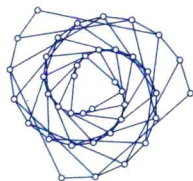


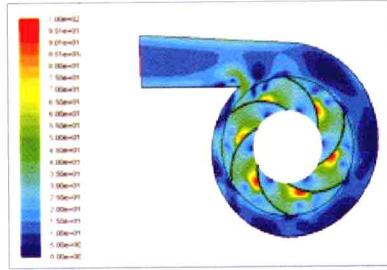
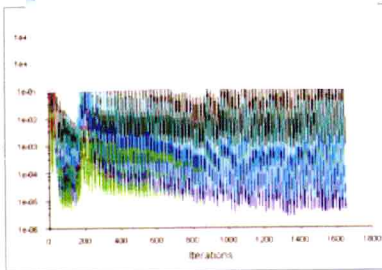
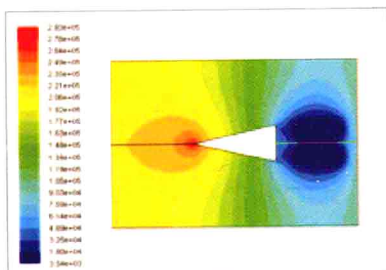


工程软件应用精解



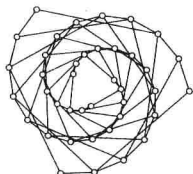
FLUENT 14.0 超级学习手册

唐家鹏 编著





工程软件应用精解



FLUENT 14.0 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 (CIP) 数据

FLUENT 14.0 超级学习手册 / 唐家鹏编著. -- 北京:
人民邮电出版社, 2013.4
ISBN 978-7-115-30925-9

I. ①F… II. ①唐… III. ①流体力学—工程力学—
计算机仿真—应用软件 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第018305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 FLUENT 14.0 在各个专业领域的应用。

全书分为基础和实例两个部分,共 14 章。基础部分详细介绍了流体力学的相关理论基础知识和 FLUENT 14.0 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、动网格问题和多孔介质内部流动与换热等的数值模拟。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 FLUENT 14.0 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。

本书内容详实,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。

FLUENT 14.0 超级学习手册

- ◆ 编 著 唐家鹏
责任编辑 王峰松
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 29.75
字数: 706 千字
印数: 1-3 000 册
- 2013 年 4 月第 1 版
2013 年 4 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-30925-9

定价: 69.00 元(附光盘)

读者服务热线: (010)67132692 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 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，计算流体动力学（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 14.0 作为软件平台，详尽地讲解了 FLUENT 软件的使用，全书共 14 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，在此基础上介绍了流体力学的重要分支——计算流体力学相关知识等内容。

第 2 章：FLUENT 软件。介绍了 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 的基本操作方法，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 14.0 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，接着介绍了 FLUENT 中若干种常用边界条件的使用条件及方法。

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、 $k-\epsilon$ 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:自然对流和辐射换热的数值模拟。首先介绍了自然对流和辐射换热的理论知识。然后通过两个实例分别对自然对流和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以及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。

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 4 个实例进行数值模拟。其中孔口出流和水中气泡的上升属于 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 Euler 模型。

第11章:离散相的数值模拟。首先介绍了离散模型的基础知识,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 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。首先介绍基础理论知识,然后通过两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;焦炉煤气燃烧的数值模拟,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 3 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和双叶轮旋转流场的数值模拟。

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,然后介绍了 FLUENT 多孔介质模型,最后通过两个实例进行数值模拟分析。

通过本书的学习,读者可以在较短时间内把握 FLUENT 14.0 软件的学习要领,掌握 FLUENT 14.0 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 14.0 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 14.0 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，另外乔建军、孙国强、温正、代晶、凌桂龙、高飞、张樱枝、孔玲军、张建伟、白海波、李昕、史洁玉、刘成柱、贺碧蛟、石良臣、柯维娜等人也为本书的编写提供了大量的帮助，在此一并表示感谢。

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，希望读者和同仁能够及时指出，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>，编者会尽快给予解答。

编者

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.....	30
1.2 计算流体力学 (CFD) 基础.....	39
1.2.1 CFD 概述.....	39
1.2.2 CFD 求解力学问题的过程.....	39
1.2.3 CFD 数值模拟方法和分类.....	42
1.2.4 有限体积法计算区域的离散.....	44
1.2.5 有限体积法控制方程的离散.....	45
1.2.6 CFD 常用算法.....	52
1.2.7 计算域网格生成技术.....	65
1.3 CFD 软件的构成.....	66
1.3.1 前处理器.....	67
1.3.2 求解器.....	67
1.3.3 后处理器.....	67
1.4 常用的商业 CFD 软件.....	68
1.4.1 Phoenix 软件.....	68
1.4.2 STAR-CD 软件.....	68
1.4.3 ANSYS CFX 软件.....	69
1.4.4 ANSYS FLUENT 软件.....	70
1.5 本章小结.....	70
第 2 章 FLUENT 软件介绍.....	71
2.1 FLUENT 软件特点简介.....	71
2.1.1 网格技术.....	72

