

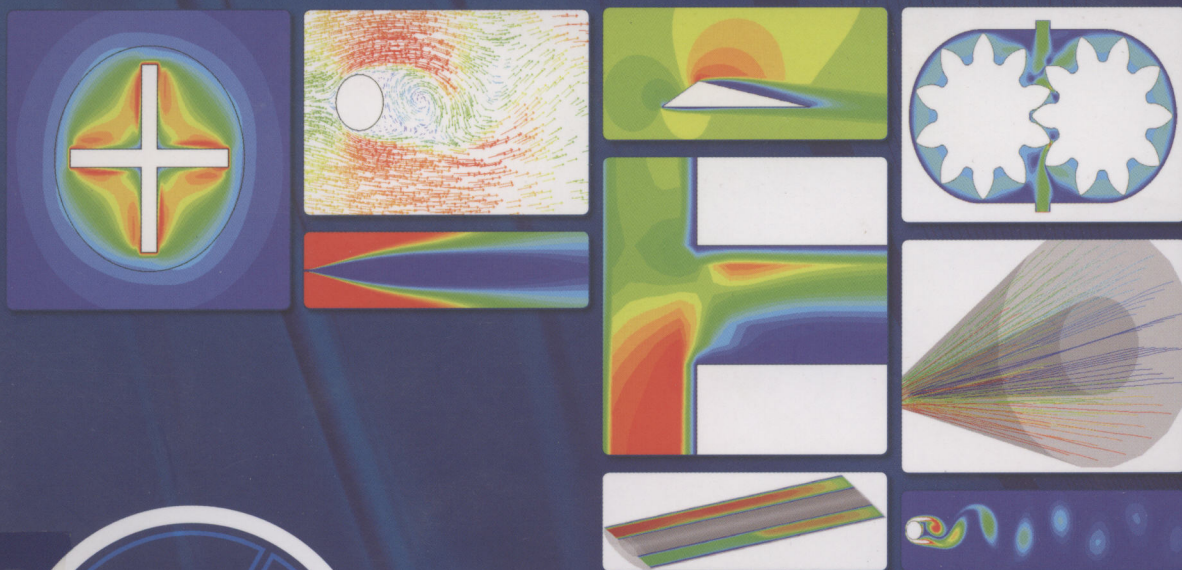
知名专家 赵振兴、郭建春、敬加强、黄坤、陈小榆

倾力推荐

FLUENT

流体分析及仿真 实用教程

■ 朱红钧 林元华 谢龙汉 编著



附 **DVD** 教学光盘

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

FLUENT⁵³

流体分析及仿真 实用教程

■ 朱红钧 林元华 谢龙汉 编著

TB126-39

2842

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

FLUENT流体分析及仿真实用教程 / 朱红钧, 林元华, 谢龙汉编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2010.4
ISBN 978-7-115-22526-9

I. ①F… II. ①朱… ②林… ③谢… III. ①流体力学: 工程力学—计算机仿真—应用软件, Fluent—教材
IV. ①TB126-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第040571号

内 容 提 要

FLUENT 是 CFD 软件中相对成熟和运用最为广泛的商业软件。本书以 FLUENT 6.3.26 版本为蓝本, 由浅入深、循序渐进地介绍了利用 FLUENT 进行流体分析与仿真的各部分知识, 包括前处理网格生成、湍流模型、传热分析、非定常流动问题、多相流模型、转动模型、组分输运与化学反应模型、流动分析后处理、UDF 使用及编写等。全书通过基础知识和实例介绍相结合的方式讲解了从数值建模到计算后处理各部分操作的基本方法和步骤, 最后以综合实例的方式进一步向读者介绍了典型工程问题的流体分析及仿真方法。

本书可作为水利、土木、石工、储运、航空、能源、环境、机械、建筑、海工、材料、动力、冶金等专业的研究生和本科生的计算流体力学教材, 同时也可作为 CFD 相关领域专业技术人员的参考用书。

FLUENT 流体分析及仿真实用教程

- ◆ 编 著 朱红钧 林元华 谢龙汉
责任编辑 李永涛
- ◆ 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 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
中国铁道出版社印刷厂印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 25
字数: 610 千字
印数: 1—3 500 册
- 2010 年 4 月第 1 版
2010 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-22526-9

