

CFD 技术在大空间烟气运动模拟中的应用

肖泽南¹, 谢大勇², 孙 旋¹

(1. 中国建筑科学研究院 建筑防火研究所, 北京 100013; 2 北京市消防总队, 北京 100035)

摘 要: 介绍了 CFD 技术在消防性能化设计中的应用, 以及两个得到广泛应用的 CFD 软件 FLUENT 与 FDS。给出了一个体育场馆的应用案例, 比较了 FLUENT 软件与 FDS 软件的优缺点及适用性, 体现了 CFD 技术的应用为工程所带来的效果。

关键词: CFD; 性能化设计; 烟气; 大空间建筑

中图分类号: TP391, TK121 **文献标识码:** A

文章编号: 1009-0029(2005)02-0175-03

1 前言

消防性能化设计代表一种新的思路, 一种新的认识, 正在我国如火如荼地开展起来。消防性能化设计是采用工程化的方法, 通过计算机软件模拟或者其他手段进行量化分析, 从而获得建筑物的消防安全水平。通过合理有效地采用各种技术手段, 性能化的防火设计可以获得较高的消防安全水平, 同时又不失灵活性。如同自动控制系统的灵敏度取决于传感器的灵敏度, 消防性能化设计的有效性, 取决于所采用的计算机模拟软件及其算法的有效性。

2 消防领域的 CFD 技术

在常规的消防设计中, 大空间的排烟量设计是按照面积或者体积进行设计。例如中庭的设计, 按照《高层民用建筑设计防火规范》体积小于 $1.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 时, 其排烟量按其体积的次/h 换气计算; 中庭体积大于 $1.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 时, 其排烟量按其体积的 4 次/h 换气计算, 但最小排烟量不应小于 $1.02 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。对于汽车库的设计, 《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》规定排烟风机的排烟量应按换气次数不小于 6 次/h 计算确定。而 NFPA 92B、TM 19 等国外规范则根据羽流模型进行计算, 其原理是排烟量应等于烟气生成量以保持清晰高度。这两种方法, 前者是完全基于处方式规范的一种传统方法, 后者已经是一些拥有性能化设计的国家所采用的性能化的方法。这两种方法都已经广泛应用于工程设计中, 但是它们都存在一个致命缺陷: 在它们的计算过程中, 不能反映建筑物的空间形状。事实上, 建筑物的几何形状对于烟气扩散运动的影响是至关重要的。例如, 在一般的火灾模型中, 挡烟垂壁被理想化为烟仓的四壁, 烟气均匀地对烟仓进行自上而下地填充, 实际效果是否如此? 烟气快速地向挡烟

垂壁扩散过来受到阻碍, 必定会转向下蔓延, 从而在挡烟垂壁下侧形成一块潜在的危险区域。这种由于建筑的几何形状而对烟气运动所造成的影响, 在上述两种方法中无法得到体现, 从而被忽略。

场模拟是一种更加先进, 但是更加复杂的方法。这种方法需要大量计算, 在若干年前, 即使理论研究深度足够, 计算能力也不能满足其计算需要。计算机工业按照摩尔定律的快速发展, 使得近年来人们的计算能力得到了突飞猛进的增长。目前, 通用的可以用于各种流体力学计算的商业软件已经较为成熟, 并且逐渐应用于从军事到民用, 从火箭、坦克到小汽车, 从天气预报到房间空气适宜度。计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 是用数学方法, 通过求解代表物理定律的数学方程, 来预测流体流动、热传输、质量传输、化学反应和相关现象的学科。较为有名的有 CFX、FLUENT、STAR-CD 等等。而专业用于消防的软件也已经实用化, 包括 PHOENIX 和 FDS。这里分别介绍国际上广泛采用的 FLUENT 和 FDS 软件。

2.1 FLUENT 软件

FLUENT 软件采用有限体积方法, 提供了三种数值算法, 即 Segregated Solver、Coupled Explicit Solver 和 Coupled Implicit Solver, 其它任何一个商用 CFD 软件都仅能提供其中的一种。FLUENT 的网格生成器 GAMBIT, 具备突出的非结构化的网格生成能力, 被公认为目前商用 CFD 软件最优秀的前置处理器。

