

实例素材下载 7  
L 邮件技术支持

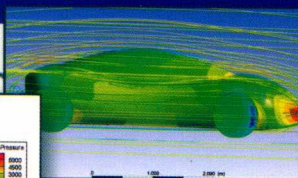
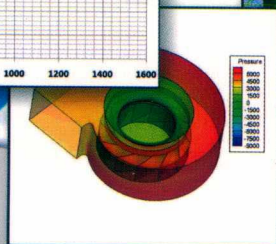
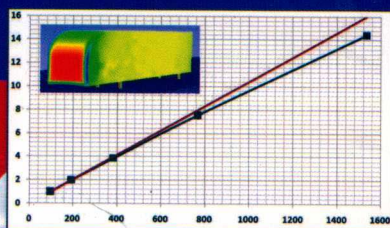
- 一线工程师精心打造，广受读者赞誉的Fluent经典著作，历经4次改版，内容更精彩
- 从基础到实践，通过9个不同领域的工程案例教学，快速掌握实用技能
- 提供本书所有实例的源代码与素材文件下载，以便读者上机演练

刘斌 编著

CAX工程应用丛书

# Fluent 19.0

## 流体仿真从入门到精通



清华大学出版社

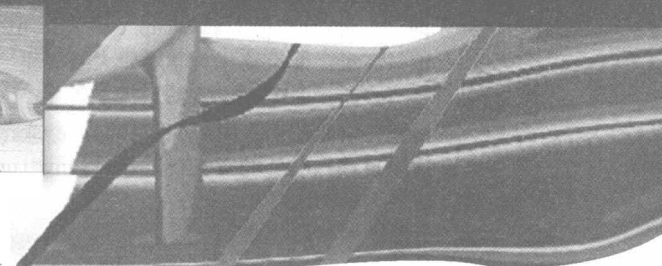
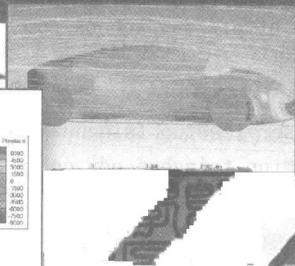
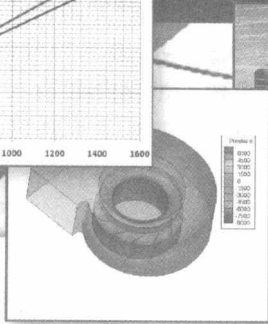
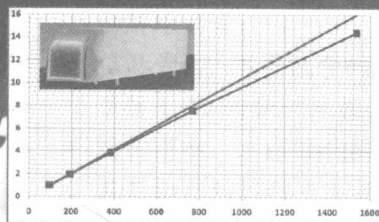


刘斌 编著

CAX工程应用丛书

# Fluent 19.0

## 流体仿真从入门到精通



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

全书共分为16章,由浅入深地讲解Fluent仿真计算的各种功能,从几何建模到网格划分,从计算求解到结果后处理,通过大量实例系统地介绍Fluent 19.0的使用方法,具体内容包括计算流体的基础理论与方法、创建几何模型、划分网格、Fluent求解设置、后处理等。本书针对每个Fluent可以解决的流体仿真计算问题进行详细讲解,并辅以相应的实例,使读者能够快速、熟练、深入地掌握Fluent软件的工作流程和计算方法。

本书结构严谨、条理清晰、重点突出,非常适合广大Fluent初、中级读者学习使用,也可作为大中专院校、社会培训机构的教材以及工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

Fluent 19.0 流体仿真从入门到精通/刘斌编著. —北京:清华大学出版社,2019  
(CAX 工程应用丛书)

ISBN 978-7-302-52575-2

I. ①F… II. ①刘… 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(2019)第047079号

责任编辑:王金柱  
封面设计:王翔  
责任校对:闫秀华  
责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:203mm×260mm

印 张:25.5

字 数:735千字

版 次:2019年5月第1版

印 次:2019年5月第1次印刷

定 价:79.00元

产品编号:081782-01

# [前言]

## Preface

Fluent 软件是目前国际上比较流行的商业 CFD 软件，只要涉及流体、热传递及化学反应等工程问题，都可以用 Fluent 进行求解。Fluent 19.0 是目前 ANSYS 公司推出的最新版本。

Fluent 具有丰富的物理模型、先进的数值方法以及强大的前后处理功能，在航空航天、汽车设计、石油天然气、涡轮机设计等方面有着广泛的应用。例如，在石油天然气工业上的应用包括燃烧、井下分析、喷射控制、环境分析、油气消散/聚集、多相流、管道流动等。

Fluent 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、真实气体等大批复杂现象的使用模型。

## 一、本书特点

本书由从事多年 Fluent 工作的一线从业人员编写。在编写的过程中，不仅注重绘图技巧的介绍，还将重点讲解 Fluent 和工程实际的关系。本书主要有以下几个特色。

