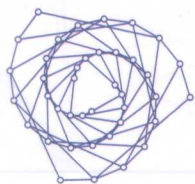


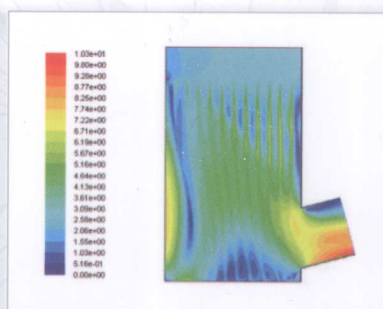
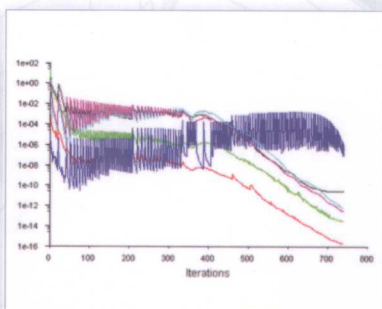
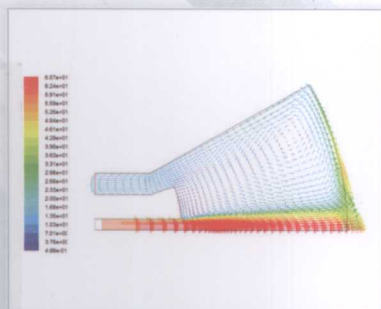



工程软件应用精解



ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册

唐家鹏 编著

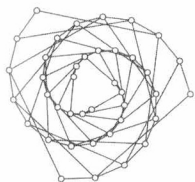


 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



工程软件应用精解



ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册

唐家鹏 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册 / 唐家鹏编著. --
北京: 人民邮电出版社, 2016. 6
ISBN 978-7-115-42204-0

I. ①A… II. ①唐… III. ①工程力学—流体力学—
有限元分析—应用软件—手册 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第093204号

内 容 提 要

本书以有限体积分析法(又称为控制容积法)为基础,结合作者多年的使用和开发经验,通过丰富的工程实例详细介绍 ANSYS FLUENT 16.0 在各个专业领域的应用。

全书分为基础和实例两个部分,共 16 章。基础部分详细介绍了流体力学的相关理论基础知识和 ANSYS FLUENT 16.0 软件,包括 FLUENT 软件、前处理、后处理、常用的边界条件等内容;实例部分包括导热问题、流体流动与传热、自然对流与辐射换热、凝固和融化过程、多相流模型、离散相、组分传输与气体燃烧、动网格问题、多孔介质内部流动与换热、UDF 基础应用和燃料电池问题等的数值模拟。本书每个实例都有详细的说明和操作步骤,读者只需按书中的方法和步骤进行软件操作,即可完成一个具体问题的数值模拟和分析,进而逐步学会 ANSYS FLUENT 16.0 软件的使用。本书光盘配有书中实例的几何模型以及实例的网格模型,方便读者查阅。

本书内容翔实,既可以作为动力、能源、水利、航空、冶金、海洋、环境、气象、流体工程等专业领域的工程技术人员参考用书,也可以作为高等院校相关专业高年级本科生、研究生的学习用书。

-
- ◆ 编 著 唐家鹏
责任编辑 王峰松
责任印制 焦志炜
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 35.75
字数: 849 千字 2016 年 6 月第 1 版
印数: 1-2 500 册 2016 年 6 月河北第 1 次印刷

定价: 89.00 元(附光盘)

读者服务热线: (010)81055410 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广字第 8052 号

前 言

流体的流动规律以三大守恒定律为基础，即质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。这些定律由数学方程组来描述，但由于这些方程组都是非线性的，对于一些复杂问题，传统的求解方法很难得到分析解。另一方面，随着计算机技术的不断发展和进步，计算流体力学（CFD）逐渐在流体力学研究领域崭露头角，它通过计算机数值计算和图像显示方法，在时间和空间上定量描述流场的数值解，从而达到研究物理问题的目的。它兼具理论性和实践性，成为继理论流体力学和实验流体力学之后的又一种重要研究手段。

