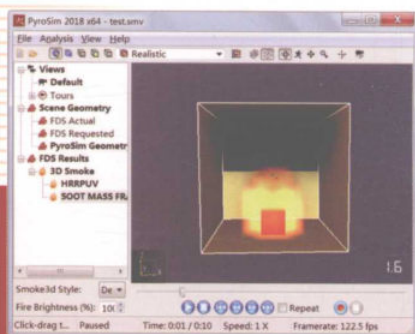


FDS

火灾数值模拟

李胜利 李孝斌 编著



化学工业出版社

FDS

火灾数值模拟



ISBN 978-7-122-34989-7



9 787122 349897 >

定价：58.00元

FDS 火灾数值模拟

李胜利 李孝斌 编著



 化学工业出版社

· 北京 ·

《FDS 火灾数值模拟》是国内首部介绍 FDS 软件的图书, 本书全面介绍了火灾动力学模拟软件 FDS 及其建模工具 Pyrosim 的使用方法。FDS 部分包括全局参数设置、建筑结构建模、火源设置、输出变量设置及等值线图的绘制方法, 消防设施模拟包括通风系统、水喷淋系统、火灾自动报警系统及逻辑控制的数值模拟方法。Pyrosim 建模软件的介绍分为两部分, 一是介绍 FDS 命令的同时给出 Pyrosim 操作步骤; 二是通过工程案例展示 Pyrosim 的建模功能。本书最后给出火灾模拟技术在消防设计、建筑防火性能化评估、火灾调查及灭火指挥方面的应用。

《FDS 火灾数值模拟》通俗易懂、深入浅出, 可供广大消防安全领域工程技术人员参考, 也可作为高等院校消防工程、安全工程及相关专业的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

FDS 火灾数值模拟/李胜利, 李孝斌编著. —北京:
化学工业出版社, 2019. 11
ISBN 978-7-122-34989-7

I. ①F… II. ①李…②李… III. ①火灾-数值模拟-
应用软件 IV. ①X928. 7-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 166283 号

责任编辑: 高 震 杜进祥
责任校对: 张雨彤

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京京华铭诚工贸有限公司
装 订: 三河市振勇印装有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张 15¼ 字数 306 千字 2019 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元 版权所有 违者必究

前言

人们在生产生活中经常遭受各种灾害，如旱灾、洪涝、台风、地震、海啸和火灾等。在这些灾害中，火灾之所以受到广泛关注，主要是因为除森林火灾、草原火灾及雷电引发的火灾外，其他火灾均归结为人为灾害。天灾意味着不可抗拒，而人为灾害在某种程度上是可以避免的。另外，火灾造成的人员伤亡比其他灾害之和还大。正因为这样，各国政府都十分重视火灾的防治工作，成立专门机构承担灭火救援任务。

为更好防治火灾，必须研究火灾的发生、发展及蔓延规律。火灾的研究方法分为理论研究、试验研究和数值模拟研究。理论研究即借助自然科学规律研究火灾问题，消防燃烧学及火灾动力学即为研究火灾规律的学科，理论研究曾为人类探索火灾规律发挥了重要作用，遗憾的是当需要解决某些具体工程问题时，因影响火灾因素复杂，有关理论便失去了成立的条件。试验研究是较为直观的科学研究方法，利用不同规模的火灾试验，研究者得出许多实用经验公式并指导防火设计。试验研究的缺点是可重复性差且费用高昂。随着计算机的普及，数值模拟技术在各行各业蓬勃开展，计算机辅助设计改变了传统的产品设计流程，节约了设计费用，缩短了设计周期，且取得了非凡成就。火灾的数值模拟工作开始于 20 世纪 80 年代，现已在建筑防火设计、火灾原因调查及灭火指挥等方面广泛应用。

火灾数值模拟软件可以分为两类，通用 CFD (Computational Fluid Dynamics) 软件和专业火灾模拟软件。前者如 Fluent、CFX、PHOENICS、STAR-CD、OpenFOAM 等，后者如 FDS (Fires Dynamics Simulator)、FiveFOAM、Smartfire 等。通用 CFD 软件的优势是计算流体动力学模型久经考验，前后处理功能完善。21 世纪初，由于 FDS 建模软件匮乏，大型模型难以建立，因此通用 CFD 软件在火灾模拟领域有不少应用。由于该类软件不是专为火灾模拟开发，因此对消防系统的模拟比较困难，如喷淋系统、报警系统等，以 Fluent 而言，即便是设定非恒定功率的火源这种火灾模拟的常见设置，也要依靠自己编制 UDF 文件来实现，这就是说只是想模拟火灾，还要熟悉 C 语言编程，这无疑提高了软件使用的门槛，使得广大技术人员望而却步。因此，随着 FDS 建模工具的完善，通用 CFD 软件应用越来越少。就专业火灾模拟软件而言，无论从应用的广泛性、简便性还是实用性，美国国家标准技术研究院 (NIST) 开发的 FDS 无疑居首位。然而遗憾的是，国内外尚无这方面的教材，

