

研究报告

大尺度空间中烟气运动工程分析的多单元区域模拟方法

胡隆华, 霍然, 李元洲, 王浩波

(中国科技大学火灾科学国家重点实验室 合肥 230027)

[摘要] 在大尺度空间中, 仍然将整个空间划分上部热烟气层和下部的冷空气层直接进行区域模拟是不合适的。提出了一种将大尺度空间划分若干常规子单元, 再在各个子单元中采用上下层区域模拟的方法, 并以 CFAST4.02 为工具, 对两种典型的大尺度空间的烟气运动过程进行分析和比较。结果表明, 在大尺度空间中, 这种多单元区域模拟的方法相比于传统的区域模拟方法具有较好的适用性。

[关键词] 大尺度空间; 烟气运动; 多单元区域模拟; 区域模拟

[中图分类号] TU998.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)08-0059-05

1 前言

随着建筑业的迅速发展, 具有内部大尺度空间的建筑纷纷涌现。这些大尺度空间一般都超过了现有的“处方式”火灾安全规范的适用范围, 因此, 需要对这类大尺度空间进行火灾安全的工程分析。统计结果表明, 烟气是火灾中导致人员死亡的最主要因素, 对火灾烟气运动的预测理所当然地成为火灾安全工程分析的一个重要方面^[1,2]

区域模拟是在实际火灾烟气运动工程分析中经常采用的一种重要的方法^[3]。如图1所示, 基于室内火灾烟气发展中常见的分层现象, 传统的火灾发展区域模拟方法将室内空间分为上部的热烟气层和下部的冷空气层两部分, 并假设上下层的热参数均匀分布。通过建立羽流卷吸模型来进行上下层质量和能量运输的分析, 进而对火灾发展过程中的烟气层的沉降和上下层平均温度的发展进行计算^[4]。

研究表明, 着火区域内烟气分层与否, 与房间内烟气层和空气层的 Froude 数有关, 在小的 Froude 数状态下, 烟气呈分层状态^[5]。对于火灾中烟气层—空气层分层结构, Froude 数定义为:

$$F_r = \left[\frac{\rho_s \Delta U^2}{g \Delta \rho Z_s} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中, F_r 为 Froude 数; ρ_s 为上部烟气层的平均密度; $\Delta \rho$ 为上部烟气层与下部空气层的平均密度之差; ΔU 为上部烟气层与下部空气层的平均速度之差; g 为重力加速度; Z_s 为烟气层平均厚度。

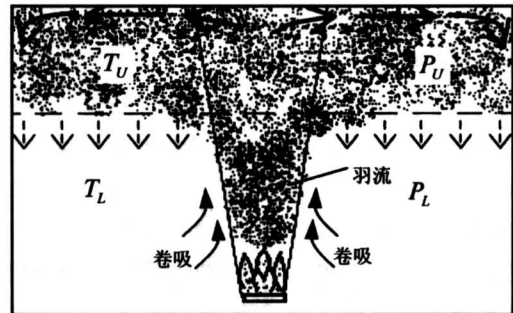


图1 常规尺寸空间内的火灾烟气分层现象

Fig.1 Schematic of smoke layer formed in normal sized room fire

在常规空间中, ΔU 很小, $\Delta \rho$ 较大, Froude 数比较小, 烟气的分层现象比较明显, 因此, 传统

[收稿日期] 2003-03-06

[基金项目] 国家“十五”科技攻关资助项目(2001BA803B); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2001CB409604)

[作者简介] 胡隆华(1979-), 男, 湖南衡阳市人, 中国科技大学火灾科学国家重点实验室硕士研究生

的区域模拟方法在模拟常规尺寸空间火灾烟气层沉降方面显示了良好的效果。

然而在大尺度空间中，一方面，上部烟气上升和向两侧扩散的时间较长，和周围的低温空气进行热传递比较充分，温度下降较大；另一方面，上层烟气在扩散过程中，自身也会与下层空气发展一定的传质过程，虽然这种传质过程可能本身比较微弱，但空间一大，时间一长，所带来的总体效果也是不可忽视的。以上两个方面的作用效果必然将导致 $\Delta\rho$ 值随着烟气的沿顶棚的向外扩散而减低，当

