

知名 敬加强 熊友明 倾力  
专家 杨 志 陈小榆 推荐

FLUENT CFD

工程仿真  
实战指南

朱红钧 编著

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

 DVD  
教学光盘



# FLUENT CFD

## 工程仿真 实战指南

朱红钧 编著

人民邮电出版社  
北京



## 图书在版编目 (C I P) 数据

FLUENT CFD工程仿真实战指南 / 朱红钧编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2014.9  
ISBN 978-7-115-36377-0

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第174536号

## 内 容 提 要

FLUENT 为通用的 CFD 软件包, 已在石油工程领域有广泛应用, 可以模拟地层、井筒及地面集输管线内的油、气、水、泥浆、非牛顿流体等的流动情况, 也可以开展石油工程领域相关工具的基于流场分布的结构优化设计, 如节流阀、整流器、旋流器、分离器等。本书将以 FLUENT 14.5 为蓝本, 列举利用 FLUENT 解决石油工程领域所遇实际问题的思路及过程。全书以“功能讲解+思路分析+应用过程+视频讲解”的方式, 通过大量实例全面介绍 FLUENT 在石油工程中的应用。

本书可作为核工业、石油化工、机械制造、能源、管道集输等领域研究人员的参考书, 也可作为 FLUENT 14.5 自学者提高与进阶的学习宝典, 还可作为各大院校教育、培训机构的专业教材。

---

◆ 编 著 朱红钧

责任编辑 李永涛

责任印制 杨林杰

◆ 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>

北京鑫正大印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 22.75

字数: 554 千字

2014 年 9 月第 1 版

印数: 1-3 000 册

2014 年 9 月北京第 1 次印刷

---

定价: 59.00 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: 京崇工商广字第 0021 号

## 序

CFD 软件能够开展传热、传质及燃烧、多相流和化学反应等数值仿真，覆盖管道设计、海工管道设计、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、半导体设计等诸多工程领域。由于理论分析和实验方法存在一定的限制，因此 CFD 技术在最近 20 年得到了飞速的发展。随着当今世界对能源需求的逐渐增加，对各种资源特别是石油天然气资源的有效利用及开发就显得至关重要，但物理实验研究的局限性使得该方向的发展缓慢；此外，随着安全意识的提高，管柱、集输管道与流体机械的设计及运用的要求越来越高，而利用 CFD 技术设计管道及机械或者利用 CFD 方法进行模拟，不仅可以发挥其成本低且安全有效的优点，并且可以模拟较复杂或较危险的过程。

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。并且 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方法、编程、前后处理等方面投入的重复、低效的劳动，而将主要精力和智慧用于物理问题本身的探索上。

FLUENT 软件设计基于“CFD 计算机软件群的概念”，针对每一种流动问题的特点，采用适合于它的数值解法，在计算速度、稳定性和精度等方面达到优化。FLUENT 是目前相对成熟且使用广泛的商用流体分析软件，已在石油工程领域有广泛应用，可以模拟地层、井筒、地面集输管线内的油、气、水、泥浆、非牛顿流体等的流动情况，也可以开展石油工程领域相关工具的基于流场分布的结构优化设计。本书的立意主要集中 FLUENT 软件在石油工程领域运用中所遇到的前沿问题的解决方法，针对石油钻井工程、采油工程、油气田地面工程、海洋油气工程、石油机械工程、石油井下工具设备等石油工程各子领域面临的油、气、水、泥浆、非牛顿流体等流动问题，进行数值仿真计算的详细介绍。本书必将是工程运用及研究教学很好的参考资料，尤其适用于石油工程领域的行业人员、科技工作者及在校学生。

本书通过对 FLUENT 14.5 软件的运用，列举利用 FLUENT 解决石油工程领域所遇实际问题的思路及过程。全书共分为 8 章，依次介绍了计算流体力学基础、FLUENT 14.5 简介、模拟计算前处理、模拟计算后处理、钻井工程中的应用、采油气工程中的应用、油气田地面工程中的应用、海洋油气工程中的应用，涵盖了 FLUENT 基本原理，计算前后处理软件，FLUENT 自身功能介绍，以及石油工业钻、采、输三大工程，海洋油气工程这一新兴领域。其中，书中配备的实例文件及视频教学文件，能够较大限度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。