使用者只能通过查阅 300 多页的英文用户手册进行学习。在授课过程中,和与消防工程技术人员的交流中,深深感受到学生乃至技术人员对火灾模拟教材的需求。因此,我们觉得有责任与义务把自己多年来使用和讲授火灾模拟,尤其是 FDS 的使用经验进行总结,在授课讲义的基础上,适当增加火灾模拟的理论基础和应用部分,形成本著作,以供消防工程、安全工程及相关专业的学生和工程技术人员参考。降低 FDS 使用门槛,缩短掌握 FDS 的时间是本书编写的最大目标。

本书以火灾模拟的工程应用为出发点和目的,主要介绍 FDS 软件的基本假设、使用方法、火灾模拟技巧及火灾模型的简化方法,而且是将火灾模型的简化方法融入 FDS 具体模拟方法之中。在使用方法上,不仅介绍了 FDS 的基本建模方法,包括建筑结构布局设置、火源设置、输出结果设置和全局参数设置,还重点阐述了消防工程的机械通风系统、水喷淋系统、火灾自动报警系统和消防联动系统的模拟方法,较为全面地介绍了建筑火灾的模拟方法。为示范火灾模拟技术的工程应用,最后一章提供了火灾模拟在防火设计、性能化评估、火灾调查和灭火指挥方面的应用。

Pyrosim 是工程中广泛使用的 FDS 建模软件并具有丰富的后处理功能。该软件提供命令对话框、绘图工具绘制和导入工程图纸三种建模方式,其中工程图纸可以是二维图纸,也可以是 DXF、DWG、FBX、DAE、OBJ 和 STL 格式的三维图纸。本书对 Pyrosim 的介绍也另辟蹊径,包括两部分内容:一是 FDS 命令对话框,不再单独列章节,而是和 FDS 命令合并介绍,即阐述完命令的功能后读者既可直接采用 FDS 命令建模,也可以使用 Pyrosim 的命令对话框建立模型;对于绘图工具和导入工程图纸两种建模方式,考虑到读者均具有一定的软件使用经验,不再逐个介绍绘图工具的使用方法,而是通过精心设计的第 4 章中 5 个工程案例,讲解 Pyrosim 的建模方法。相信这种处理方式,对于 Pyrosim 软件的学习能起到事半功倍的效果。即使是首次接触火灾模拟的技术人员,也能够通过火灾模拟案例,掌握火灾模拟的绝大多数内容。

本书由李胜利和李孝斌共同撰写,李胜利撰写第 1 章至第 3 章,李孝斌撰写第 4 章和第 5 章。我们在撰写过程中,参考了前辈和同行的不少资料,已列于参考文献。尤其感谢不断向我提出问题的学生们,这些问题是我在火灾模拟领域不断进步的动力。最后要感谢武警学院青年英才基金的支持,才得以使本著作出版。

我们水平有限、研究不足,再加上 FDS 和 Pyrosim 的使用主要参考英文使用手册,错误纰漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编著者

2019 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论 1

- 1.1 火灾数值模拟方法 1
 - 1.1.1 经验模型 2
 - 1.1.2 区域模型 4
 - 1.1.3 场模型 5
- 1.2 火灾模拟软件 6
 - 1.2.1 PHOENICS 6
 - 1.2.2 FLUENT 7
 - 1.2.3 CFX 7
 - 1.2.4 OpenFOAM 8
- 1.3 FDS 软件特点 9
 - 1.3.1 FDS 的模型 9
 - 1.3.2 FDS 的假设 10
 - 1.3.3 FDS 的特点 11