FLUENT 软件提供了丰富的物理模型, 包括理想气体、真实气体模型、多种燃烧模型、各种物性参数、旋转系统模型、传热模型、针对外流场与内流的特定的边界条件等。另外, FLUENT 软件包含了 8 种工程上常用的湍流模型 (包括 1992 年提出的一方程的 S-A 模型, 双方程的 $k-\epsilon$ 模型, 雷诺应力模型和最新的大涡模拟等), 而每一种模型又有若干子模型。其它任何软件都没有像 FLUENT 这样提供如此丰富的物理模型。

FLUENT 具有强大的后置处理功能, 能够完成 CFD 计算所要求的功能, 包括速度矢量图、等值线图、等值面图、流动轨迹图, 并具有积分功能, 可以求得力、力矩及其对应的力和力矩系数、流量等。对于用户关心的参数和计算的误差可以随时进行动态跟踪显示。

2.2 FDS 软件

FDS 软件是由美国标准与技术研究所(NIST)开发的,用于预测在拟定的最不利的可信设计火灾下所导致的火灾环境。该模型是一个基于有限元方法概念的计算流体动力学模型。

FDS 是一个由公认的政府权威机构开发的模型,并且未受到任何特定经济利益及与之关联的特定行业的影响及操纵。有相当多的关于该模型文献资料,而且该模型经过了大型及全尺寸火灾实验的验证。

FDS 模型的输入数据包括:空间环境温度,建筑内物品的燃烧特性类型,灭火系统的影响,烟气的性质,考虑或不考虑某些障碍物的影响(例如挡烟垂壁),为搜集有用数据所需的模拟时间,网格划分(计算精确度),所要测量的数据的类型及位置(数据采集),设计火灾等。

除了未经处理的输出数据外,FDS 模型还提供了多个图形输出模式,有助于直观地观察数据,如“截面文件”、“等值面”、“热电偶”以及“边界文件”。输出数据的图形显示通过一个名为 Smoke View 的程序来处理,这一程序专门开发用于显示 FDS 的输出数据。关于输出数据显示的更多信息可参见 Smoke View 的用户手册,该手册可由 NIST 的网站下载。

截面文件为彩色的“切片”,或贯穿整个控制体的断面,通过这个断面可以使用户直观地观察气体内的温度分布,允许用户观察随时间改变的温度分布及变化。对于本次分析,截面文件被用来评估空气温度、能见度及减光系数。

等值面定义为具有相同数值的轮廓。例如,100 的温度可通过一个三维的表面来表现,并可通过 Smoke View 软件进行图形显示。

从上述介绍可以发现,FLUENT 软件作为大型商业软件的杰出代表,在模型制作、网格划分、湍流模型等方面具有无与伦比的优势,其劣势为虽然具有燃烧模型,但是没有为消防专门进行过优化,模型配置需要较强流体力学背景。而 FDS 作为专业消防的唯一一款免费软件,也具有相当的普及性,但是只能用矩形来模拟复杂形状,结果会有一定程度失真。两款软件各具优缺点,应用时应当注意扬长避短。在建筑几何形状复杂,且几何形状对烟气的流动有明显影响的情况下,建议采用 FLUENT 软件,虽然无法直接获得诸如能见度之类的指标,但是通过温度、浓度分布云图,还是可以表征烟气的传播规律。如果建筑的几何形状较为简单,在近似为矩形时不会失真严重,可以采用 FDS 软件,它可以直接获得温度、浓度、能见度等分布云图。

3 工程应用

奥运场馆之五棵松文化体育中心篮球馆,最初中选方案是一个很好的工程案例,虽然该方案因各种原因已经调整,但是作为 CFD 技术成功应用的实验田,仍旧有许多经验不得不提。它包括高大空间篮球馆、环形车道、倾斜隧道以及中庭。如何有机地将各种建筑形式拟合在一起是一个艰巨的挑战,而如何有效地设计不同建筑部分的防排烟系统同样是一个巨大的挑战。

在不同的建筑组成部分中,根据不同的建筑几何形状以及研究的侧重点,采用了不同的烟气模拟软件。对篮球馆和倾斜隧道的模拟采用了 FLUENT 软件,而对环形车道和中庭的模拟则采用了 FDS 软件。