谨祝本书能够帮助你在 CFD 工程仿真领域有深入的拓展！

赵振兴

流体力学教授

2014 年 6 月于南京

## 关于本书

能源需求局势的日趋紧张，必然伴随着石油、天然气资源的有效利用及开发，而物理实验研究的局限性使得该方向的发展缓慢；此外，随着安全意识的提高，管柱、集输管道与流体机械的设计及运用的要求越来越高，而利用 CFD 技术设计管道及机械是成本低且安全有效的方法。因此，该领域急需大量的流体数值分析人才。

FLUENT 是目前相对成熟且使用广泛的商用流体分析软件。石油工业领域已开始运用 CFD 技术解决相关工程的实际问题，但国内外至今还没有统一的教材及参考资料，摸索过程费时费力，且得不到理想的计算结果。本书的立意主要集中在 CFD 软件（FLUENT）在石油工程领域运用中所遇到的前沿问题的解决方法，针对石油钻井工程、采油工程、油气田地面工程、海洋油气工程、石油机械工程、石油井下工具设备等石油工程各子领域面临的油、气、水、泥浆、非牛顿流体等流动问题，进行数值仿真计算的详细介绍。本书必将是工程运用及研究教学很好的参考资料，尤其适用于石油工程领域的行业人员、科技工作者及在校学生。

## 内容和特点

本书以 FLUENT 14.5 为蓝本，列举 CFD 技术在石油工程领域所遇实际问题的解决思路及运用过程，涵盖了 FLUENT 基本原理，计算前后处理软件，FLUENT 自身功能介绍，以及石油工业钻、采、输三大工程，海洋油气工程这一新兴领域。

全书分为 8 章，主要内容介绍如下。

- 第 1 章：计算流体力学基础。
- 第 2 章：FLUENT 14.5 简介。
- 第 3 章：模拟计算前处理。
- 第 4 章：模拟计算后处理。
- 第 5 章：钻井工程中的应用。
- 第 6 章：采油气工程中的应用。
- 第 7 章：油气田地面工程中的应用。
- 第 8 章：海洋油气工程中的应用。

本书在编写过程中突出了以下特点。

- 全书以图解实例的形式介绍典型实例操作，直观易懂，使用户能够在最短的时间内获取知识。
- 全书采用了操作界面及功能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。
- 全书采用“功能、实例、视频”循序渐进的讲解方法，一步步提高用户的 FLUENT 流体分析能力，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。




- 全书录制视频，将功能讲解、实例讲解等全部内容，按照上课教学的形式录制成多媒体视频，让读者如临教室，学习效果更好。

## 读者对象

本书可作为核工业、石油化工、机械制造、能源、管道集输等领域研究人员的参考书，也可作为 FLUENT 14.5 自学者提高与进阶的学习宝典，还可作为各大院校教育、培训机构的专业教材。

## 附盘内容及用法

本书配有 1 张多媒体 DVD，其主要内容和注意事项介绍如下。

1. 本书是基于 FLUENT 14.5 版本进行写作的，读者需要以不低于上述版本的软件打开文件。
2. 由于光盘是只读文件，因此，需要将光盘上的源文件复制到计算机硬盘上，并取消文件的“只读”属性，导入方能进行修改。
3. START 文件夹用于存放操作实例的起始文件，对应文中的  起始文件。END 文件夹用于存放操作实例的结果文件，对应文中的  结果文件。AVI 文件夹用于存放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。
4. Ch\*文件夹的\*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相关文件，包括本书中所有操作实例的起始文件、结果文件和视频文件。

**注意：**播放文件前要安装配套光盘根目录下的“tsc.exe”插件。

全书由西南石油大学朱红钧编著。另外，西南石油大学 CNPC“石油管工程”重点实验室的研究生冯光、戚兴、韩青华、马粤和赵洪南参与了部分模拟操作和文档整理工作。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 SimWe 仿真科技论坛、工程流体网论坛、流体论坛广大网友的帮助和支持。