第 2 章 FDS 软件使用方法 12

- 2.1 火灾模拟过程 12
 - 2.1.1 火灾模拟过程 12
 - 2.1.2 最简单的场景文件 13
 - 2.1.3 Pyrosim 概述 14
- 2.2 全局参数设置 16
 - 2.2.1 HEAD 命令 16
 - 2.2.2 MESH 命令 17
 - 2.2.3 TIME 命令 21
 - 2.2.4 MISC 命令 22
 - 2.2.5 INIT 命令 23

2.3 建筑结构布局设置	25
2.3.1 MATL 命令	25
2.3.2 SURF 命令	28
2.3.3 OBST 命令	42
2.3.4 MULT 命令	46
2.3.5 HOLE 命令	49
2.3.6 VENT 命令	50
2.4 火源设置	54
2.4.1 热释放速率	55
2.4.2 简单热解模型—设定热释放速率的火灾	60
2.4.3 复杂热解模型—设定热解参数的火灾	67
2.4.4 固体可燃物燃尽后的视觉消失	77
2.4.5 燃烧模型	79
2.5 输出变量设置	96
2.5.1 DEVC 命令	97
2.5.2 SLCF 命令	103
2.5.3 ISOF 命令	106
2.5.4 BNDF 命令	108
2.5.5 Plot3D 静态数据	108
2.5.6 输出次数控制	111
2.5.7 等值线图绘制	112

第3章 建筑消防设施的数值模拟 118

3.1 机械通风系统	118
3.1.1 普通风机	118
3.1.2 暖通空调系统	119
3.2 水喷淋系统	125
3.2.1 拉格朗日粒子	125
3.2.2 喷头参数设置	128
3.2.3 水抑制作用的模拟方法	136
3.2.4 示踪粒子及其应用	139
3.2.5 燃料粒子及其应用	140
3.2.6 预作用灭火系统	141
3.2.7 干式灭火系统	143
3.3 火灾自动报警系统	144

3.3.1	感温探测器	144
3.3.2	感烟探测器	146
3.3.3	红外光束线型感烟探测器	148
3.3.4	主动吸气式感烟探测器	149
3.4	逻辑控制	152
3.4.1	基本逻辑控制	153
3.4.2	高级逻辑控制	156
第4章 Pyrosim 火灾模拟案例		164
4.1	单室火灾——命令对话框建模	164
4.1.1	场景的 FDS 命令	164
4.1.2	Pyrosim 建模过程	165
4.2	宾馆火灾——绘图工具建模	173
4.2.1	Pyrosim 绘图工具	173
4.2.2	单室火灾简介	174
4.2.3	建模过程	175
4.2.4	标准间的 FDS 命令流	182
4.3	住宅火灾——背景图片建模	184
4.3.1	住宅建模介绍	184
4.3.2	建模过程	184
4.3.3	FDS 命令流	192
4.4	办公楼火灾——CAD 平面图纸建模	198
4.4.1	建筑概况	198
4.4.2	模型简化	198
4.4.3	工程图纸处理	199
4.4.4	楼层管理	199
4.4.5	绘制计算网格	199
4.4.6	建立火灾模型	203
4.5	体育馆火灾——CAD 三维模型建模	211
4.5.1	概述	211
4.5.2	体育馆建模	211
第5章 火灾模拟的工程应用		214
5.1	基于区域模型的地下车库火灾排烟量计算	214

5.1.1	烟气层沉降理论分析	215
5.1.2	计算条件	217
5.1.3	计算结果及分析	218
5.1.4	结论	223
5.2	人员可用安全疏散时间模拟计算	223
5.2.1	基于现行规范的疏散设计方法	224
5.2.2	性能化人员疏散评估方法	225
5.2.3	人员安全疏散的性能判定标准	228
5.3	燃气泄漏火灾自熄原因的数值模拟研究	229
5.3.1	案例介绍	229
5.3.2	数值重建	230
5.4	灭火救援行为对火灾发展影响的模拟研究	234
5.4.1	案例介绍	234
5.4.2	数值重建	236
5.4.3	结论	239

附录 1	FDS 常用输出变量	241
-------------	-------------------	------------

附录 2	常用材料的热物理性质	242
-------------	-------------------	------------

参考文献	243
-------------	------------

• 第 1 章 •

绪 论

火是人类进步的重要标志,然而火灾却给人民的生产生活造成了巨大的财产损失,甚至出现较多人员伤亡。因此,认识火灾规律并以技术手段对火灾进行防控是值得研究的重要课题。然而,由于火灾问题的复杂性,理论分析和火灾实验在研究火灾规律时遇到较大困难。随着计算机的普及,数值模拟技术在火灾规律研究中得到普遍认可和广泛应用。理论研究者或消防工程技术人员,都应该掌握火灾的数值模拟技术这一重要的研究手段。