图 1 为篮球馆比赛大厅 CFD 三维模型。从图中可以看到,通过 FLUENT 软件的 GAMBIT 建模软件,可以获得与实际建筑相近的模型,以便最大限度地模拟建筑中可能发生的火灾及其烟气运动。双曲面体以及倾斜的看台面,显然此时 FLUENT 软件较 FDS 软件更为合适。在本案例中存在两段 436m 的隧道,坡度不大于 10%,图 2 为单侧隧道的三维模型。

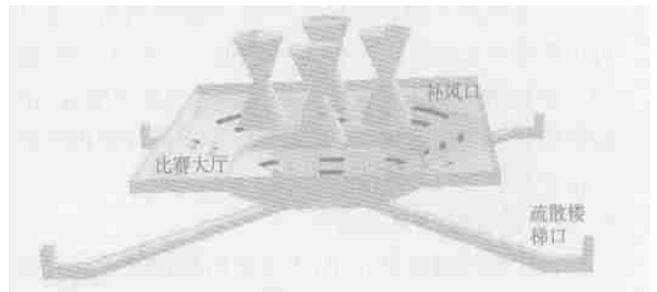


图1 篮球馆比赛大厅 CFD 三维模型

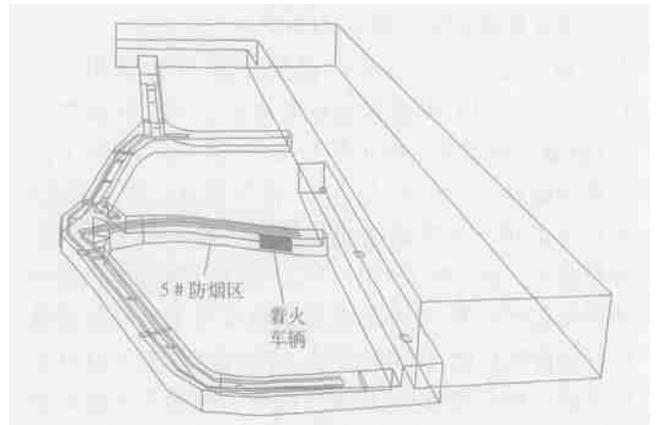


图2 倾斜隧道 CFD 三维模型

从工程角度看,这种坡度的隧道用 FDS 模拟几乎是不可能完成的,因为拟合坡度为 10% 的斜面所需要的网格非常精细,从而产生现有计算能力不可承受的网格数。相反,采用 FLUENT 软件可以轻而易举地建立不规则网格,而倾斜网格更是不在话下。

不过,采用 FLUENT 软件将无法获得能见度指

标,这反而体现了FDS软件的专业优势。一般人员疏散安全的判定条件为:离地面或楼面2m以上空间平均烟气温度不大于200℃,2m以下空间内的烟气温度不超过60℃,且减光度小于 0.1m^{-1} (或能见度大于10m)。即在有些场合下,温度并不一定能表征火场的安全程度,必须要考虑能见度。能见度指标与燃烧物的化学组成有关,也与燃烧的充分程度有关。在某些场合,烟气的温度并不是很高,而能见度却很低,这样也会对人员的安全疏散产生影响。例如,本案例的环形车道就是这样的一处场所,如果仅用温度指标去评价排烟系统,则得到的结果可能正好相反。因此,FDS此时是一个很好的选择。

当然,无论是采用以FLUENT为代表的通用CFD软件,还是采用以FDS为代表的专业CFD软件,都较基于处方式的消防设计,基于羽流模型的经验公式计算和两层区域模型有了显著的进步。下面举一个具有典型意义的事例,图3为倾斜隧道中发生火灾的烟气蔓延示意图,是用FLUENT软件模拟所获得的结果。