限于编者水平，且时间仓促，书中难免有疏漏之处，望广大读者给予指正。也期待读者通过电子邮件 (swputicky@126.com) 与我们交流！

朱红钧

2014 年 6 月于成都

## 目 录

<b>第 1 章 计算流体力学基础</b> .....	<b>1</b>
1.1 流体力学基本理论.....	1
1.1.1 流体的物理性质.....	1
1.1.2 流体的分类.....	4
1.1.3 作用于流体上的力.....	5
1.2 CFD 基本方程.....	6
1.2.1 流体力学的连续性方程.....	6
1.2.2 流体力学的动量方程.....	6
1.2.3 流体力学的能量方程.....	8
1.2.4 湍流模型.....	8
1.2.5 气体状态方程.....	14
1.2.6 初始条件与边界条件.....	15
1.3 流体分析的发展.....	17
1.3.1 CFD 的提出.....	17
1.3.2 通用 CFD 软件现状.....	17
1.3.3 CFD 数值计算过程.....	19
1.3.4 CFD 应用领域.....	20
1.4 小结.....	21
<b>第 2 章 FLUENT 14.5 简介</b> .....	<b>22</b>
2.1 FLUENT 14.5 软件特性.....	22
2.1.1 FLUENT 软件特性.....	22
2.1.2 FLUENT 14.5 的新特性.....	23
2.2 FLUENT 14.5 的操作界面.....	28
2.2.1 FLUENT 14.5 的打开.....	28
2.2.2 FLUENT 14.5 图形界面.....	28
2.2.3 FLUENT 14.5 文本界面.....	32
2.3 FLUENT 14.5 基本操作.....	32
2.3.1 图形控制及鼠标使用.....	32
2.3.2 网格读入.....	33
2.3.3 模型设置.....	34
2.3.4 材料属性设置.....	35
2.3.5 计算域材料选择.....	35
2.3.6 流体相设置.....	36
2.3.7 边界条件设置.....	36
2.3.8 参考值设置.....	36

2.3.9	算法设置 .....	37
2.3.10	监视参数设置 .....	37
2.3.11	计算初始化设置 .....	38
2.3.12	迭代计算设置 .....	38
2.3.13	结果查看 .....	39
2.3.14	结果保存 .....	39
2.4	FLUENT 14.5 模型 .....	40
2.4.1	湍流模型 .....	40
2.4.2	传热模型 .....	40
2.4.3	多相流模型 .....	41
2.4.4	离散相模型 .....	42
2.4.5	组分输运与化学反应模型 .....	42
2.4.6	凝固与融化模型 .....	43
2.4.7	声学模型 .....	43
2.4.8	动网格模型 .....	44
2.4.9	UDF 的使用 .....	45
2.5	FLUENT 14.5 基础实例演示 .....	46
2.5.1	案例简介与思路分析 .....	46
2.5.2	几何建模 .....	47
2.5.3	网格划分 .....	47
2.5.4	FLUENT 中的求解设置 .....	49
2.5.5	结果后处理与分析 .....	53
2.6	小结 .....	54
<b>第 3 章</b>	<b>模拟计算前处理 .....</b>	<b>55</b>
3.1	Gambit 2.4.6 的应用 .....	55
3.1.1	Gambit 2.4.6 基本界面 .....	55
3.1.2	Gambit 2.4.6 几何建模 .....	57
3.1.3	Gambit 2.4.6 网格划分 .....	60
3.1.4	Gambit 2.4.6 基础实例演示 .....	63
3.2	ICEM CFD 14.5 的应用 .....	68
3.2.1	ICEM CFD 14.5 基本界面 .....	68
3.2.2	ICEM CFD 14.5 几何建模 .....	70
3.2.3	ICEM CFD 14.5 网格划分 .....	70
3.2.4	ICEM CFD 14.5 基础实例演示 .....	72
3.3	小结 .....	75
<b>第 4 章</b>	<b>模拟计算后处理 .....</b>	<b>76</b>
4.1	FLUENT 内置后处理 .....	76