1.1 火灾数值模拟方法

火灾动力学包括复杂的物理化学过程,主要有流体力学、热动力学、燃烧学、辐射传热,甚至多相流动。火灾模拟须遵守质量守恒、动量守恒和能量守恒方程,这些方程被称为流体力学的控制方程。其中描述质量守恒的连续性方程,1755年由著名的数学力学家欧拉导出。描述动量守恒的方程,1827年由法国工程师纳维提出,1845年英国数学家斯托克斯加以完善,因此合称为纳维-斯托克斯方程。热传递和燃烧方程的确定可追溯到百年以前。然而由于火灾的复杂性,火灾模拟除控制方程外,还包括湍流模型、燃烧模型、辐射传热模型、网格生成和计算结果的图形绘制技术。网格生成属于前处理技术,控制方程、湍流模型、燃烧模型、辐射传热模型及模型的数值方法属于计算模型,计算结果分析及图形绘制则属于后处理技术。火灾模拟涉及的每一个子领域都值得投入毕生精力去研究,因此 Hoyt Hottel 曾说火灾是仅次于生命过程的最难研究的对象。

火灾模拟技术成熟的标志是系列火灾模型的出现。随着科学技术,尤其是计算工具和计算科学的发展,先后出现了经验模型、区域模型和场模型。这些模型也有其各自的适用场合。火灾发生后,根据室内温度随时间的变化特点,火灾的发展过程将经历三个阶段:首先为火灾初起阶段、发生轰燃后转为火灾全面发展阶段,可燃物燃尽后进入熄灭阶段。火灾发展初期,除火源位置附近外,火灾产生的热烟气主要在房间顶部聚集,随着火灾规模的增大,热烟气层逐渐变厚。对于这种具有清晰烟气层的火灾,可将建筑室内空间分为上部的热烟气层和下部的冷空气层两个区域,每个区域内状态参数假设是一致的,这种火灾模型称为双区

域模型，如图 1-1 所示。火灾模拟时用常微分方程组分别描述各层的火灾特征，计算各区的温度及烟气层高度。双区域模型的优势是模型成熟且得到众多试验验证，计算速度快，计算结果可靠。常见的软件 CFAST、Branzfire 采用双区域模型。大空间或形状复杂的建筑，当火灾热释放速率较小时，火灾中烟气分层现象不明显，区域模型失去了成立的前提，必然结果有很大误差，这种情况下可采用场模型。场模型是将建筑室内划分成若干个单元，又称控制体，如图 1-2 所示，然后应用自然界普遍成立的质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律及化学反应定律建立描述烟气流动的方程，通过对所研究空间和时间进行离散，用数值方法求解出火灾各时刻的状态参数（烟气浓度、速度、温度等）在空间的分布。常见的软件 FDS、fluent 和 CFX 等均采用场模型。当然能用双区域模型模拟的场合同样可以采用场模型模拟。火灾发生轰燃后，室内温度迅速上升且绝大多数可燃物参与燃烧，此时室内各处温度差异较小，可认为室内温度均匀分布，这种模型称为单区域模型。规范规定的各种标准升温曲线实际上是默认采用单区域模型。

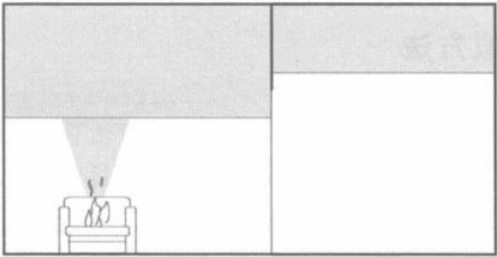


图 1-1 双区域模型

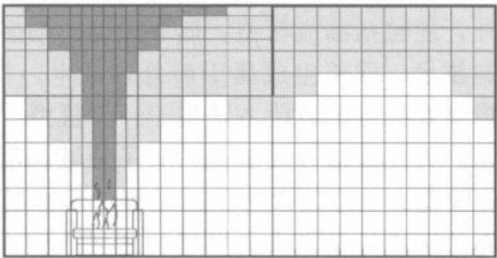


图 1-2 场模型

1.1.1 经验模型

火灾研究的早期阶段，研究人员主要是通过火灾实验及理论分析研究火灾行为，通过对火灾发展过程的观察和测量，归纳出描述火灾行为的经验公式，即为经验模型。对于普通建筑火灾，其室内主要可燃物为纤维类材料，可按 ISO 834