CFD 软件最早于 20 世纪 70 年代诞生于美国，但其较广泛的应用是近十几年的事。目前，它已成为解决各种流体流动与传热问题的强有力工具，在水利、航运、海洋、环境、流体机械与流体工程等各种技术学科都有广泛的应用。

FLUENT 是国际上流行的商用 CFD 软件包，包含基于压力的分离求解器、基于压力的耦合求解器、基于密度的隐式求解器、基于密度的显式求解器。它具有丰富的物理模型、先进的数值方法和强大的前后处理功能，可对高超音速流场、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动/变形网格、噪声、材料加工复杂激励等流动问题进行精确的模拟，具有较高的可信度。

本书以 ANSYS FLUENT 16.0 作为软件平台，详尽地讲解了 FLUENT 软件的使用，全书共 16 章，各章的主要内容安排如下。

第 1 章：流体力学与计算流体力学基础。首先介绍了流体力学的基础理论知识，在此基础上介绍了计算流体力学的相关知识等内容。

第 2 章：FLUENT 软件介绍。讲解 FLUENT 软件的特点、FLUENT 与 ANSYS Workbench 之间的关系以及在 Workbench 中使用 FLUENT 的方法等内容，并在此基础上讲解了 FLUENT 的基本操作，最后通过一个“水流计算”的简单实例介绍了 FLUENT 的数值模拟方法。

第 3 章：前处理方法。首先简要介绍了主流前处理软件 Gambit、ANSYS ICEM CFD、TGrid、GridPro 和 Gridgen 的功能及特点，接着重点介绍了 Gambit 和 ANSYS ICEM CFD 16.0 的基本功能、基本用法和应用实例。通过实例介绍了用 Gambit 进行网格划分的基本步骤，详细介绍了用 ANSYS ICEM CFD 划分三维结构化网格的方法。

第 4 章：后处理方法。介绍了 3 种对 FLUENT 结果文件进行后处理的途径：FLUENT 内置后处理、Workbench CFD-Post 通用后处理器及 Tecplot 后处理软件，详细介绍了运用这些途径进行可视化图形处理、渲染以及图表、曲线和报告的生成方法。

第 5 章：FLUENT 中常用的边界条件。首先对 FLUENT 中提供的各种边界条件进行了分类，接着阐述了 FLUENT 中流动入口和出口边界的各种参数确定方法，重点介绍了 FLUENT 中若干种常用边界条件的使用条件及方法。

然后介绍了 FLUENT 多孔介质模型，最后通过 3 个实例进行数值模拟分析。

第 15 章：UDF 基础应用。首先介绍了 UDF（用户自定义函数）的基本用法，然后用 3 个实例演示了 UDF 在定义物性参数、求解多孔介质和定义运动参数等方面的应用。

第 16 章：燃料电池问题模拟。主要向读者介绍如何使用 FLUENT 中的燃料电池附件模块来求解单通道逆流聚合物电解质膜（PEM）燃料电池问题。

通过本书的学习，读者可以在较短时间内把握 FLUENT 16.0 软件的学习要领，掌握 FLUENT 16.0 的详细操作步骤。各章所用到的实例均可从本书的配套光盘中找到。

本书以 FLUENT 16.0 版本为基础，其操作界面与老版本有较大不同，因此对新版本的操作界面进行了详细的说明，使读者能较快地掌握新版本的特点。

本书内容丰富、结构清晰，所有实例均经过精心设计与筛选，剪表性剪，并且每个实例都通过用户图形交互界面进行全过程操作。编写本书的主要目的不是求解多么复杂的物理问题，而是让读者学习 FLUENT 软件的求解思路和数值模拟软件的求解方法，强调软件的实用性，比如导热问题的数值模拟，其求解过程并不复杂，以往的书籍很少有涉及此问题的数值模拟，但实际工程中却有广泛的应用。