定价: 58.00 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

拓技工作室

主编：谢龙汉

编委：林 伟 魏艳光 林木议 郑 晓 吴 苗

林树财 林伟洁 王悦阳 辛 栋 刘艳龙

伍凤仪 张 磊 刘平安 鲁 力 张桂东

邓 奕 马双宝 王 杰 刘江涛 陈仁越

邓小玲 刘庆国 戴晓霞 应 鹏 赵新宇

莫 衍 朱小远 彭 勇 潘晓烨 耿 煜

刘新东 尚 涛 张炯明 李 翔 朱红钧

邱 婉 唐培培 刘文超 刘新让 林元华

序

CFD 是进行传热、传质、动量传递及燃烧、多相流和化学反应研究的核心和重要技术,广泛应用于航天设计、汽车设计、生物医学工业、化工处理工业、涡轮机设计、半导体设计、HAVC&R 等诸多工程领域。

流体分析的理论方法和实验方法存在较大的局限,发展得相当缓慢,而随着计算机技术的高速发展,CFD 技术开始作为主要的流体分析方法,并在我国得到了飞速的发展。CFD 方法具有成本低和能模拟较复杂或较理想过程等优点。经过一定考核的 CFD 软件可以拓宽实验研究的范围,减少成本昂贵的实验工作量。在给定的参数下用计算机对现象进行一次数值模拟相当于进行一次数值实验,历史上也曾有过首先由 CFD 数值模拟发现新现象而后由实验予以证实的例子。CFD 软件一般都能推出多种优化的物理模型,如定常和非定常流动、层流、紊流、不可压缩和可压缩流动、传热、化学反应等。对每一种物理问题的流动特点,都有适合它的数值解法,用户可对显式或隐式差分格式进行选择,以期在计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳。CFD 软件之间可以方便地进行数值交换,并采用统一的前、后处理工具,这就省却了科研工作者在计算机数据衔接方法、编程、前后处理等方面投入的重复、低效的劳动,而可以将主要精力和智慧用于物理问题本身的探索上。

自从 1981 年英国 CHAM 公司首先推出求解流动与传热问题的商业软件 PHOENICS 以来,迅速在国际软件产业中形成了通称为 CFD 软件的市场。到今天,全世界至少已有 50 余种这样的流动与传热问题的商业软件,在促进 CFD 技术应用于工业实际中起了很大的作用。在 CFD 软件中,FLUENT 软件是目前国内外使用最多、最流行的商业软件之一。FLUENT 的软件设计基于“CFD 计算机软件群的概念”,针对每一种流动的物理问题的特点,采用适合于它的数值解法在计算速度、稳定性和精度等各方面达到最佳。

FLUENT 软件包含有结构化及非结构化网格两个版本。在结构化网格版本中有适体坐标的前处理软件,同时也可以纳入 I-DEAS、PATRAN、ANSYS 和 ICEMCFD 等著名生成网格的软件所产生的网格。速度与压力耦合采用同位网格上的 SIMPLEC 算法。对流项差分格式纳入了一阶迎风、中心差分及 QUICK 等格式。FLUENT 软件可用来模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动。由于采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术,因而 FLUENT 能达到最佳的收敛速度和求解精度。灵活的非结构化网格和基于解的自适应网格技术及成熟的物理模型,使 FLUENT 在转捩与湍流、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、燃料电池等方面有广泛应用。

本书作者从理论、工程实例分析、模型设置、计算方法等各个方面系统阐述了 FLUENT 在流体分析及仿真领域的运用,书中 12 章依次介绍了计算流体力学理论、流体流动分析概述、前处理网格生成、湍流模型、传热分析、非定常流动问题、多相流模型、转动模型、组分输运与化学反应模型、流动分析后处理、UDF 使用及编写、典型工程实例等内容。书中配备了算例文件及屏录,能够较快地帮助读者学会并熟悉 FLUENT 的操作流程,掌握 FLUENT 的相关模型去解决实际工程问题。

谨祝本书与您分享的 FLUENT 流体分析与仿真技术能够帮助你在 CFD 研究领域有深入的拓展！

CFD 软件及流动分析的应用领域, 重点介绍 CFD 软件在船舶工程中的应用。本书可作为高等院校船舶工程及相关专业教材, 也可供从事船舶工程工作的工程技术人员参考。