$\Delta\rho$ 降低到一定值时，Froude 数已比较大，烟气将不再表现这种分层结构。同时，从浮力的角度考虑，当上部烟气在蔓延过程中温度下降到一定值时，空气浮力将无法再维持上部烟气上升和向外扩展的趋势，在自身重力的作用下而沉降。这样，在大尺度空间火灾中，在远离火源的区域必然难以形成像常规尺寸房间火灾中那样具有一致高度的稳定热烟气层^[3]，如图 2 所示。这时，如果还是采用传统的单一双层区域模拟的方法，显然得不到理想的结果。

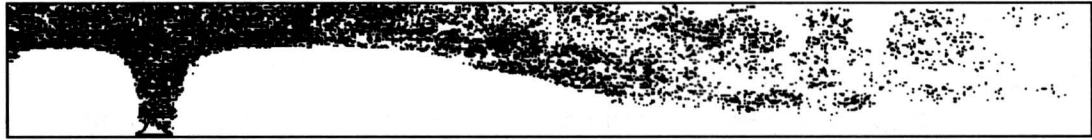


图 2 大尺度空间的烟气运动现象

Fig. 2 Smoke movement in large scale spaces

作者对传统的区域模拟方法进行了改进，提出了一种多单元区域模拟的方法，用于对大尺寸空间的火灾烟气发展过程进行工程分析，并以 CFAST4.02 为工具，在狭长型空间和扁平大空间这两种典型的大尺度空间中，应用多单元区域模拟的方法，对其火灾烟气运动过程进行了分析，并与传统的单一双层区域模拟结果进行了对比。

2 多单元区域模拟方法

多单元区域模拟方法将整个大空间划分为若干常规尺寸子单元，再在每个子单元中采用区域模拟的方法；对于相邻子单元的烟气输运，则采用常规的应用于房间开口处的烟气溢流模型进行描述。

CFAST4.02 是目前国际上较为成熟的用于模拟单室和多室火灾烟气发展的工具之一^[6]。前人的研究表明，在工程模拟计算所需要的精度内，CFAST4.02 的多室火灾模型在预测多室火灾的发展过程上表现出与全尺寸实验结果比较好的一致性。多单元区域模拟方法是通过 CFAST4.02 软件包中的多室火灾烟气发展模型初步实现的。

图 3 所示为 CFAST4.02 多室火灾烟气发展模拟的简图。在 CFAST4.02 的多室火灾模拟中，将通过相邻房间垂直开口的水平流动描述如下

根据流动的伯努利方程，对垂直开口处的热烟气流动，有：

$$\frac{P_{U1}}{\rho} + \frac{v_{U1}^2}{2} = \frac{P_{U2}}{\rho} + \frac{v_{U1 \rightarrow U2}^2}{2} \quad (2)$$

各个房间内部的热烟气的流速可近似为 0，即式 (2) 中的 v_{U1} 等于 0，对于任意无穷小高度，则有

$$v_{U1 \rightarrow U2} = C \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中，常数 C 为流通系数， ρ 为流出烟气的密度， ΔP 为垂直开口任意无穷小高度两侧烟气的平均压差。

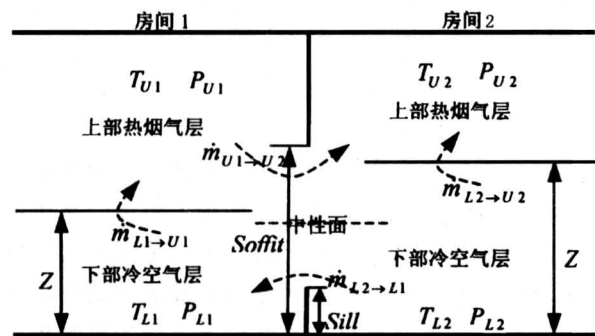


图 3 CFAST4.02 多室烟气运动模型简图

Fig.3 Schematic of multi-room fire model of CFAST4.02

在 CFAST4.02 中，并没有将开口高度分隔为很多的无穷小高度之和，而是根据开口上下缘、中性面和烟气层的位置将之划分为若干个有限高度之和，对于每一个有限高度两侧烟气的流动，是通过下面的式子进行计算的：

$$\dot{m}_{i_o} = \frac{1}{3}(8\rho)A_h \left[\frac{|P_t| + \sqrt{|P_t \cdot P_b|} + |P_b|}{\sqrt{|P_t|} + \sqrt{P_b}} \right] \quad (4)$$