本书紧跟 ANSYS 软件发展的最前沿，对目前最新版 FLUENT 16.0 软件的部分新功能进行了详细的介绍与案例分析，希望对渴望入门的读者有所帮助。

本书由唐家鹏编著，虽然作者在本书的编写过程中力求叙述准确、完善，但由于水平有限，书中欠妥之处在所难免，希望读者能够及时指出，共同促进本书质量的提高。

读者在学习过程中遇到与本书有关的问题，可以发邮件到邮箱 book_hai@126.com，或者访问博客 <http://blog.sina.com.cn/tecbook>，作者会尽快给予解答。

第 6 章：导热问题的数值模拟。介绍了导热的基础理论，即傅里叶定律，然后通过两个实例对导热问题进行具体的数值模拟分析，包括有内热源的导热问题以及钢球非稳态冷却过程的数值模拟。

第 7 章：流体流动与传热的数值模拟。首先介绍了流体的两种流动状态——层流和湍流，然后介绍了 FLUENT 中的湍流模型，包括 Spalart-Allmaras 模型、 $k-\varepsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型等。最后通过 5 个实例对其流场和温度场进行数值模拟。

其中引射器内流场、圆柱绕流和二维离心泵内流场的数值模拟属于流体流动的数值模拟；扇形教室空调通风的数值模拟属于流体流动与换热的数值模拟；埋管流固耦合换热的数值模拟属于强制对流与导热耦合的数值模拟。

第 8 章：自然对流与辐射换热的数值模拟。首先介绍了自然对流与辐射换热的理论知识，然后通过 3 个实例分别对自然对流与辐射换热进行数值模拟。

两相连方腔内自然对流换热的数值模拟，左侧高温壁面以自然对流的形式通过中间壁面向右侧壁面传热，通过数值模拟可准确预测其内部温度场、压力场和速度场。

烟道内烟气对流辐射换热的数值模拟，主要是烟气中的三原子气体、非对称结构的双原子气体等对壁面有辐射换热，通过数值模拟可准确预测其内部的温度场、速度场。

室内通风问题模拟的是在英国菲尔德 FLUENT 欧洲办事处接待区的通风问题，考虑了不同材质墙体的传热和辐射问题，同时加载了夏季的太阳模型，得到室内温度分布情况和墙面太阳热流分布。

第 9 章：凝固和融化过程的数值模拟。介绍了凝固融化模型的基础理论。然后通过一个实例对其进行数值模拟，通过数值模拟可清晰地看到融化过程固液相的变化，并计算出冰块融化所需要的时间。

第 10 章：多相流模型的数值模拟。首先介绍了多相流的基础知识，然后介绍了 FLUENT 中的 3 种多相流模型，最后通过 5 个实例进行数值模拟。

其中孔口出流、水中气泡的上升和储油罐液面问题属于 VOF 模型，气穴现象的数值模拟属于 Mixture 模型，水流对沙滩冲刷过程的数值模拟属于 Eulerian 模型。

第 11 章：离散相的数值模拟。首先介绍了离散相模型的基础知识，然后通过两个实例进行详细的数值模拟分析。

引射器离散相流场的数值模拟，是在第 7.2 节引射器内流场的基础上添加离散相模型，用于模拟其内部烟灰的流动特性；喷淋过程的数值模拟是利用离散相的喷雾模型，对喷淋过程进行数值模拟。

第 12 章：组分传输与气体燃烧的数值模拟。首先介绍了基础理论知识，然后通过 3 个实例进行数值模拟分析。

室内甲醛污染物浓度的数值模拟，利用数值模拟方法准确预测室内甲醛的浓度；焦炉煤气燃烧和预混气体化学反应的模拟，利用数值模拟方法对多组分气体燃烧进行模拟，得到其温度场、速度场和各组分的浓度场。

第 13 章：动网格问题的数值模拟。首先介绍了 FLUENT 动网格的基础理论知识，然后通过 4 个实例进行数值模拟，包括两车交会过程、运动物体强制对流换热、双叶轮旋转流场和单级轴流涡轮机模型内部流场的数值模拟。