2.1.2	数值技术	73
2.1.3	物理模型	74
2.1.4	FLUENT 的独有特点	75
2.1.5	FLUENT 系列软件简介	76
2.2	FLUENT 14.0 的新特性	77
2.2.1	新的操作界面	77
2.2.2	功能上的改进	77
2.3	FLUENT 14.0 的功能模块	78
2.4	FLUENT 与 ANSYS Workbench	79
2.4.1	ANSYS Workbench 简介	79
2.4.2	ANSYS Workbench 的操作界面	80
2.4.3	在 ANSYS Workbench 中打开 FLUENT	81
2.5	FLUENT 14.0 的基本操作	82
2.5.1	启动 FLUENT 主程序	82
2.5.2	FLUENT 主界面	83
2.5.3	FLUENT 读入网格	84
2.5.4	检查网格	84
2.5.5	选择基本物理模型	85
2.5.6	设置材料属性	85
2.5.7	相的定义	86
2.5.8	设置计算区域条件	86
2.5.9	设置边界条件	87
2.5.10	设置动网格	87
2.5.11	设置参考值	88
2.5.12	设置算法及离散格式	88
2.5.13	设置求解参数	88
2.5.14	设置监视窗口	89
2.5.15	初始化流场	89
2.5.16	与运行计算相关的设置	90
2.5.17	保存结果	91
2.6	FLUENT 的一个简单实例	91
2.7	本章小结	98
第 3 章 前处理方法		99
3.1	常用前处理软件	99
3.1.1	Gambit	99
3.1.2	ANSYS ICEM CFD	100
3.1.3	TGrid	100
3.1.4	GridPro	101

3.1.5	GridGEn 简介	101
3.2	Gambit 的应用	102
3.2.1	Gambit 的基本功能	102
3.2.2	Gambit 的基本用法	104
3.2.3	Gambit 生成网格文件的操作步骤	112
3.2.4	Gambit 应用实例	114
3.3	ANSYS ICEM CFD 14.0 的应用	118
3.3.1	ANSYS ICEM CFD 基本功能	118
3.3.2	ANSYS ICEM CFD 14.0 的操作界面	121
3.3.3	ANSYS ICEM CFD 14.0 的文件系统	122
3.3.4	ANSYS ICEM CFD 14.0 的操作步骤	123
3.3.5	ANSYS ICEM CFD 14.0 应用实例	124
3.4	本章小结	132
第 4 章	后处理方法	133
4.1	FLUENT 内置后处理方法	133
4.1.1	创建面	134
4.1.2	显示及着色处理	135
4.1.3	曲线绘制功能	140
4.1.4	通量报告和积分计算	141
4.2	Workbench CFD-Post 通用后处理器	144
4.2.1	启动 CFD-Post	144
4.2.2	创建位置	145
4.2.3	颜色、渲染和视图	148
4.2.4	矢量图、云图及流线的绘制	148
4.2.5	其他图形功能	149
4.2.6	变量列表与表达式列表	150
4.2.7	创建表格和图表	152
4.2.8	制作报告	155
4.2.9	动画制作	156
4.2.10	其他工具	157
4.2.11	多文件模式	157
4.3	Tecplot 的用法	158
4.3.1	概述	158
4.3.2	Tecplot 基本功能介绍	159
4.3.3	Tecplot 用法简介	165
4.3.4	Tecplot 读取 FLUENT 文件的方法	178
4.4	本章小结	179

第 5 章 FLUENT 中常用的边界条件	180
5.1 FLUENT 中边界条件的分类	180
5.2 边界条件设置及操作方法	180
5.2.1 边界条件的设置	181
5.2.2 边界条件的修改	181
5.2.3 边界条件的复制	181
5.2.4 边界的重命名	182
5.3 FLUENT 中流动出入口边界条件及参数确定	182
5.3.1 用轮廓指定湍流参量	183
5.3.2 湍流参量的估算	183
5.4 FLUENT 中常用的边界条件	186
5.4.1 压力入口边界条件	186
5.4.2 速度入口边界条件	188
5.4.3 质量入口边界条件	190
5.4.4 进气口边界条件	191
5.4.5 进气扇边界条件	192
5.4.6 压力出口边界条件	193
5.4.7 压力远场边界条件	194
5.4.8 通风口边界条件	196
5.4.9 排气扇边界条件	196
5.4.10 壁面边界条件	197
5.4.11 对称边界条件	203
5.4.12 周期性边界条件	204
5.4.13 流体区域条件	205
5.4.14 固体区域条件	206
5.4.15 出流边界条件	207
5.4.16 其他边界条件	208
5.5 本章小结	209
第 6 章 导热问题的数值模拟	210
6.1 导热问题分析概述	210
6.2 有内热源的导热问题的数值模拟	211
6.2.1 案例简介	211
6.2.2 FLUENT 中求解计算	211
6.2.3 计算结果后处理	219
6.2.4 保存数据并退出	222
6.3 钢球非稳态冷却过程的数值模拟	222
6.3.1 案例简介	222