4.1.1	图形显示 .....	76
4.1.2	曲线绘制 .....	80
4.1.3	报告分析 .....	81
4.1.4	数据输出 .....	82
4.2	Tecplot 后处理 .....	83
4.2.1	数据输入 .....	83
4.2.2	图形显示 .....	84
4.3	CFD-Post 通用后处理 .....	89
4.3.1	图形绘制 .....	90
4.3.2	曲线绘制 .....	91
4.3.3	报告制作 .....	92
4.4	小结 .....	92
<b>第 5 章 钻井工程中的应用 .....</b>		<b>93</b>
5.1	概述 .....	93
5.2	空气钻井环空气固两相流动模拟 .....	96
5.2.1	案例简介与思路分析 .....	96
5.2.2	几何建模 .....	97
5.2.3	网格划分 .....	99
5.2.4	FLUENT 中的求解设置 .....	100
5.2.5	结果后处理与分析 .....	108
5.3	气侵过程环空气液两相流动模拟 .....	110
5.3.1	案例简介与思路分析 .....	110
5.3.2	几何建模 .....	112
5.3.3	网格划分 .....	114
5.3.4	FLUENT 中的求解设置 .....	116
5.3.5	结果后处理与分析 .....	122
5.4	井底喷嘴射流分析 .....	123
5.4.1	案例简介与思路分析 .....	123
5.4.2	几何建模 .....	125
5.4.3	网格划分 .....	128
5.4.4	FLUENT 中的求解设置 .....	131
5.4.5	结果后处理与分析 .....	135
5.5	泡沫冲砂洗井模拟 .....	138
5.5.1	案例简介与思路分析 .....	138
5.5.2	几何建模 .....	140
5.5.3	网格划分 .....	143
5.5.4	FLUENT 中的求解设置 .....	145
5.5.5	结果后处理与分析 .....	150

5.6 小结.....	152
<b>第6章 采油气工程中的应用 .....</b>	<b>153</b>
6.1 概述.....	153
6.2 井下节流流场与温度场模拟.....	155
6.2.1 案例简介与思路分析.....	155
6.2.2 几何建模.....	156
6.2.3 网格划分.....	157
6.2.4 FLUENT 中的求解设置.....	158
6.2.5 结果后处理与分析.....	162
6.3 文丘里管内原油流动分析.....	163
6.3.1 案例简介与思路分析.....	163
6.3.2 几何建模.....	165
6.3.3 网格划分.....	168
6.3.4 FLUENT 中的求解设置.....	169
6.3.5 结果后处理与分析.....	171
6.4 T型管内天然气流动分析.....	172
6.4.1 案例简介与思路分析.....	172
6.4.2 几何建模.....	173
6.4.3 网格划分.....	176
6.4.4 FLUENT 中的求解设置.....	178
6.4.5 结果后处理与分析.....	180
6.5 上升管内油气两相流动模拟.....	180
6.5.1 案例简介与思路分析.....	180
6.5.2 几何建模.....	181
6.5.3 网格划分.....	182
6.5.4 FLUENT 中的求解设置.....	183
6.5.5 结果后处理与分析.....	186
6.6 井口采油树油流流场模拟.....	187
6.6.1 案例简介与思路分析.....	187
6.6.2 几何建模.....	188
6.6.3 网格划分.....	189
6.6.4 FLUENT 中的求解设置.....	192
6.6.5 结果后处理与分析.....	196
6.7 油管接头J型区涡流场模拟.....	199
6.7.1 案例简介与思路分析.....	199
6.7.2 几何建模.....	200
6.7.3 网格划分.....	201
6.7.4 FLUENT 中的求解设置.....	202

6.7.5	结果后处理与分析 .....	209
6.8	小结 .....	212
<b>第 7 章 油气田地面工程中的应用 .....</b>		<b>213</b>
7.1	概述 .....	214
7.2	突变管内油水两相流动分析 .....	216
7.2.1	案例简介与思路分析 .....	216
7.2.2	几何建模 .....	217
7.2.3	网格划分 .....	217
7.2.4	FLUENT 中的求解设置 .....	218
7.2.5	结果后处理与分析 .....	222
7.3	弯管内油水两相流动分析 .....	223
7.3.1	案例简介与思路分析 .....	223
7.3.2	几何建模 .....	224
7.3.3	网格划分 .....	227
7.3.4	FLUENT 中的求解设置 .....	229
7.3.5	结果后处理与分析 .....	232
7.4	节流阀内油品流动分析 .....	233
7.4.1	案例简介与思路分析 .....	233
7.4.2	几何建模 .....	234
7.4.3	网格划分 .....	235
7.4.4	FLUENT 中的求解设置 .....	236
7.4.5	结果后处理与分析 .....	239
7.5	输气管道泄漏扩散分析 .....	240
7.5.1	案例简介与思路分析 .....	240
7.5.2	几何建模 .....	242
7.5.3	网格划分 .....	242
7.5.4	FLUENT 中的求解设置 .....	243
7.5.5	结果后处理与分析 .....	247
7.6	热油管道温降分析 .....	248
7.6.1	案例简介与思路分析 .....	248
7.6.2	几何建模 .....	249
7.6.3	网格划分 .....	251
7.6.4	FLUENT 中的求解设置 .....	253
7.6.5	结果后处理与分析 .....	259
7.7	油水分离器仿真模拟 .....	260
7.7.1	案例简介与思路分析 .....	260
7.7.2	几何建模 .....	262
7.7.3	网格划分 .....	268