全国首届教学名师
河海大学流体力学教授

河海大学水力学及流体力学中心主任
教育部高校力学教学指导委员会委员

2010年2月于南京

关于本书

内容和特点

计算流体力学是计算流体动力学的简称, 英文名为 **Computational Fluid Dynamics** (缩写为 **CFD**)。它是基于离散化的数值计算方法, 利用电子计算机对流体相对于不同固体边界的内外流场进行数值模拟和分析的学科, 属于流体力学的一个分支。由于流体流动的复杂性, 理论分析尚无法求得详细的解析解, 计算流体力学正是弥补此不足而于 20 世纪 60 年代发展起来的, 并相应地形成了各种数值解法, 主要包括有限差分法、有限元法和有限体积法。

随着计算机技术的高速发展, 关于计算流体力学数值计算的软件也逐渐兴起, 自 1981 年以来, 出现了如 **PHOENICS**、**CFX**、**STAR-CD**、**FIDAP**、**FLUENT** 等多个商用 **CFD** 软件。这些商用软件在工程界正发挥着越来越大的作用。其中, **FLUENT** 是 **CFD** 软件中相对成熟和运用最为广泛的商业软件。它基于有限体积法对计算区域进行离散, 用户可以根据实际情况选择相应的算法对离散后的控制方程组进行求解。

FLUENT 是一个用于模拟和分析复杂几何区域内的流体流动与传热现象的专用软件, 它提供了灵活的网格特性, 可以支持多种网格, 且以用户界面友好而著称, 所以对初学者来说非常容易上手。**FLUENT** 的软件设计基于 **CFD** 软件群的思想, 从用户需求角度出发, 针对各种复杂流动的物理现象, 采用不同的离散格式和数值方法, 在特定领域内使计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳组合, 从而高效率地解决各个领域复杂流动问题的计算。

FLUENT 软件的不断完善与更新, 使得其不仅作为一个研究工具, 而且还作为设计工具在水利工程、土木工程、石油工程、天然气工程、环境工程、食品工程、海洋结构工程等领域发挥着巨大的作用。

正是因为 **FLUENT** 在流体工程模拟计算中发挥着重要的作用, 流体分析与设计的相关行业人员及科技工作者对于学习 **FLUENT** 的热情都很高, 所以作者结合自身的教学及工作经验, 编写了这本 **FLUENT** 流体分析及仿真, 本书在编写的过程中突出了以下特点。

- (1) 直观易懂: 全书以图解实例的形式介绍基础知识和实例操作, 所有的实例操作过程都有图片介绍, 直观易懂, 使用户能够在最短的时间内获取知识。
- (2) 实用性: 全书采用了基础知识介绍和实例操作相结合的方法, 互相补充, 书本上的实例大多来源于生产实例, 并且从用户的角度出发进行了简化和改进, 同时在各内容关键处给予了有益的提示和指导, 使用户在学完本书后能够快速地将知识应用于生产实践。
- (3) 结构清晰, 讲解详尽: 全书采用基础知识—实训实例—综合实例的循序渐进的讲解方法, 一步步地提高用户的 **FLUENT** 流体分析方法, 而且每个知识点和实例都做了尽可能详细的讲解, 使用户学习起来轻松自如。
- (4) 多媒体示范: 本书的配套光盘中提供了所有实例的视频操作, 用户可以在观看视频的过程中增强对知识点的理解。

本书共分为 12 章, 依次介绍了计算流体力学理论、流体流动分析概述、前处理网格生成、湍流模型、传热分析、非定常流动问题、多相流模型、转动模型、组分输运与化学反应模型、流动分析后处理、**UDF** 使用及编写、典型工程实例等内容。