6.3.2	FLUENT 求解计算设置	222
6.3.3	求解计算	225
6.3.4	计算结果后处理及分析	230
6.4	本章小结	232
第 7 章	流体流动与传热的数值模拟	233
7.1	流体流动与传热概述	233
7.2	引射器内流场数值模拟	235
7.2.1	案例简介	235
7.2.2	FLUENT 求解计算设置	236
7.2.3	求解计算	239
7.2.4	计算结果后处理及分析	241
7.3	扇形教室空调通风的数值模拟	243
7.3.1	案例简介	243
7.3.2	FLUENT 求解计算设置	244
7.3.3	求解计算	249
7.3.4	计算结果后处理及分析	250
7.4	地埋管流固耦合换热的数值模拟	252
7.4.1	案例简介	252
7.4.2	FLUENT 求解计算设置	252
7.4.3	流场求解计算	257
7.4.4	温度场求解计算设置	259
7.4.5	温度场求解计算	261
7.4.6	计算结果后处理及分析	261
7.5	圆柱绕流流场的数值模拟	263
7.5.1	案例简介	263
7.5.2	FLUENT 求解计算设置	264
7.5.3	求解计算	267
7.5.4	计算结果后处理及分析	269
7.6	二维离心泵叶轮内流场数值模拟	272
7.6.1	案例简介	272
7.6.2	FLUENT 求解计算设置	272
7.6.3	求解计算	277
7.6.4	计算结果后处理及分析	278
7.7	本章小结	281
第 8 章	自然对流与辐射换热的数值模拟	282
8.1	自然对流与辐射换热概述	282
8.2	相连方腔内自然对流换热的数值模拟	284

8.2.1	案例简介	284
8.2.2	FLUENT 求解计算设置	284
8.2.3	求解计算	287
8.2.4	计算结果后处理及分析	290
8.3	烟道内烟气对流辐射换热的数值模拟	294
8.3.1	案例简介	294
8.3.2	FLUENT 求解计算设置	295
8.3.3	求解计算	302
8.3.4	计算结果后处理及分析	305
8.4	本章小结	307
第 9 章	凝固和融化过程的数值模拟	308
9.1	凝固和融化模型概述	308
9.2	冰融化过程的数值模拟	309
9.2.1	案例简介	309
9.2.2	FLUENT 求解计算设置	309
9.2.3	求解计算	313
9.2.4	计算结果后处理及分析	316
9.3	本章小结	317
第 10 章	多相流模型的数值模拟	318
10.1	多相流概述	318
10.2	孔口自由出流的数值模拟	320
10.2.1	案例简介	320
10.2.2	FLUENT 求解计算设置	321
10.2.3	求解计算	325
10.2.4	计算结果后处理及分析	329
10.3	水中气泡上升过程的数值模拟	332
10.3.1	案例简介	332
10.3.2	FLUENT 求解计算设置	333
10.3.3	求解计算	336
10.3.4	计算结果后处理及分析	340
10.4	水流对沙滩冲刷过程的数值模拟	342
10.4.1	案例简介	342
10.4.2	FLUENT 求解计算设置	343
10.4.3	求解计算	348
10.4.4	计算结果后处理及分析	351
10.5	气穴现象的数值模拟	353
10.5.1	案例简介	353

10.5.2	FLUENT 求解计算设置	354
10.5.3	求解计算	358
10.5.4	计算结果后处理及分析	360
10.6	本章小结	362
第 11 章	离散相的数值模拟	363
11.1	离散相模型概述	363
11.2	引射器离散相流场的数值模拟	364
11.2.1	案例简介	364
11.2.2	FLUENT 求解计算设置	364
11.2.3	求解计算	367
11.2.4	计算结果后处理及分析	368
11.3	喷淋过程的数值模拟	370
11.3.1	案例简介	370
11.3.2	FLUENT 求解计算设置	371
11.3.3	求解计算	375
11.3.4	计算结果后处理及分析	377
11.4	本章小结	379
第 12 章	组分传输与气体燃烧的数值模拟	380
12.1	组分传输与气体燃烧概述	380
12.2	室内甲醛污染物浓度的数值模拟	382
12.2.1	案例简介	382
12.2.2	FLUENT 求解计算设置	383
12.2.3	求解计算	387
12.2.4	计算结果后处理及分析	389
12.3	焦炉煤气燃烧的数值模拟	390
12.3.1	案例简介	390
12.3.2	FLUENT 求解计算设置	391
12.3.3	求解计算	397
12.3.4	计算结果后处理及分析	399
12.4	本章小结	401
第 13 章	动网格问题的数值模拟	402
13.1	动网格问题概述	402
13.2	两车交会过程的数值模拟	403
13.2.1	案例简介	403
13.2.2	FLUENT 求解计算设置	404
13.2.3	求解计算	409