第 14 章：多孔介质内流动与换热的数值模拟。首先介绍了多孔介质的基础理论知识，

目 录

第 1 章 流体力学与计算流体力学基础	1
1.1 流体力学基础	1
1.1.1 流体力学概述	1
1.1.2 连续介质模型	3
1.1.3 流体的基本概念及性质	3
1.1.4 流体流动分类	11
1.1.5 流体流动描述的方法	14
1.1.6 流体力学基本方程组	15
1.1.7 湍流模型	29
1.2 计算流体力学 (CFD) 基础	37
1.2.1 CFD 概述	37
1.2.2 CFD 求解力学问题的过程	38
1.2.3 CFD 数值模拟方法和分类	40
1.2.4 有限体积法计算区域的离散	42
1.2.5 有限体积法控制方程的离散	42
1.2.6 CFD 常用算法	50
1.2.7 计算域网格生成技术	61
1.3 CFD 软件的构成	62
1.3.1 前处理器	63
1.3.2 求解器	63
1.3.3 后处理器	63
1.4 常用的商业 CFD 软件	64
1.4.1 Phoenics 软件	64
1.4.2 STAR-CD 软件	64
1.4.3 ANSYS CFX 软件	65
1.4.4 ANSYS FLUENT 软件	66
1.5 本章小结	66
第 2 章 FLUENT 软件介绍	67
2.1 FLUENT 软件特点简介	67
2.1.1 网格技术	68
2.1.2 数值技术	69

2.1.3	物理模型	70
2.1.4	FLUENT 的独有特点	71
2.1.5	FLUENT 系列软件简介	72
2.2	FLUENT 16.0 的新特性	73
2.2.1	新的操作界面	73
2.2.2	功能上的改进	73
2.3	FLUENT 16.0 的功能模块	74
2.4	FLUENT 与 ANSYS Workbench	75
2.4.1	ANSYS Workbench 简介	75
2.4.2	ANSYS Workbench 的操作界面	76
2.4.3	在 ANSYS Workbench 中打开 FLUENT	77
2.5	FLUENT 16.0 的基本操作	78
2.5.1	启动 FLUENT 主程序	78
2.5.2	FLUENT 主界面	79
2.5.3	FLUENT 读入网格	79
2.5.4	检查网格	80
2.5.5	选择基本物理模型	80
2.5.6	设置材料属性	81
2.5.7	相的定义	81
2.5.8	设置计算区域条件	82
2.5.9	设置边界条件	82
2.5.10	设置动网格	83
2.5.11	设置参考值	83
2.5.12	设置算法及离散格式	83
2.5.13	设置求解参数	84
2.5.14	设置监视窗口	84
2.5.15	初始化流场	84
2.5.16	与运行计算相关的设置	85
2.5.17	保存结果	86
2.6	FLUENT 的一个简单实例	86
2.7	本章小结	93
第 3 章	前处理方法	94
3.1	常用前处理软件	94
3.1.1	Gambit	94
3.1.2	ANSYS ICEM CFD	95
3.1.3	TGrid	95
3.1.4	GridPro	96
3.1.5	Gridgen 简介	96
3.2	Gambit 的应用	97

3.2.1	Gambit 的基本功能	97
3.2.2	Gambit 的基本用法	99
3.2.3	Gambit 生成网格文件的操作步骤	107
3.2.4	Gambit 应用实例	108
3.3	ANSYS ICEM CFD 16.0 的应用	113
3.3.1	ANSYS ICEM CFD 的基本功能	113
3.3.2	ANSYS ICEM CFD 16.0 的操作界面	116
3.3.3	ANSYS ICEM CFD 16.0 的文件系统	117
3.3.4	ANSYS ICEM CFD 16.0 的操作步骤	117
3.3.5	ANSYS ICEM CFD 16.0 应用实例	119
3.4	本章小结	127
第 4 章	后处理方法	128
4.1	FLUENT 内置后处理方法	128
4.1.1	创建面	129
4.1.2	显示及着色处理	129
4.1.3	曲线绘制功能	135
4.1.4	通量报告和积分计算	136
4.2	Workbench CFD-Post 通用后处理器	138
4.2.1	启动 CFD-Post	139
4.2.2	创建位置	140
4.2.3	颜色、渲染和视图	142
4.2.4	矢量图、云图及流线的绘制	142
4.2.5	其他图形功能	144
4.2.6	变量列表与表达式列表	145
4.2.7	创建表格和图表	147
4.2.8	制作报告	149
4.2.9	动画制作	151
4.2.10	其他工具	151
4.2.11	多文件模式	152
4.3	Tecplot 的用法	153
4.3.1	概述	153
4.3.2	Tecplot 基本功能介绍	154
4.3.3	Tecplot 用法简介	160
4.3.4	Tecplot 读取 FLUENT 文件的方法	172
4.4	本章小结	173
第 5 章	FLUENT 中常用的边界条件	174
5.1	FLUENT 中边界条件的分类	174
5.2	边界条件设置及操作方法	174
5.2.1	边界条件的设置	175