标准升温曲线计算室内温度，表达式为

$$T_g - T_{g0} = 345 \lg(8t + 1) \quad (1-1)$$

式中 T_g —— t 时刻的室内平均空气温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_{g0} ——火灾发生前的室内平均空气温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t ——升温时间，min。

对于石油化工建筑及生产、存放烃类材料、产品的厂房等以烃类材料为主的场所，应考虑采用与其相适应的标准升温曲线，如 HC（烃类）火灾升温曲线、RABT 升温曲线等。HC 曲线的表达式为：

$$T_g - T_{g0} = 1080 \times (1 - 0.325e^{-t/6} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (1-2)$$

RABT 升温曲线比 HC 升温曲线在相同时刻温度更高，火灾发生 5min 后，温度达到 1200°C 。该温度一直保持 85min，然后温度下降，至 140min 时温度为 0。三种标准升温曲线如图 1-3 所示。

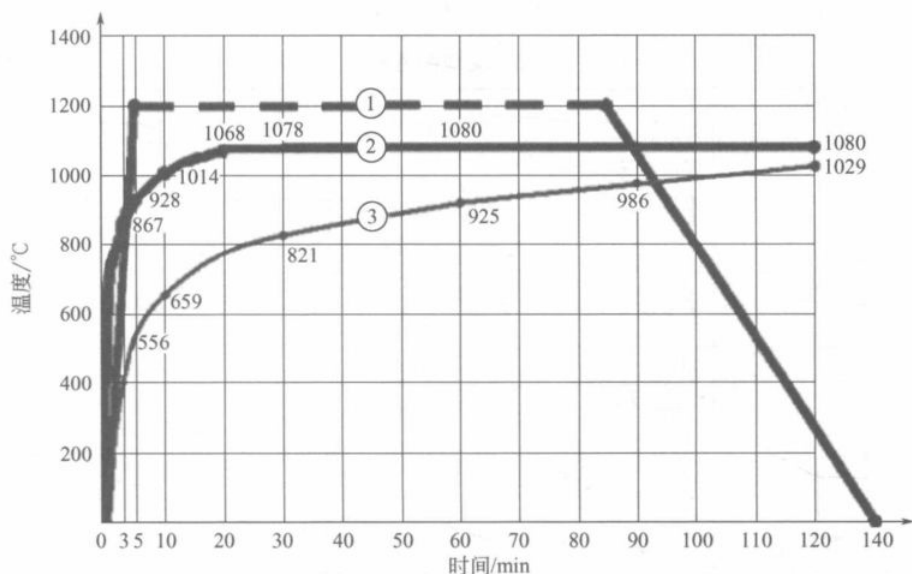


图 1-3 常用的标准升温曲线

1—RABT 曲线；2—碳氢化合物曲线；3—ISO 834 曲线

经验模型也可以包括更多的火场参数，比如可燃物数量、建筑面积、建筑开口状况以及建筑壁面的热物理参数等。李国强等针对高大空间建筑火灾的特点，通过对 120 个火灾场景的模型，考虑火源功率、建筑面积、建筑高度和距火源的距离等因素的影响，回归分析得出了高大空间的升温公式。

经验模型的最大优势是计算简单，使用方便，无需编制计算机程序即可预测建筑内的温度场。然而，经验模型具有很大的局限性，模型的得出主要依靠足尺寸的规模火灾实验，这些实验费用高昂且造成大气环境污染，而由缩尺寸模型得

出的经验公式与实际火灾有较大区别。从应用层面看，经验模型考虑的因素较少，无法考虑诸多因素对火场温度的影响，且一般的经验公式只是计算温度的分布。经验模型一般用于结构的耐火实验及建筑结构抗火能力评估。

1.1.2 区域模型

随着计算机的日益普及，火灾数值模拟成为火灾研究的重要手段。最先在消防工程中应用的是区域模型，包括单区域模型和双区域模型。区域模型的研究开始于 20 世纪 70 年代中期，以 Quintiere 提出区域模型的基本方程为标志。在 Quintiere 基本方程的基础上，Pape 等人于 1981 年发布了第一款区域模拟软件 RFIRES。随后，Emmons、Mitler 及其合作者开发了系列模型，其他研究人员相继开发了 ASET、ASET-B、FPETOOL，美国标准技术研究院 1993 年发布 CFAST。单区域模型采用经验公式或迭代公式计算室内温度，双区域模型在数学上为一组常微分方程组，CFAST 软件采用的常微分方程组见表 1-1。