式中， A_h 为任意有限高度所占有的竖直开口面积， P_t 和 P_b 则分别为该有限高度上缘和下缘处的压力差；将所划分的各有限高度两侧的烟气流量相加，则可得到总的通过该竖直开口的烟气流量。

若在 CFAST4.02 的多室模型中，将相邻空间竖直开口的宽度和上下缘距离地面的高度（即图 3 中的 Soffit 和 Sill）分别设置为空间的宽度、空间顶棚的高度和 0，则可实现对大尺度空间的子单元划分并利用 CFAST4.02 原有的开口烟气溢流模型

来初步模拟相邻子单元之间的烟气输运。传统双层区域模型则选用 CFAST4.02 中的单室烟气模型。

3 狭长型空间的多单元区域模拟分析

所谓狭长型空间就是具有常规的高度和宽度而长度很大的空间，如机场航站楼夹层、隧道等。在这里考虑一个长 360 m、宽 7.5 m、高 3.5 m 的狭长空间。在多单元区域模拟中，将该空间平均划分为如图 4 所示的长、宽尺寸较为接近的 29 个子单元。起火位置在整个空间的中央，设置火源为 t^2 增长型，最大火源功率 2 MW；在该狭长空间的一侧平均分布着 9 个 1.8 m × 2.2 m 的向外开口。

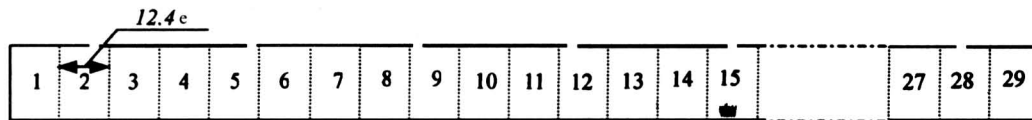


图 4 某狭长型空间的多单元划分

Fig.4 Cell divided for a long-narrow space

图 5 给出了分别采用多单元区域模拟方法和传统的单一区域模拟方法对上面的狭长型空间进行上层平均温度和烟气层沉降计算的结果。由于该狭长空间完全左右对称，故在多单元区域模拟中只列出第 1、4、7、10、13、15 子单元的计算结果。

从图 5 中上层平均温度发展过程的结果可以看出，在传统的单一区域模拟方法中，将整个空间的上层温度进行平均处理（约为 60℃ 左右），而没有考虑到由于大尺度空间所造成的远离火源区域和离火源较近区域的计算结果的差异；这对于 2 MW 的火源、3.5 m 高的空间来说，显然是不合理的。多单元区域模拟的结果则反映出了远火区域和近火区域的烟气温度的这种差异，在火源上方和在该狭长空间的最远端，这种温度的差异是很大的。这与实际情况是比较一致的。同样，烟气层沉降过程也是如此，由于两侧的烟气温度比中间区域的烟气温度要低很多，烟气层下降得当然要快一些，这在多单元区域模拟中得到较好的体现。

4 扁平大空间的多单元区域模拟分析

这里所说的扁平大空间指的是面积相对于高度而言很大的空间，如大型厂房、室内游乐园大厅等。在这里考虑一个长 150 m、宽 150 m、高 15 m 的扁平大空间。在多单元区域模拟中，将该空间平

均划分为如图 6 所示的 9 个子单元。起火位置在整个空间的中央，火源亦设置为 t^2 增长型，最大火源功率 10 MW；在区域 2 设有 1.8 m × 2.2 m 的向外开口。

图 7 给出了分别采用多单元区域模拟方法和传统的单一区域模拟方法对扁平大空间进行上层平均温度和烟气层沉降计算的结果。基于空间位置的对称性，在多单元区域模拟中只列出第 5、6、9 子单元的计算结果。

从图 7 的结果可以看出，离火源位置距离不同的区域，烟气层温度的发展和烟气层的沉降过程均存在一定的差异。相对于近火区域而言，远离火源的区域烟气层的温度较低、烟气层下降较快。采用多单元区域模拟的方法所得到的结果比单纯采用传统的区域模拟方法的结果要合理一些。