5.2.2	边界条件的修改	175
5.2.3	边界条件的复制	175
5.2.4	边界的重命名	176
5.3	FLUENT 中流动出入口边界条件及参数确定	176
5.3.1	用轮廓指定湍流参量	177
5.3.2	湍流参量的估算	177
5.4	FLUENT 中常用的边界条件	179
5.4.1	压力入口边界条件	179
5.4.2	速度入口边界条件	182
5.4.3	质量入口边界条件	183
5.4.4	进风口边界条件	185
5.4.5	进气扇边界条件	185
5.4.6	压力出口边界条件	186
5.4.7	压力远场边界条件	187
5.4.8	出风口边界条件	188
5.4.9	排气扇边界条件	189
5.4.10	壁面边界条件	190
5.4.11	对称边界条件	195
5.4.12	周期性边界条件	196
5.4.13	流体区域条件	197
5.4.14	固体区域条件	198
5.4.15	出流边界条件	199
5.4.16	其他边界条件	200
5.5	本章小结	200
第 6 章	导热问题的数值模拟	201
6.1	导热问题分析概述	201
6.2	有内热源的导热问题的数值模拟	202
6.2.1	案例简介	202
6.2.2	FLUENT 中求解计算	202
6.2.3	计算结果后处理	209
6.2.4	保存数据并退出	211
6.3	钢球非稳态冷却过程的数值模拟	211
6.3.1	案例简介	211
6.3.2	FLUENT 求解计算设置	212
6.3.3	求解计算	214
6.3.4	计算结果后处理及分析	219
6.4	本章小结	221
第 7 章	流体流动与传热的数值模拟	222
7.1	流体流动与传热概述	222

7.2	引射器内流场数值模拟	224
7.2.1	案例简介	224
7.2.2	FLUENT 求解计算设置	224
7.2.3	求解计算	228
7.2.4	计算结果后处理及分析	230
7.3	扇形教室空调通风的数值模拟	232
7.3.1	案例简介	232
7.3.2	FLUENT 求解计算设置	232
7.3.3	求解计算	237
7.3.4	计算结果后处理及分析	238
7.4	埋管流固耦合换热的数值模拟	240
7.4.1	案例简介	240
7.4.2	FLUENT 求解计算设置	240
7.4.3	流场求解计算	245
7.4.4	温度场求解计算设置	246
7.4.5	温度场求解计算	248
7.4.6	计算结果后处理及分析	249
7.5	圆柱绕流流场的数值模拟	251
7.5.1	案例简介	251
7.5.2	FLUENT 求解计算设置	251
7.5.3	求解计算	254
7.5.4	计算结果后处理及分析	256
7.6	二维离心泵叶轮内流场数值模拟	258
7.6.1	案例简介	258
7.6.2	FLUENT 求解计算设置	258
7.6.3	求解计算	262
7.6.4	计算结果后处理及分析	264
7.7	本章小结	267
第 8 章	自然对流与辐射换热的数值模拟	268
8.1	自然对流与辐射换热概述	268
8.2	相连方腔内自然对流换热的数值模拟	270
8.2.1	案例简介	270
8.2.2	FLUENT 求解计算设置	270
8.2.3	求解计算	273
8.2.4	计算结果后处理及分析	275
8.3	烟道内烟气对流辐射换热的数值模拟	279
8.3.1	案例简介	279
8.3.2	FLUENT 求解计算设置	280
8.3.3	求解计算	287