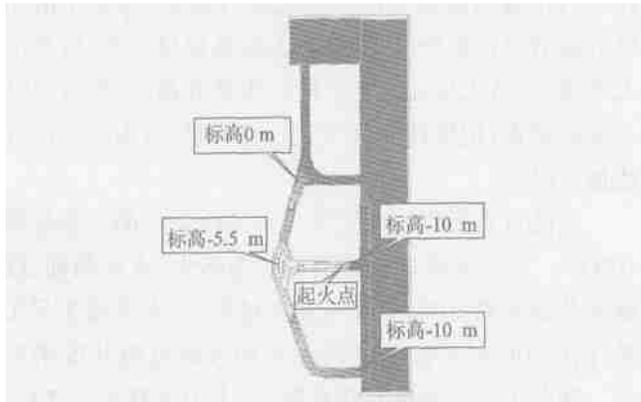


图3 隧道烟气蔓延示意图

图中隧道T形部分温度超过设定的安全指标60℃,为危险区域,无颜色显示。这张图片平行于隧道倾斜地面,各点距离地面1.8m。仔细观察上图可以发现一个较为有趣的现象:热烟气自起火点开始,沿着倾斜向上的隧道蔓延,到达T形三岔口后,三岔口上方的超标区域范围要小于三岔口下方的超标区域!难道是热烟气向下蔓延比向上蔓延要快?仔细分析可以发现原因很简单:到达三岔口的烟气要向两侧继续扩散,向隧道上部蔓延的烟气由于自身的浮力沿着倾斜向上的隧道顶部继续扩散不会积聚,因此在距离地面1.8m的高度上不会产生危险;而向隧道下部蔓延的烟气无法靠重力向下扩散,在全部充满隧道后逐渐向下推移。倾斜隧道烟气蔓延示意,见图4所示。

这个现象不仅有趣而且相当重要,给我们以启示:在倾斜的隧道中,烟气依靠自身的浮力可以被自然地

排出隧道,就象烟囱一样;布置在隧道顶棚的机械排烟将加快这一排烟的进程。基于上述认识,可以进一步提出建议:既然烟气有自然排出隧道的趋势,就没有必要在烟气外溢的通道上划分防烟分区从而阻挡排烟,合理的方案应当是顺势而为,即火灾点以上隧道部分的挡烟垂帘在火灾时不落下,以避免影响烟气从隧道口的排出。再配以合适的机械排烟量,以保证烟气始终在疏散人员头部上方流动。这样的方案合理的应用了现有的设备资源,科学地提高了系统整体的安全水平。

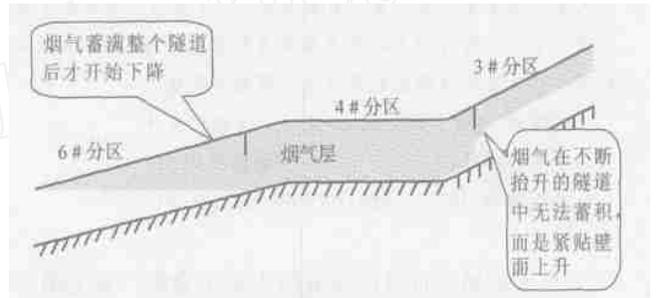


图4 倾斜隧道烟气蔓延的特点

通过上述案例,可以发现通过采用基于CFD技术的场模拟可以获得烟气运动中的更多细节,运用CFD后处理器的云图分析、矢量分析以及其他高级分析工具,可以更加深入地对烟气运动的内在规律进行分析,揭示建筑构件与烟气之间的互动关系。这是基于处方式的消防设计,基于羽流模型的经验公式计算和两层区域模型所无法企及的。

4 总结与展望

传统的基于处方式规范的消防设计是否能够满足目前日新月异的各类建筑的需要,这是一个值得思考的问题。这就类似于控制系统的开环控制,没有用控制结果的反馈来校正输入控制条件。如果可以对每一个工程设计都进行现场试验,通过试验结果来校正设计,当然就完成了闭环控制,但是这在现行的社会经济条件下是不可能完成的。而CFD技术则提供了这样一种可能性,它可以提供给我们在设定的火灾条件下可能的烟气扩散情况,这种可能情况来自于廉价的计算机虚拟模拟。利用这个强大而又有利的武器,可以验证防排烟设计的有效性以及人员疏散的安全性。

目前,国内外的性能化设计,已经普遍在使用包括通用CFD软件和专用CFD软件在内的各种软件进行模拟、设计。国外对CFD技术在工程中的应用进行了大量实验验证,积累了大量经验,而国内在实验验证方面较为滞后,仅仅局限于CFD技术的工程应用。

建议国内的消防性能化设计单位尽快开展实验验证工作,通过实验数据与模拟结果的对比分析验证模拟结果,改进模型设置。

建筑火灾中人的行为研究综述

张树平¹, 史行君², 卢兆明³

(1. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055; 2. 延安市消防支队, 陕西 延安 710060; 3. 香港城市大学)