- 第 1 章 计算流体力学理论。介绍流体力学的一些基本理论、计算流体力学的基本方程及 FLUENT 的计算原理。
- 第 2 章 流体流动分析概述。介绍流体流动分析的发展, 涉及 CFD 的概念、CFD 软件及流动分析的应用领域, 重点介绍 CFD 软件中运用最为广泛的 FLUENT 软件及其功能、运行方法和用户界面, 并配有简单实例。
- 第 3 章 前处理网格生成。介绍网格生成的方法及 GAMBIT 软件的用户界面, 详细讲解了 GAMBIT 的操作步骤, 并配有实例。
- 第 4 章 湍流模型。介绍常用的湍流模型, 以及利用 FLUENT 进行湍流流动模拟的操作过程, 并配有实例。
- 第 5 章 传热分析。介绍传热的各种方法和应用领域, 以及利用 FLUENT 进行传热分析的操作过程, 并配有实例。
- 第 6 章 非定常流动问题。介绍非定常流动问题的概念, 以及如何在 FLUENT 中进行非定常流动问题的计算, 并配有实例。
- 第 7 章 多相流模型。介绍常见的几种多相流模型——VOF 模型、Mixture 模型和 Euler 模型, 以及 FLUENT 中多相流模型的计算过程, 并配有实例。
- 第 8 章 转动模型。介绍 FLUENT 中用于模拟移动和变形区域的流体流动问题的动参考系模型、滑移网格模型及动网格模型, 并配有实例。
- 第 9 章 组分输运与化学反应模型。介绍利用 FLUENT 求解组分输运与化学反应问题, 并配有实例。
- 第 10 章 流动分析后处理。针对流动分析后处理的需要, 介绍利用 FLUENT 及 Tecplot 进行模拟结果后处理的操作过程, 并配有实例。
- 第 11 章 UDF 使用及编写。介绍 UDF 的基础知识, UDF 宏及 UDF 的解释与编译, 并配有实例讲解 UDF 的基本使用方法。
- 第 12 章 典型工程实例。结合石油天然气、环境、机械等工程领域的典型问题进行 FLUENT 流体分析及仿真的介绍, 并配有实例。

光盘说明

本书配套 1 张多媒体 DVD 光盘, 主要内容介绍如下。

1. 本书是基于 FLUENT 6.3.26 版本进行写作的, 读者需要以不低于上述版本打开文件。
2. 光盘上的文件是只读文件, 因此, 需要将光盘上的源文件复制到电脑硬盘上, 取消文件的“只读”属性, 方能进行修改。
3. Ch*文件夹, 其中*号代表某个数字, 与本书的章对应, 其中的文件是该章中使用到的文件, 包括本书中所有操作实例的结果文件, 对应文中的  源文件。
4. Ch*文件夹中的 AVI 文件夹用于存放本书所有操作实例的操作录像, 对应文中的  动画演示, 直接双击需要播放的文件即可观看。

西南石油大学朱红钧编写了书中第 3~12 章, 并对全书进行了统稿。西南石油大学林元华教授编写了第 1~2 章, 进行了全书的修改与完善, 并在编写过程中提供了全面的技术支持和充分的指导。香港中文大学谢龙汉博士对本书进行了校对和完善。另外, 本书还得到了

人民邮电出版社的大力支持，在此一并致以深深的谢意！同时也非常感谢仿真科技论坛、工程流体网、流体中文网的广大网友的帮助和支持。

限于编写水平，且时间仓促，书中难免有疏漏之处，望广大读者给予指正。读者可通过电子邮件 swputicky@126.com 或者 reader.toptech@gmail.com 与我们交流，不胜感谢！

朱红钧

2010年2月于成都

目录

第1章 计算流体力学理论	1
1.1 流体力学基本理论	1
1.1.1 研究对象	2
1.1.2 流体的物理性质	2
1.1.3 流体的分类	4
1.1.4 作用于流体上的力	5
1.1.5 流体流动的描述	6
1.1.6 流体流动的分类	8
1.1.7 气体动力学基础	9
1.2 计算流体力学基本方程	13
1.2.1 流体力学的连续性方程	13
1.2.2 流体力学的动量方程	14
1.2.3 流体力学的能量方程	17
1.2.4 流体力学基本方程的初始及边界条件	17
1.3 FLUENT 原理	19
1.3.1 有限体积法	19
1.3.2 流体区域离散	19
1.3.3 流场迭代求解方法	24
1.4 本章小结	35
第2章 流体流动分析概述	36
2.1 流动分析的发展	37
2.1.1 CFD 的提出	37
2.1.2 CFD 软件简介	38
2.1.3 流动分析的应用领域	39
2.2 FLUENT 软件简介	40
2.2.1 FLUENT 软件功能	41
2.2.2 UNIX 版本运行方法	43
2.2.3 Windows 版本运行方法	43
2.2.4 并行计算运行方法	43
2.2.5 FLUENT 的文件类型	44
2.3 FLUENT 的操作界面	45
2.3.1 图形用户界面	45
2.3.2 文本用户界面	48
2.3.3 图形控制及鼠标使用	49
2.4 本章小结	61