8.3.4	计算结果后处理及分析	289
8.4	室内通风问题的计算实例	292
8.4.1	案例简介	292
8.4.2	FLUENT 求解计算设置	292
8.4.3	求解计算	303
8.4.4	计算结果后处理及分析	305
8.5	本章小结	308
第 9 章	凝固和融化过程的数值模拟	309
9.1	凝固和融化模型概述	309
9.2	冰融化过程的数值模拟	310
9.2.1	案例简介	310
9.2.2	FLUENT 求解计算设置	310
9.2.3	求解计算	314
9.2.4	计算结果后处理及分析	317
9.3	本章小结	318
第 10 章	多相流模型的数值模拟	319
10.1	多相流概述	319
10.2	孔口自由出流的数值模拟	321
10.2.1	案例简介	321
10.2.2	FLUENT 求解计算设置	322
10.2.3	求解计算	326
10.2.4	计算结果后处理及分析	330
10.3	水中气泡上升过程的数值模拟	333
10.3.1	案例简介	333
10.3.2	FLUENT 求解计算设置	334
10.3.3	求解计算	338
10.3.4	计算结果后处理及分析	341
10.4	水流对沙滩冲刷过程的数值模拟	343
10.4.1	案例简介	343
10.4.2	FLUENT 求解计算设置	344
10.4.3	求解计算	349
10.4.4	计算结果后处理及分析	352
10.5	气穴现象的数值模拟	354
10.5.1	案例简介	354
10.5.2	FLUENT 求解计算设置	354
10.5.3	求解计算	359
10.5.4	计算结果后处理及分析	361
10.6	液体燃料罐内部挡流板对振荡的影响模拟	362
10.6.1	实例描述	362

10.6.2	FLUENT 求解计算设置	363
10.6.3	求解计算及后处理	367
10.7	本章小结	377
第 11 章	离散相的数值模拟	378
11.1	离散相模型概述	378
11.2	引射器离散相流场的数值模拟	379
11.2.1	案例简介	379
11.2.2	FLUENT 求解计算设置	379
11.2.3	求解计算	382
11.2.4	计算结果后处理及分析	383
11.3	喷淋过程的数值模拟	385
11.3.1	案例简介	385
11.3.2	FLUENT 求解计算设置	386
11.3.3	求解计算	390
11.3.4	计算结果后处理及分析	392
11.4	本章小结	394
第 12 章	组分传输与气体燃烧的数值模拟	395
12.1	组分传输与气体燃烧概述	395
12.2	室内甲醛污染物浓度的数值模拟	397
12.2.1	案例简介	397
12.2.2	FLUENT 求解计算设置	398
12.2.3	求解计算	402
12.2.4	计算结果后处理及分析	404
12.3	焦炉煤气燃烧的数值模拟	405
12.3.1	案例简介	405
12.3.2	FLUENT 求解计算设置	406
12.3.3	求解计算	412
12.3.4	计算结果后处理及分析	414
12.4	预混气体化学反应的模拟	416
12.4.1	案例简介	416
12.4.2	FLUENT 求解计算设置	416
12.4.3	求解计算及后处理	420
12.5	本章小结	426
第 13 章	动网格问题的数值模拟	427
13.1	动网格问题概述	427
13.2	两车交会过程的数值模拟	428
13.2.1	案例简介	428
13.2.2	FLUENT 求解计算设置	429
13.2.3	求解计算	433