同时，若将采用多单元区域模拟方法在狭长型空间和扁平大空间中计算得到的结果进行对比，可以看出，相对于占地面积而言，空间长度对这种由于向外运动过程中的降温所导致的烟气层下沉的不一致性的影响要更明显。因此，这种多单元区域模拟方法更适用于在某个方向具有大尺度空间的火灾烟气运动过程的工程分析。

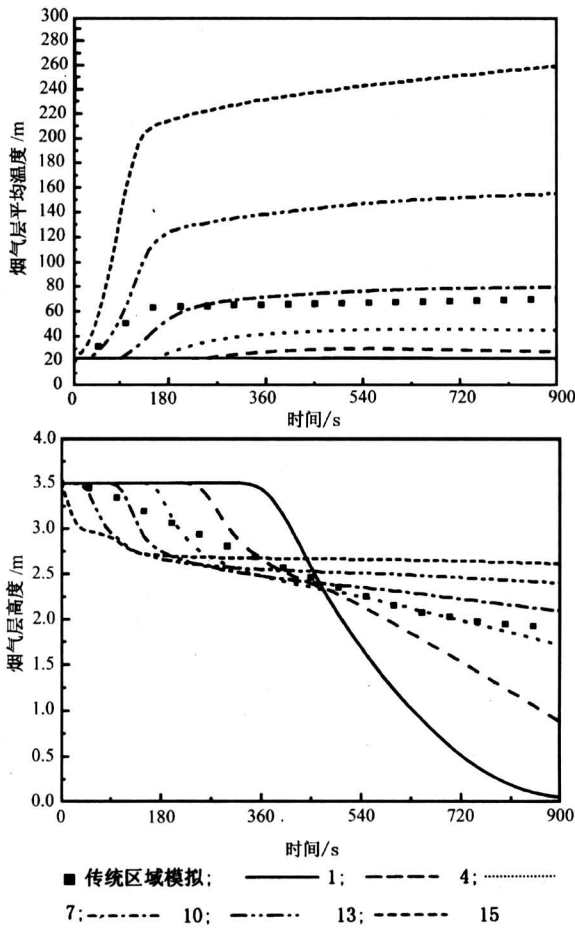


图5 狭长型空间多单元区域模拟与传统区域模拟
Fig.5 Comparison of simulation results gotten by cell-zone method and two-layer zone method for a long-narrow space