摘要: 火灾是当今世界严重威胁人们生命财产的多发性灾害之一。研究建筑火灾中人的行为反应, 解明建筑火灾中人在决定逃生之前的行为规律, 对于建筑性能化防火设计、建筑消防安全逃生管理与教育具有重要意义。对国内外防火学者关于火灾中人的行为研究的历史沿革与现状进行综合评述, 并对我国今后开展此项研究的课题做出预测与展望。

关键词: 建筑; 火灾; 人的行为; 性能化设计

中图分类号: X92

文献标识码: B

文章编号: 1009-0029(2005)02-0178-04

火灾是当今世界严重威胁人们生命财产安全的多发性灾害之一。火灾的发生频率很高, 后果难以预料, 造成的损失与危害触目惊心。据联合国世界火灾统计中心(WFSC)近年来不完全统计, 全球每年约发生火灾600万次~700万次, 每年死于火灾的人数约有6.5万人~7.5万人。据20世纪90年代中期中国、印度、美国、俄罗斯、日本、德国、英国、法国、澳大利亚、爱尔兰等10个国家火灾统计显示, 人口总数占世界总人口的50%, 每年发生火灾368万次, 死亡人数43 155人, 每年发生火灾的次数约占世界火灾总数的58%, 每年火灾死亡人数约占世界每年火灾死亡总人数的63%^[1]。

近年来, 我国在社会与经济飞速发展的同时, 也孕育和诱发了众多人为和自然灾害。世界各国经验表明,

经济快速发展时期是人为灾害及人为诱发的自然灾害最容易发生的时期。而我国当前正处于经济快速发展时期, 我国的火灾形势相当严峻。建筑火灾已成为城市中最为严重的公共灾害之一, 是全世界防灾减灾的重大研究课题^[2-4]。

1 研究建筑火灾中人的行为的意义

不同的人在灾害面前的行为特点有很大差别。年龄大小、身体状况、文化程度、风俗习惯等因素均具有重要影响。如老年人和儿童在建筑物里对火灾报警的反应比青、壮年人差得多, 其逃生行动也要慢得多。此外, 还应注意, 在突如其来的火灾面前, 许多人的行为与平时大相径庭, 有人一见起火很快陷入恐慌, 那些在平时很容易看到的疏散标志此时却看不到, 平时不难听到的声音也全听不到, 有人往往盲目逃跑, 以至陷入绝境。虽然人员在火灾中的行为是复杂的, 但可以结合灾后调查, 用统计学、生理学、心理学、行为科学的方法加以研究。

人的行为反应与火灾发展及逃生条件的关系如图1所示。火灾发展过程一般可分为起火、火灾初期、旺盛期及衰减期。伴随着火灾发展过程, 对人员逃生起关键作用的时刻是报警时刻和达到火灾危险状况的时刻。即起火之后能够尽快报警, 在人们觉察火灾之后,

参考文献:

- [1] GB 50045-95, 高层民用建筑设计防火规范[S].
- [2] Kevin B Mc Grattan, Glenn P Forney, Jason E Floyd *et al*. Fire Dynamics Simulator (Version 3) - User's Guide www.fire.nist.gov.
- [3] 李引擎, 肖泽南, 等. 建筑防火工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

The application of CFD technique used in modeling smoke movement in large space

XIAO Ze-nan¹, XIE Da-yong², SUN Xuan¹

(1. Institute of Building Fire Research, China Academy of Building Research, Beijing 100013; 2 Beijing General Fire Brigade, Beijing 100035, China)

Abstract Gives a brief introduction to the application of CFD

technique in performance-based fire design, and introduces two CFD software used widely, which named FLUENT and FDS. This article gives an example of a gymnasium, comparing FLUENT with FDS by indicating the advantage and applicability. The example materializes the advantage of the application of CFD technique in project.

Key words: CFD; performance-based design; smoke; large space building

作者简介: 肖泽南(1973—), 男, 湖南人, 中国建筑科学研究院建筑防火研究所工程师, 学士, 主要从事火灾报警系统与防排烟系统研究和相关技术开发, 目前正在从事CFD技术在性能化防火设计与评估中的应用技术研究, 北京市北三环东路30号, 100013.

收稿日期: 2004-11-20