表 1-1 CFAST 模型的常微分方程组

方程类型	常微分方程
压力	$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{h}_L + \dot{h}_U)$
质量	$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_i$
能量	$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\gamma} \left(\dot{h}_i + V_i \frac{dP}{dt} \right)$
体积	$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{P\gamma} \left((\gamma - 1) \dot{h}_i - V_i \frac{dP}{dt} \right)$
密度	$\frac{d\rho_i}{dt} = -\frac{1}{c_p T_i V_i} \left((\dot{h}_i - c_p \dot{m}_i T_i) - \frac{V_i}{\gamma - 1} \frac{dP}{dt} \right)$
温度	$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_i V_i} \left((\dot{h}_i - c_p \dot{m}_i T_i) + V_i \frac{dP}{dt} \right)$

注：1. i 表示上层 U 或下层 L。

2. 表 1-1 各式中：

P —气压，Pa；

t —时间，s；

γ —定压比热容与定容比热容之比；

V —空气体积， m^3 ；

h —气体的焓，J；

m —气体质量，kg；

E —内能，J；

ρ —气体密度， kg/m^3 ；

c_p —定压比热容， $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ；

T —气体温度， $^\circ C$ 。

区域模型的求解需要编制计算机程序,双区域模型除控制方程外,还应补充火灾分过程的经验公式。区域模型的优点是计算资源占用少,只要建筑火灾的发展符合区域模型假设,就能得出准确结果。区域模型虽然在火灾研究中发挥了重要作用,但其应用范围有限,无法准确计算火场温度、火灾产物在建筑空间的具体分布状况,无法适应建筑布局复杂的空间,而且囿于其模型假设,还无法从理论上提出解决这一问题的方法。区域模型用于结构布局简单的建筑,如住宅、宿舍等建筑的火灾模拟。

1.1.3 场模型

随着计算机技术的发展和计算流体动力学模型的成熟,火灾研究领域出现了以计算流体动力学为基础的场模型软件。场模型是将建筑空间划分成无数个控制单元,每一控制单元内假设物理参数相同,然后应用自然界普遍成立的物理学定律,推导火场需要满足的偏微分方程组,一般由以下方程组成

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1-3)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \quad (1-4)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \quad (1-5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \rho f_y$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_z \quad (1-6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) V \right] =$$

$$\rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \quad (1-7)$$

$$\frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} +$$

$$\frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \tau_{zz})}{\partial z} + \rho f \cdot V$$

$$p = \rho R T \quad (1-8)$$

$$e = c_v T \quad (1-9)$$

综合起来, 控制方程组包括 7 个方程, 即式(1-3)~式(1-9), 7 个流场参量, 分别是 ρ 、 u 、 v 、 w 、 p 、 e 、 T , 方程组为封闭方程组, 可以通过式(1-3)~式(1-9) 实现对变量的求解。

1.2 火灾模拟软件

由场模型为理论基础编制的软件即为 CFD 软件, 常用的火灾模拟软件分为两类: 通用 CFD 软件和专用火灾模型软件, 前者如 Fluent、CFX、PHOENICS、STAR-CD 等; 后者如 FDS、OpenFOAM 等。

1.2.1 PHOENICS

PHOENICS (Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series) 含义为对抛物型、双曲型和椭圆型方程进行数值积分的系列程序, 是第一款商业化的 CFD 软件。该软件所采用的一些基本算法, 如 SIMPLE 方法、混合格式等, 是由该软件的创始人, 英国的 Spalding 和美籍印度学者 Patankar 等所提出的, SIMPLE 算法在 20 世纪 70 年代已被广泛应用于热流问题求解, PHOENICS 于 1981 年开始发布第一个版本, 现由英国的 CHAM 公司开发, PHOENICS 已经发展成为一款能够模拟流体流动、传质传热、化学反应、燃烧过程的通用 CFD 软件。

该软件对偏微分方程的求解采用有限容积法, 离散格式可选择一阶迎风、混合格式及 QUICK 等, 压力与速度耦合采用 SIMPLEST 算法; 代数方程组可采用整场求解或点迭代、块迭代方法, 同时纳入了块修正以加速收敛; 在湍流模型上, 可采用零方程模型、低 Reynolds $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型等。