13.2.4 计算结果后处理及分析	412
13.3 运动物体强制对流换热的数值模拟	413
13.3.1 案例简介	413
13.3.2 FLUENT 求解计算设置	414
13.3.3 求解计算	419
13.3.4 计算结果后处理及分析	422
13.4 双叶轮旋转流场的数值模拟	423
13.4.1 案例简介	423
13.4.2 FLUENT 求解计算设置	424
13.4.3 求解计算	428
13.4.4 计算结果后处理及分析	431
13.5 本章小结	433
第 14 章 多孔介质内流动与换热的数值模拟	434
14.1 多孔介质模型概述	434
14.2 多孔烧结矿内部流动换热的数值模拟	435
14.2.1 案例简介	435
14.2.2 FLUENT 求解计算设置	436
14.2.3 求解计算	439
14.2.4 计算结果后处理及分析	442
14.3 三维多孔介质内部流动的数值模拟	444
14.3.1 案例简介	444
14.3.2 FLUENT 求解计算设置	445
14.3.3 求解计算	448
14.3.4 计算结果后处理及分析	450
14.4 本章小结	451
附录 1 UDF 宏简列	452
附录 2 UDF 宏具体解释	453
附录 2.1 通用宏及其定义的函数	453
附录 2.2 离散相模型宏及其定义的函数	455
附录 2.3 多相模型的宏及其定义的函数	457
附录 3 UDF 的部分常用函数	458
参考文献	461

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事业密切相关的。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）乃至地球深处熔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连的。这些

学科是流体力学中最活跃、最富有成果领域。

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、非线性流动等的数值模拟。大型工程计算软件已成为研究工程流动问题的有力武器。数值模拟方法的优点是能计算理论分析方法无法求解的数学方程（适用于线性和非线性问题），能处理各种复杂流动问题，比实验方法省时省钱。但毕竟是一种近似解方法，适用范围受数学模型的正确性和计算机的性能所限制。

流体力学的3种研究方法各有优缺点，在实际研究流体力学问题时，应结合实际问题，取长补短，互为补充和印证。

1.1.2 连续介质模型

如固体一样，流体也是由大量的分子组成的，而分子间都存在比分子本身尺度大得多的间隙，同时，由于每个分子都在不停地运动，因此，从微观的角度看，流体的物理量在空间分布上是不连续的，且随时间不断变化。

在流体力学中仅限于研究流体的宏观运动，其特征尺寸（如日常见到的是米、厘米、毫米那样的量级）比分子自由程大得多。描述宏观运动的物理参数，是大量分子的统计平均值，而不是个别分子的值。在这种情形下，流体可近似用连续介质模型处理。

连续介质模型认为，物质连续地分布于其所占有的整个空间，物质宏观运动的物理参数是空间及时间的可微连续函数。

根据连续介质模型假设，可以把流体介质的一切物理属性，如密度、速度、压强等都看做是空间的连续函数。因而，对于连续介质模型，微积分等现代数学工具可以加以应用。

连续介质模型假设成立的条件是建立在流体平均自由程远远小于物体特征尺寸的基础上的，即

$$L \gg \lambda \quad 1-1$$

在式 1-1 中， L 为求解问题中物体或空间的特征尺寸； λ 为流体分子的平均自由程。

在某些情况下，例如，在 120 km 的高空，如果空气分子的平均自由程和飞行器的特征尺寸在同一数量级，连续介质模型假设就不再成立。这时，必须把空气看成是不连续的介质，这个范围属于稀薄空气动力学范畴。

1.1.3 流体的基本概念及性质

1. 密度

流体的密度定义为单位体积所含物质的多少，以 ρ 表示。密度是流体的一种固有物理属性，国际单位为 kg/m^3 。对于均质流体，设其体积为 V ，质量为 m ，则其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad 1-2$$

对于非均质流体，不同位置的密度不同。若取包含某点的流体微团，其体积为 ΔV ，质量为 Δm ，则该点的密度定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad 1-3$$

液体和气体的密度可以查询相关手册，这里为了方便读者，表 1-1 给出部分常见液体和气体的密度。