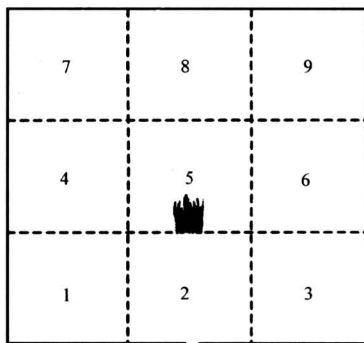


图6 扁平大空间的多单元划分
Fig.6 Cells divided for a large-flat space

5 结语

基于目前在大尺度空间火灾安全工程分析中所出现的烟气运动的特殊现象, 作者提出了一种多单

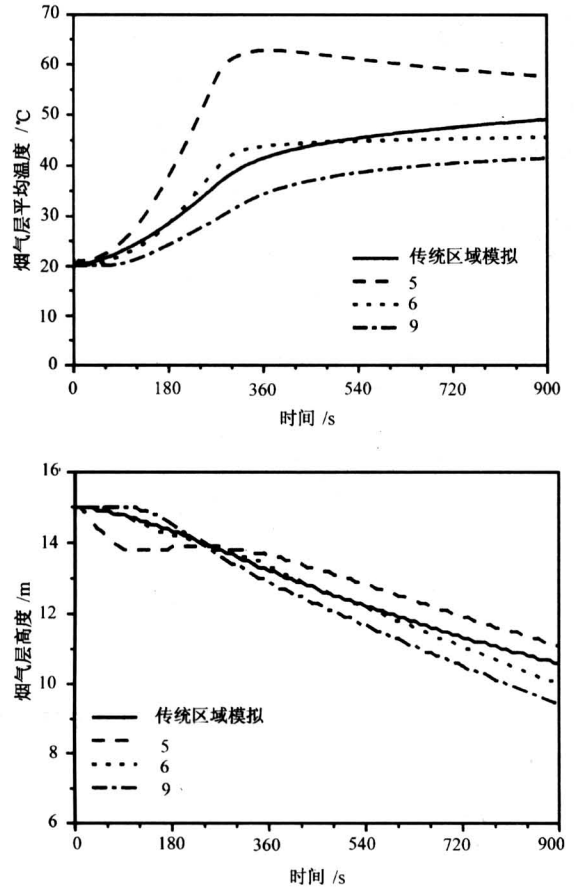


图7 扁平大空间多单元区域模拟与传统区域模拟
Fig.7 Comparison of simulation results gotten by cell-zone method and two-layer zone method for a large-flat space

元区域模拟的方法。相比于传统的单一区域模拟的方法而言, 多单元区域模拟的方法较为合理地反映了大尺度空间火灾烟气发展过程的实际情况。

可以看出, 采用传统的单一区域模拟和多单元区域模拟的方法对大尺度空间火灾烟气运动模拟的结果具有一定的差异, 在单一方向具有大尺度的空间中, 这种差异比较大。若在此类空间中, 仍然采用传统的单一区域模拟的方法进行火灾安全的工程分析, 必将对其建筑火灾防治措施产生误导, 最终给火灾环境下人员生命安全的保护埋下巨大隐患。

参考文献

[1] 霍然, 胡源, 李元洲. 建筑火灾安全工程导论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999
[2] 范维澄, 刘乃安. 火灾安全科学——一个新兴交叉的工程科学领域 [J]. 中国工程科学, 2001, 3(1): 6~14

- [3] Chow W K. Simulation of tunnel fires using a zone model [J], *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(2):221~236
- [4] Jones W W. State of the art in zone modeling of fires, the Vereinigung zur Forderung des deutschen Brandschutzes e. V. (VFDB) [A]. *International Fire Protection Seminar, 9th. Engineering Methods for Fire Safety. Proceedings* [C]. Munich Germany, 2001. A 4/89~126
- [5] 叶瑞标, 潘关新, 陈小军, 等. 地下建筑公共娱乐场所火灾烟气防治 [J]. *消防技术与产品信息*, 1996, (2):21~26
- [6] Jones W W, Forney G P, Peacock R D, et al. A Technical Reference for CFAST: An Engineering Tool for Estimating Fire and Smoke Transport [M]. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, January 2000

Cell-Zone Method: An Engineering Approach to Predict Smoke Movement in Large Scale Building Fire

Hu Longhua, Huo Ran, Li Yuanzhou, Wang Haobo

(*State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

[**Abstract**] In large scale building fire, it is improper to predict smoke descending using traditional simple two-layer zone model, which divides the total space of the building into upper hot smoke layer and lower cool air layer. In this paper, an improved method, named Cell-Zone Method, is used to solve this problem, which first divides the total space into some small subspaces and then uses traditional two-layer zone model in each subspace. Comparison is carried out between these two methods in fire smoke development simulation in typical large space buildings by CFAST4.02 software package. Results show that Cell-Zone Method demonstrates more applicability than traditional simple two-layer zone model in large scale building, especially in buildings having large scale in one direction.

[**Key words**] large scale building; smoke movement; cell-zone method; zone-model

(con. from p. 44)

High Order Differential Feedback Control for Nonlinear Systems

Qi Guoyuan^{1,2}, Chen Zengqiang², Yuan Zhuzhi²

(1. *Department of Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China*;

2. *Department of Automation, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

[**Abstract**] This article presents high differential feedback control idea that does not rely on the model of the controlled system. Its control objective is that the output of the system and its differential and high differentials approximate the given reference input and its differential and high order differentials. It will improve largely the requirement of the control quality. Based on the idea, the high order differentiator (HOD) that is well able to extract differential and high order differentials of measured signals is designed. The proposed HOD has a few parameters and is easily adjusted. Its stability, convergence and filtering characteristic are proved. Furthermore, high order differential feedback adaptive controllers (HODFC) for unknown model nonlinear SISO and MIMO systems with unknown disturbance are presents respectively, the analysis of stability and robustness of the closed system is given, and linearized decoupling control is achieved.

[**Key words**] high order differentiator; high differential feedback controller; stability; robustness; decoupling control