13.2.4	计算结果后处理及分析	437
13.3	运动物体强制对流换热的数值模拟	438
13.3.1	案例简介	438
13.3.2	FLUENT 求解计算设置	439
13.3.3	求解计算	444
13.3.4	计算结果后处理及分析	447
13.4	双叶轮旋转流场的数值模拟	448
13.4.1	案例简介	448
13.4.2	FLUENT 求解计算设置	449
13.4.3	求解计算	453
13.4.4	计算结果后处理及分析	456
13.5	单级轴流涡轮机模型内部流场模拟	458
13.5.1	案例简介	458
13.5.2	FLUENT 求解计算设置	458
13.5.3	求解计算	466
13.5.4	计算结果后处理及分析	469
13.6	本章小结	472
第 14 章	多孔介质内流动与换热的数值模拟	473
14.1	多孔介质模型概述	473
14.2	多孔烧结矿内部流动换热的数值模拟	474
14.2.1	案例简介	474
14.2.2	FLUENT 求解计算设置	474
14.2.3	求解计算	477
14.2.4	计算结果后处理及分析	481
14.3	三维多孔介质内部流动的数值模拟	483
14.3.1	案例简介	483
14.3.2	FLUENT 求解计算设置	483
14.3.3	求解计算	487
14.3.4	计算结果后处理及分析	488
14.4	催化转换器内部流动的数值模拟	490
14.4.1	案例简介	490
14.4.2	FLUENT 求解计算设置	491
14.4.3	求解计算	495
14.4.4	计算结果后处理及分析	497
14.5	本章小结	501
第 15 章	UDF 基础应用	502
15.1	UDF 介绍	502
15.1.1	UDF 的基本功能	502
15.1.2	UDF 编写基础	503

15.1.3	UDF 中的 C 语言基础	504
15.2	利用 UDF 自定义物性参数	507
15.2.1	案例简介	507
15.2.2	FLUENT 求解计算设置	508
15.2.3	求解计算	512
15.2.4	计算结果后处理及分析	513
15.3	利用 UDF 求解多孔介质问题	514
15.3.1	案例简介	514
15.3.2	FLUENT 求解计算设置	514
15.3.3	求解计算	518
15.3.4	计算结果后处理及分析	518
15.4	水中落物的数值模拟	519
15.4.1	案例简介	519
15.4.2	FLUENT 求解计算设置	519
15.4.3	求解计算	527
15.5	本章小结	532
第 16 章	燃料电池问题模拟	533
16.1	单直通道逆流 PEM 燃料电池	533
16.1.1	案例简介	533
16.1.2	GAMBIT 建模	534
16.1.3	FLUENT 求解计算设置	537
16.1.4	求解计算	540
16.1.5	计算结果后处理及分析	542
16.2	本章小结	545
附录 1	UDF 宏简列	546
附录 2	UDF 宏具体解释	547
附录 2.1	通用宏及其定义的函数	547
附录 2.2	离散相模型宏及其定义的函数	549
附录 2.3	多相模型的宏及其定义的函数	551
附录 3	UDF 的部分常用函数	552
参考文献		555

第 1 章 流体力学与计算流体力学基础

流体力学是力学的一个重要分支，它主要研究流体本身的静止状态和运动状态，以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用和流动的规律，在生活、环保、科学技术及工程中具有重要的应用价值。

计算流体力学或计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics, CFD），是用电子计算机和离散化的数值方法对流体力学问题进行数值模拟和分析的一个分支。

本章先介绍流体力学中支配流体流动的基本物理定律，然后在此基础上介绍用数值方法求解流体力学问题的基本思想，进而阐述计算流体力学的相关基础知识，最后简要介绍常用的计算流体力学商业软件。

学习目标：

- 学习流体力学的基础知识，包括基本概念和重要理论；
- 学习计算流体力学的相关理论和方法；
- 了解 CFD 软件的构成；
- 了解常用的商业 CFD 软件。

1.1 流体力学基础

流体力学是连续介质力学的一个分支，是研究流体（包含气体及液体）现象以及相关力学行为的科学。

1.1.1 流体力学概述

1738 年，伯努利在他的专著中首次采用了水动力学这个名词并作为书名；1880 年前后出现了空气动力学这个名词；1935 年以后，人们概括了这两方面的知识，建立了统一的体系，统称为流体力学。