第3章 前处理网格生成	62
3.1 网格生成方法	63
3.1.1 结构化网格	63
3.1.2 非结构化网格	64
3.1.3 混合网格	66
3.2 网格生成前处理软件 GAMBIT	67
3.2.1 GAMBIT 基本界面	67
3.2.2 GAMBIT 的鼠标用法	72
3.2.3 GAMBIT 几何建模	74
3.2.4 GAMBIT 网格划分	82
3.2.5 GAMBIT 边界定义	88
3.2.6 与 CAD 软件的衔接	91
3.3 本章小结	104
第4章 湍流模型	105
4.1 常见的湍流模型	106
4.2 一方程模型	107
4.3 $k-\varepsilon$ 模型	107
4.4 RSM 模型	110
4.5 LES 模型	111
4.6 本章小结	131
第5章 传热分析	132
5.1 传热方法	133
5.1.1 热传导	133
5.1.2 热对流	134
5.1.3 热辐射	135
5.2 传热分析的应用及方法	137
5.3 本章小结	168
第6章 非定常流动问题	169
6.1 概述	170
6.2 非定常流动的分析过程	170
6.3 本章小结	185
第7章 多相流模型	186
7.1 VOF 模型	187
7.1.1 VOF 模型的局限	187
7.1.2 VOF 模型的设置	187
7.2 Mixture 模型	188

7.2.1 Mixture 模型的局限	188
7.2.2 Mixture 模型的设置	189
7.3 Euler 模型	189
7.3.1 Euler 模型的局限	189
7.3.2 Euler 模型的设置	190
7.4 多相流模型的选择与设置	190
7.4.1 多相流模型选择的基本原则	190
7.4.2 混合模型和欧拉模型的选择细则	191
7.5 本章小结	220
第 8 章 转动模型	221
8.1 动参考系模型	222
8.1.1 动参考系模型概述	222
8.1.2 动参考系模型的设置	222
8.2 滑移网格模型	224
8.2.1 滑移网格模型概述	224
8.2.2 滑移网格模型的设置	225
8.3 动网格模型	226
8.3.1 动网格模型概述	226
8.3.2 动网格模型的设置	227
8.4 本章小结	252
第 9 章 组分输运与化学反应模型	253
9.1 概述	254
9.2 反应模型	254
9.3 通用有限速率模型	254
9.4 本章小结	277
第 10 章 流动分析后处理	278
10.1 FLUENT 后处理	279
10.1.1 FLUENT 的图形及可视化技术	279
10.1.2 FLUENT 的数据显示与文字报告	285
10.2 Tecplot 后处理	295
10.2.1 Tecplot 界面	296
10.2.2 Tecplot 读取 FLUENT 文件数据	297
10.2.3 Tecplot 绘图环境设置	299
10.2.4 Tecplot 图形及可视化技术	301
10.3 本章小结	314

第 11 章 UDF 使用及编写	315
11.1 用户自定义函数	316
11.1.1 UDF 概述	316
11.1.2 网格拓扑	317
11.1.3 数据类型	317
11.2 UDF 宏	318
11.2.1 访问 FLUENT 变量的预定义宏	318
11.2.2 实用工具宏	323
11.2.3 常用 DEFINE 宏	333
11.3 UDF 的解释与编译	336
11.3.1 UDF 的解释	336
11.3.2 UDF 的编译	336
11.4 本章小结	345
第 12 章 典型工程实例	346
12.1 T 型管内气液分离流动模拟	347
12.2 空气钻井环空气固两相流动模拟	355
12.3 气井井下节流流场模拟	365
12.4 齿轮泵内流体流动模拟	375
12.5 本章小结	388
第 13 章 传热分析	391
13.1 传热方法	391
13.1.1 热传导	391
13.1.2 热对流	391
13.1.3 热辐射	391
13.2 传热分析的应用及方法	397
13.3 本章小结	397
第 14 章 非定常流动问题	401
14.1 概述	401
14.2 非定常流动的分析过程	401
14.3 本章小结	401
第 15 章 多相流模型	406
15.1 VOF 模型	406
15.1.1 VOF 模型的局限	406
15.1.2 VOF 模型的设置	407
15.2 Mixture 模型	408

第 1 章

计算流体力学理论

计算流体力学是计算流体动力学的简称，是基于离散化的数值计算方法，利用电子计算机对流体相对于不同固体边界的内外流场进行数值模拟和分析的学科，属于流体力学的一个分支。由于流体流动的复杂性，理论分析无法求得详细的解析解，计算流体力学正是为弥补此不足而于 20 世纪 60 年代发展起来的，并相应地形成了各种数值解法，主要包括有限差分法、有限元法和有限体积法。流体力学运动偏微分方程有椭圆型、抛物型、双曲型和混合型之分，计算流体力学很大程度上就是针对不同性质的偏微分方程采用并发展了相应的数值解法。