7.7.4	FLUENT 中的求解设置	268
7.7.5	结果后处理与分析	272
7.8	液固两相流冲刷腐蚀模拟	275
7.8.1	案例简介与思路分析	275
7.8.2	几何建模	276
7.8.3	网格划分	277
7.8.4	FLUENT 中的求解设置	278
7.8.5	结果后处理与分析	282
7.9	甲烷燃烧器模拟	283
7.9.1	案例简介与思路分析	284
7.9.2	几何建模	284
7.9.3	网格划分	285
7.9.4	FLUENT 中的求解设置	286
7.9.5	结果后处理与分析	291
7.10	小结	292
<b>第 8 章</b>	<b>海洋油气工程中的应用</b>	<b>293</b>
8.1	概述	293
8.2	海洋平台桩基冲刷分析	295
8.2.1	案例简介与思路分析	295
8.2.2	几何建模	296
8.2.3	网格划分	298
8.2.4	FLUENT 中的求解设置	300
8.2.5	结果后处理与分析	305
8.3	海洋立管绕流分析	307
8.3.1	案例简介与思路分析	307
8.3.2	几何建模	308
8.3.3	网格划分	309
8.3.4	FLUENT 中的求解设置	310
8.3.5	结果后处理与分析	313
8.4	二维数值造波	314
8.4.1	案例简介与思路分析	314
8.4.2	几何建模	315
8.4.3	网格划分	316
8.4.4	FLUENT 中的求解设置	317
8.4.5	结果后处理与分析	324
8.5	平台储罐天然气泄漏扩散模拟	327
8.5.1	案例简介与思路分析	327
8.5.2	几何建模	329

8.5.3	网格划分 .....	331
8.5.4	FLUENT 中的求解设置 .....	332
8.5.5	结果后处理与分析 .....	339
8.6	水力旋流器油水分离模拟 .....	340
8.6.1	案例简介与思路分析 .....	341
8.6.2	几何建模 .....	342
8.6.3	网格划分 .....	344
8.6.4	FLUENT 中的求解设置 .....	346
8.6.5	结果后处理与分析 .....	349
8.7	小结 .....	351

# 第1章 计算流体力学基础

流体力学和其他学科一样，最早主要通过理论分析和实验研究两种手段得以不断发展。理论分析是依据数学方法来求解问题的解析解，但能用这种方法求出结果的问题毕竟是少数。实验研究主要是进行原型或模型的参数监测，通过有限的点数据来反映流体的流动情况。然而，实验总会存在误差，得到的数据不能覆盖全局。随着计算机仿真技术的高速发展，计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）作为流体力学的一个分支应运而生。它以高性能计算机为工作平台，依据科学的数值算法对流体力学的控制方程进行迭代求解，旨在得到计算域中流场各参数的全局分布情况。计算流体力学在近二十年得到了飞速的发展，弥补了原先理论分析的不足，替代了高风险、高成本的实验研究，实现了流体力学发展质的改变。本章将对计算流体力学基础做一个全面的介绍，帮助读者在学习软件之前掌握其内在的基本理论。



## 本章内容

- 流体力学基本理论。
- CFD 基本方程。
- 流体分析的发展。

## 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、剪力，不呈现流动性，而流体不能在承受剪切应力的同时使自己保持静止的状态。

流体力学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。计算流体力学即是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 流体的物理性质

流体具有惯性、压缩性、膨胀性、黏性和表面张力特性等物理性质，其中黏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，表达式为

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

式中： $\rho$  为流体密度， $\text{kg/m}^3$ ； $m$  为流体质量， $\text{kg}$ ； $V$  为流体体积， $\text{m}^3$ 。

