [11] Fang J B, Breese J N. Fire develop in residential basement rooms[R]. NBSIR, 2002.