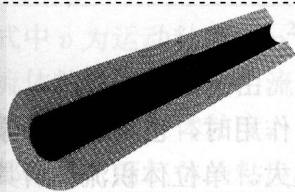
随着计算机技术的高速发展，关于计算流体力学数值计算的软件也逐渐兴起，其中 FLUENT 是 CFD 软件中相对成熟和运用最为广泛的商业软件。它基于有限体积法对计算区域进行离散，用户可以根据实际情况选择相应的算法对离散后的控制方程组进行求解。

本章主要介绍流体力学的一些基本理论、计算流体力学的基本方程及 FLUENT 的计算原理，帮助读者熟悉相关的基础理论与概念，了解 FLUENT 的基本原理，从而为进一步学习 FLUENT 的实际操作设置、数值计算运行、结果分析与整理打下基础。



本章要点

- 计算流体力学理论基础。
- 计算流体力学基本方程。
- FLUENT 流体分析基本原理。



1.1 流体力学基本理论

流体是指在任何微小切应力作用下都会发生连续不断变形的物质，这种连续不断的变形称为流动。流体与固体的区别在于，当施加一定外力时，固体也要发生变形，但变形量达到一定程度时其内部的变形抗力就会阻止固体继续变形，因此，固体能承受压力、拉力、切力，不呈现流动性，而流体不能在承受剪切力的同时，使自己保持静止的状态。

流体力学就是以流体为研究对象，研究其平衡、运动时宏观物理量（具有大量流体分子统计平均特性）的变化规律，及流体与固体之间相互作用的力学特点的一门学科。计算流体力学则主要利用数值计算方法来完成流体力学的研究任务，属于流体力学的分支。在利用计算流体力学方法进行流体流动的数值仿真之前，应首先了解流体力学相关的基本理论。

1.1.1 研究对象

流体由分子组成，分子之间有间距、不连续。由于我们研究的是平衡、运动时流体宏观物理量的变化规律及流体与固体之间的相互作用力，若通过研究分子运动来研究流体的运动是极其复杂且无此必要的。

一、流体质点

流体力学研究的对象是流体宏观物理量，因此研究的最小单元不是分子，而是具有确定统计平均特性且体积很小的（流体微团）流体质点。它具有“宏观小”、“微观大”的性质。

用一杯水打比方，流体质点的尺寸相对于杯子的特征长度 L 或 D 都小得多，但是相对于一个分子的长度来讲又大得多。

二、连续介质模型

连续介质模型是将流体视为没有空隙的由流体质点充满它所占据的整个空间的一种连续介质，且其所有的物理量都是空间坐标和时间的连续函数的一种假设模型。

把流体看作连续介质的单元体，则反映宏观流体的各种物理量都是空间坐标和时间的连续函数，这样就可以引用连续函数的解析方法来研究流体平衡和运动状态下有关物理参数之间的数量关系。

注意：当所研究的工程实际尺寸与分子的自由行程为相同或相近的数量级时，就不能应用连续介质模型，如稀薄气体。

1.1.2 流体的物理性质

流体具有惯性、压缩性、膨胀性、粘性和表面张力特性等物理性质，其中粘性是其区别于固体的一个重要的物理性质。

一、惯性

惯性是物质保持原有运动状态的特性，即使流体在不受外力作用时，也具有保持原有运动状态的属性。质量是流体惯性大小的量度，质量越大，惯性越大。单位体积流体所具有的质量称为密度，表达式如下：

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

式中 ρ 为流体密度 (kg/m^3)， m 为流体质量 (kg)， V 为流体体积 (m^3)。

二、压缩性

流体的压缩性是指温度不变的条件下，流体体积和密度随所受压力的变化而变化的性

质。可用体积压缩率来度量压缩性的大小，即压强增大一个单位值时，流体体积的相对减小值，表达式如下：

$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1-2)$$

式中 β 为体积压缩率 (Pa^{-1})， p 为所受的外部压强 (Pa)。

三、膨胀性

流体的膨胀性为压强不变时，体积随温度而变化的性质。与压缩性类似，用温度变化 1K 时体积的相对变化来表示膨胀性的大小，表达式如下：

$$\alpha_v = \frac{dV/V}{dT} \quad (1-3)$$

式中 α_v 为体胀系数 (K^{-1})， T 为流体温度 (K)。

四、粘性

粘性是流体区别于固体的一个重要性质，它是指流体在运动状态下具有抵抗剪切变形的能力。体现为流体流动时，流体层内部出现内摩擦力，阻碍质点做相对运动。此内摩擦力又称为切应力，其大小可由牛顿内摩擦定律计算得出：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式中 τ 为切应力 (Pa)， μ 为流体动力粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)， du/dy 为速度梯度 (s^{-1})。