## 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，流体体积相应地减小一个单位值（见图 1-1），表达式如下

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

式中， $\beta$  为体积压缩率， $\text{Pa}^{-1}$ ； $p$  为所受的外部压强， $\text{Pa}$ 。

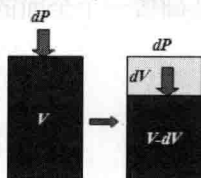


图1-1 压缩过程

## 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（见图 1-2），有

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

式中， $\alpha_v$  为体积膨胀系数， $\text{K}^{-1}$ ； $T$  为流体温度， $\text{K}$ 。

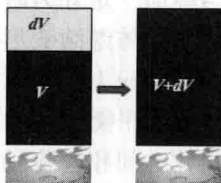


图1-2 膨胀过程

## 四、黏性

黏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,  $\tau$  为切应力, Pa;  $\mu$  为流体动力黏度, Pa·s;  $du/dy$  为速度梯度,  $s^{-1}$ 。

表征流体黏性的物理量称为黏度, 分为动力黏度  $\mu$  与运动黏度  $\nu$  两种, 它们的表达式如下

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

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

式中,  $\nu$  为运动黏度,  $m^2/s$ 。

注意: FLUENT 材料定义里面默认的黏度为动力黏度, 单位为  $kg/(m \cdot s)$ , 与 Pa·s 等价, 可利用单位换算得到。

流体黏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, 液体的黏度要大于气体的黏度, 并随着温度和压强的变化而变化。随着温度的升高, 所有液体的黏度都减小, 而气体的黏度增大。这是由于液体分子间距较小, 相互吸引力(即内聚力)较大, 黏性主要由内聚力造成。随着温度的升高, 分子间距增大, 内聚力减小, 从而使液体黏度减小。气体分子间距大, 内聚力很小, 黏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, 从而造成黏度的增加。

### 五、表面张力特性

液体表面由于分子引力(分子间的内聚力)不平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的倾向, 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), 反之则称为不浸润现象(如水银), 如图 1-3 所示。

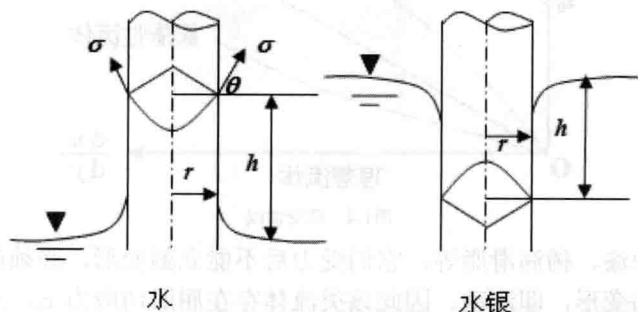


图1-3 浸润与不浸润现象



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。

## 1.1.2 流体的分类

根据流体的压缩性、黏性等物理性质，可以对流体进行下面三种分类。

### 一、理想流体与实际流体

根据是否考虑流体的黏性，可以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黏性（即理想流体）来考虑，大大简化了问题。

注意：FLUENT 进行流体运动仿真时通常需要考虑流体的黏性，即当成实际流体处理，这样的模拟结果更贴近实际。

### 二、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。

### 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。非牛顿流体又可分为塑性流体、假塑性流体与膨胀性流体三种，如图 1-4 所示。

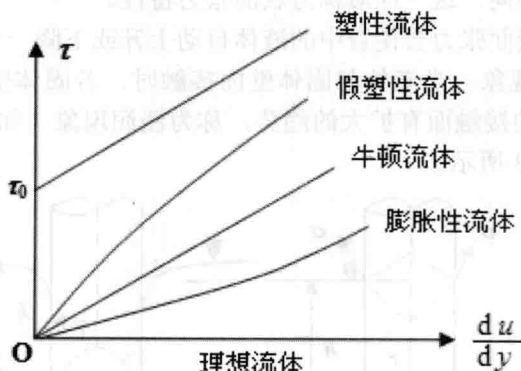


图1-4 流变曲线

塑性流体，如油漆、稀润滑脂等，它们受力后不能立刻变形，必须施加足以破坏其结构性的力才能发生剪切变形，即流动。因此该类流体存在屈服切应力  $\tau_0$ ，只有克服屈服切应力后才能开始流动。其切应力与速度梯度满足如下关系