在人们的生活和生产活动中随时随地都可遇到流体，因此流体力学是与人类日常生活和生产密切相关的。大气和水是最常见的两种流体，大气包围着整个地球，地球表面的 70% 是水面。大气运动、海水运动（包括波浪、潮汐、中尺度涡旋、环流等）乃至地球深处岩浆的流动都是流体力学的研究内容。

20 世纪初，世界上第一架飞机出现以后，飞机和其他各种飞行器得到迅速发展。20 世纪 50 年代开始的航天飞行，使人类的活动范围扩展到其他星球和银河系。航空航天事业的蓬勃发展是同流体力学的分支学科——空气动力学和气体动力学的发展紧密相联的。这些

学科是流体力学中最活跃、最富有成果的领域。

石油和天然气的开采、地下水的开发利用，要求人们了解流体在多孔或缝隙介质中的运动，这是流体力学分支之一——渗流力学研究的主要对象。渗流力学还涉及土壤盐碱化的防治，化工中的浓缩、分离和多孔过滤，燃烧室的冷却等技术问题。

燃烧离不开气体，这是有化学反应和热能变化的流体力学问题，是物理化学流体动力学的内容之一。爆炸是猛烈的瞬间能量变化和传递过程，涉及气体动力学，从而形成了爆炸力学。

沙漠迁移、河流泥沙运动、管道中的煤粉输送、化工中气体催化剂的运动等，都涉及流体中带有固体颗粒或液体中带有气泡等问题，这类问题是多相流体力学研究的范围。

等离子体是自由电子、带等量正电荷的离子以及中性粒子的集合体。等离子体在磁场作用下有特殊的运动规律。研究等离子体运动规律的学科称为等离子体动力学和电磁流体力学，它们在受控热核反应、磁流体发电、宇宙气体运动等方面有广泛的应用。

风对建筑物、桥梁、电缆等的作用使它们承受载荷和激发振动，废气和废水的排放造成环境污染，河床冲刷迁移和海岸遭受侵蚀，研究这些流体本身的运动及其同人类、动植物间的相互作用的学科称为环境流体力学（其中包括环境空气动力学、建筑空气动力学）。这是一门涉及经典流体力学、气象学、海洋学和水力学、结构动力学等学科的新兴边缘学科。

生物流变学研究人体或其他动植物中有关的流体力学问题。例如血液在血管中的流动，心、肺、肾中的生理流体运动和植物中营养液的输送。此外，还研究鸟类在空中的飞翔，动物在水中的游动等。

因此，流体力学既包含自然科学的基础理论，又涉及工程技术科学方面的应用。

目前，研究流体力学问题的方法有理论分析研究、实验模拟研究和数值模拟方法研究3种。

流体力学理论分析的一般过程是：建立力学模型，用物理学基本定律推导流体力学数学方程，用数学方法求解方程，然后检验和解释求解结果。理论分析结果能揭示流动的内在规律，物理概念清晰，物理规律能公式化，具有普遍适用性，但分析范围有限，只能分析简单的流动。而且，线性问题能得到结果，非线性问题分析非常困难。

实验研究的一般过程是：在相似理论的指导下建立模拟实验系统，用流体测量技术测量流动参数，处理和分析实验数据。

典型的流体力学实验有风洞实验、水洞实验、水池实验等。测量技术有热线、激光测速，粒子图像、迹线测速，高速摄影，全息照相，压力密度测量等。现代测量技术在计算机、光学和图像技术配合下，在提高空间分辨率和实时测量方面已取得长足进步。

实验结果能反映工程中的实际流动规律，发现新现象，检验理论结果等，现象直观，测试结果可靠。但流体的实验研究对测试设备要求较高，设计制造周期长，且调试复杂。实验研究的方法只能得到有限的实验数据，真实模拟物理问题比较困难。

数值研究的一般过程是：对流体力学数学方程进行简化和数值离散化，编制程序进行数值计算，将计算结果与实验结果比较。

常用的数值模拟方法有有限差分法、有限元法、有限体积法、边界元法、谱分析法等。计算的内容包括飞机、汽车、河道、桥梁、涡轮机等流场的计算，湍流、流动稳定性、非