注意：速度梯度实质上是流体运动时的剪切变形角速度，即流体的切应力与剪切变形角速度成正比。

表征流体粘性的物理量称为粘度，分为动力粘度 μ 与运动粘度 ν 两种，表达式如下：

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad (1-5)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-6)$$

式中 ν 为运动粘度 (m^2/s)。

流体粘性的本质是由流动流体的内聚力和分子动量交换引起的。一般在相同条件下，液体的粘度要大于气体粘度，并随着温度和压强的变化而变化。随着温度的升高，所有液体的粘度都减小，而气体的粘度增大。这是由于液体分子间距较小，相互吸引力即内聚力较大，粘性主要由内聚力造成。随着温度升高，分子间距增大，内聚力减小，从而使液体粘度减小。气体分子间距大，内聚力很小，粘性主要是气体分子动量交换的结果。温度升高时，气体分子运动加快，分子的动量交换速率加剧，切应力随之增加，从而造成粘度的增加。

五、表面张力特性

液体表面由于分子引力（分子间的内聚力）不均衡而产生的沿表面作用于任一界线上的张力，称为表面张力。如自由表面上，气体分子内聚力与液体分子内聚力有显著差别，使液

体分子有向内部收缩倾向，这一性质称为表面张力特性。

细管插入液体时，表面张力会使管中的液体自动上升或下降一个高度，这就是由于表面张力作用而导致的毛细现象。当液体与固体壁面接触时，若固体壁面吸附力大于液体内部聚力，则液体与固体壁面的接触面有扩大的趋势，称为浸润现象（如水），反之称为不浸润现象（如水银）。

由于表面张力很小，一般情况下可以忽略不计，但在液体中模拟气泡运动时需要考虑表面张力的作用。

1.1.3 流体的分类

根据流体的压缩性、粘性等物理性质可以对流体进行下面 3 种分类。

一、可压缩流体与不可压缩流体

根据流体压缩性的大小，可以将流体分为可压缩流体与不可压缩流体。密度随压强变化较大且不可视为常数的流体，称为可压缩流体；反之，密度随压强变化很小且可视为常数的流体，称为不可压缩流体。

除了水击现象外，一般液流运动均可视为不可压缩流体进行分析计算。低速气体（ $v < 50\text{m/s}$ ）也可视为不可压缩流体，这是由于低速气体的压力和温度在整个流动过程中变化很小，它的重度和密度变化也很小，可近似看成常数。而高速气流则需考虑密度变化的影响，作为可压缩流体来处理。

二、理想流体与实际流体

根据是否考虑流体的粘性，把流体分为理想流体与实际流体两类。在理论研究的初期，学者们通常将流体看作没有粘性，即理想流体来考虑，大大简化了问题。而我们现在进行流体运动仿真时通常需要考虑流体的粘性，即当成实际流体处理，这样的模拟结果更贴近实际。

三、牛顿流体与非牛顿流体

根据流体是否满足牛顿内摩擦定律，可以把流体分为牛顿流体与非牛顿流体。

符合牛顿内摩擦定律，切应力与速度梯度成正比的流体为牛顿流体。切应力与速度梯度不符合线性分布，不满足牛顿内摩擦定律的流体为非牛顿流体，其又可分为塑性流体、假塑性流体与膨胀性流体 3 种，如图 1-1 所示。

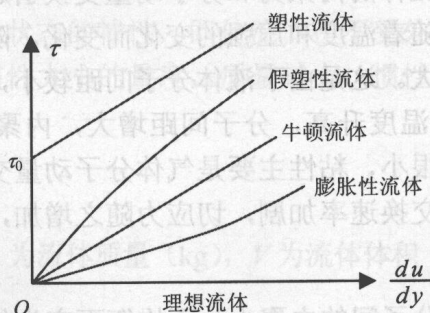


图 1-1 流变曲线