PHOENICS 应用流域及其广泛, 软件自带了 1000 多个算例并附有完整的输入文件, 一般的工程应用问题都可以从中找到相似案例, 这给用户带来了极大的方便。CHAM 公司把其应用范围总结为从 A 至 Z, 具体为: Aerodynamics (空气动力学)、Burner (燃烧器)、Cyclonic separation (分离器中的分离)、Duct flow (管道内流动)、Electronic Cooling (电子器件冷却)、Fire engineering (消防工程)、Geophysical study (地球物理研究)、Heat exchange (换热器)、Impeller (叶轮中的流动)、Jet (射流)、Kiln (炉室中的传热)、Lung (肺部中的流动)、Mould filling (浇铸中的充填过程)、Nozzle (喷嘴中的流动)、Oil slick (油膜运动)、Plume dispersal (尾流的扩散)、Quality of air (空气质量)、Rocker (火箭)、Stirred tank (搅拌箱中的流动)、Tundish (浇口漏斗中的场预测)、Urban pollution (城市污染预测)、Vistol aircraft (直升机流场分析)、Wet cooling tower (湿式冷却塔流场分析)、NO_x reduction (降低燃烧中 NO_x 的

分析)、Yacht (游艇四周流场分析)、Zeppelin (飞艇流场分析)。

1.2.2 FLUENT

FLUENT 是继 PHOENICS 之后美国 FLUENT Inc 于 1983 年推出的基于有限容积法的通用 CFD 仿真软件, 具有广泛的物理模型, 以及能够快速准确得到 CFD 分析结果, 被广泛应用于航空航天、旋转机械、航海、石油化工、汽车、能源、计算机/电子、材料、冶金、生物、医药等领域。FLUENT 公司成为占有最大市场份额的 CFD 软件供应商。2006 年 5 月, FLUENT 被 ANSYS 公司收购并集成到 ANSYS Workbench 环境下, 得以共享先进的 ANSYS 公共 CAE 系统。

FLUENT 采用基于完全非结构化网格的有限体积法, 采用动/变网格技术主要解决边界运动的问题。其网格变形方式有三种: 弹簧压缩式、动态铺层式以及局部网格重生式。其局部网格生成成为 FLUENT 所独有, 可用于非结构网格、大变形问题以及物体运动规律完全由流动所产生的力所决定的问题。在离散格式上, 对流项差分格式纳入了一阶迎风、中心差分及 QUICK 等格式。湍流模型有标准 $k-\epsilon$ 模型、Reynolds 应力模型、RNG $k-\epsilon$ 模型等。FLUENT 可以计算的物理问题有: 定常与非定常流动、不可压缩与可压缩流动, 含有粒子/液滴的蒸发、燃烧的过程, 多组份介质的化学反应等。

FLUENT 系列软件包括通用的 CFD 软件 FLUENT, 基于有限元法的专用于黏弹性材料的层流流动模拟软件 POLYFLOW, 基于有限元法的专用于传热传质分析的软件 FIDAP, 高度自动化的流动模拟工具 FloWizard, 专用于 CATIA 的软件 FLUENT for CATIA5, 面向暖通空调工程的 AIRPAK 软件, 专用于热控工程的 ICEPAK 和专业的搅拌槽模拟软件 MIXSIM。可以看出, FLUENT 最大的特点是功能强大。

1.2.3 CFX

CFX 是由英国 AEA Technology 公司于 1991 年推出的商用 CFD 软件。和大多数 CFD 软件不同的是, CFX 除了可以使用有限体积法, 还采用了基于有限元的有限体积法, 在保证有限体积法守恒特性的基础上, 吸收了有限元法的数值精确性。在其湍流模型中, 包括 $k-\epsilon$ 模型、低 Reynolds 数 $k-\epsilon$ 模型、低 Reynolds 数 Wilcox 模型、代数 Reynolds 应力模型、微分 Reynolds 应力模型、微分 Reynolds 通量模型、SST 模型和大涡模型。

CFX 可计算的物理问题包括可压与不可压流体、耦合传热、热辐射、多相流、粒子输送过程、化学反应和燃烧问题。还拥有诸如气蚀、凝固、沸腾、多孔介质、相间传质、非牛顿流、喷雾干燥、动静干涉、真实气体等使用的模型。目前, CFX 已经遍及航空航天、旋转机械、能源、石油化工、机械制造、汽车、