- 基础和实例讲解并重。本书既可作为 Fluent 初学者的学习教材，又可作为对 Fluent 有一定基础的用户制定工程问题分析方案、精通高级前后处理与求解技术的参考书。
- 内容详略得当。本书将编者 10 多年的 CFD 经验结合 Fluent 软件的各项功能，从点到面，详细地讲解给读者。
- 信息量大。本书包含的内容全面，读者在学习的过程中不仅可以关注细节，还可以从整体出发，了解 CFD 的分析流程，需要关注包括什么内容、注意什么细节。
- 结构清晰。本书结构清晰、由浅入深，从结构上主要分为基础部分和案例部分两大类，在讲解基础知识的过程中穿插实例的讲解，在综合介绍的过程中同步回顾重点的基础知识。

## 二、本书内容

全书由浅入深地讲解 Fluent 仿真计算的各种功能，从几何建模到网格划分，从计算求解到结果后处理，详细地讲解 Fluent 进行流体模拟计算的工作流程和计算方法。

本书主要分为两部分，共 16 章。内容包括 Fluent 基础和案例讲解部分，其中基础知识包括第 1~6 章，案例部分包括第 7~16 章，具体章节安排如下：



- 第1章 流体力学与计算流体力学基础
- 第2章 Fluent 软件简介
- 第3章 创建几何模型
- 第4章 生成网格
- 第5章 Fluent 计算设置
- 第6章 计算结果后处理
- 第7章 稳态和非稳态模拟实例
- 第8章 内部流动分析实例
- 第9章 外部流动分析实例

- 第10章 多相流分析实例
- 第11章 离散相分析实例
- 第12章 传热流动分析实例
- 第13章 多孔介质和气动噪声分析实例
- 第14章 化学反应分析实例
- 第15章 动网格分析实例
- 第16章 Fluent 在 Workbench 中的应用

### 三、视频教学和案例源文件

为了让广大读者更快捷地学习和使用本书，本书提供了视频教学和案例源文件。

本书配套资源提供的实例源文件可以使用Fluent打开，根据书中的介绍进行学习。下载配套资源请用微信扫描下方二维码：



如果下载有问题，请发送电子邮件至[booksaga@126.com](mailto:booksaga@126.com)获得帮助，邮件标题为“Fluent 19.0 流体仿真从入门到精通配书资源”。

### 四、读者对象

本书适合的读者对象如下：

- 从事流体计算的初学者
- 高等院校的教师和学生
- 相关培训机构的教师和学员
- Fluent 爱好者
- 广大科研工作人员



## 五、本书作者

本书主要由刘斌编著，高飞、张迪妮、李战芬、张明明、凌桂龙、张亮亮、郭海霞、王芳、付文利、唐家鹏、乔建军、李昕、林晓阳、刘冰也参与了本书部分章节的编写。

## 六、读者服务

虽然编者在编写本书的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提出宝贵建议和意见。

为了方便解决本书疑难问题，读者朋友在学习过程中遇到与本书有关的技术问题时，可以发送邮件到电子邮箱comshu@126.com或3113088@qq.com，编者会尽快给予解答。

编者

2019年3月



# [目 录]

## Contents

第 1 章 流体力学与计算流体力学基础	1	2.1.1 Fluent 启动	22
1.1 流体力学基础	1	2.1.2 Fluent 用户界面	24
1.1.1 一些基本概念	1	2.1.3 Fluent 文件读入与输出	25
1.1.2 流体流动的分类	5	2.2 Fluent 计算类型及应用领域	29
1.1.3 边界层和物体阻力	5	2.3 Fluent 求解步骤	30
1.1.4 层流和湍流	6	2.3.1 制订分析方案	30
1.1.5 流体流动的控制方程	7	2.3.2 求解步骤	30
1.1.6 边界条件与初始条件	8	2.4 Fluent 使用的单位制	31
1.1.7 流体力学专业词汇	9	2.5 Fluent 使用的文件类型	32
1.2 计算流体力学基础	11	2.6 本章小结	32
1.2.1 计算流体力学的发展	11	第 3 章 创建几何模型	33
1.2.2 计算流体力学的求解过程	12	3.1 建立几何模型概述	33
1.2.3 数值模拟方法和分类	13	3.2 DesignModeler 简介	34
1.2.4 有限体积法的基本思想	14	3.2.1 启动 DesignModeler	34
1.2.5 有限体积法的求解方法	16	3.2.2 DesignModeler 的用户界面	35
1.3 计算流体力学应用领域	17	3.3 草图模式	37
1.4 常用的 CFD 商用软件	17	3.3.1 进入草图模式	37
1.4.1 PHOENICS	18	3.3.2 创建新平面	37
1.4.2 STAR-CD	18	3.3.3 创建草图	38
1.4.3 STAR-CCM+	18	3.3.4 几何模型的关联性	38
1.4.4 CFX	19	3.4 创建 3D 几何体	39
1.4.5 Fluent	20	3.4.1 拉伸	39
1.5 本章小结	20	3.4.2 旋转	40
第 2 章 Fluent 软件简介	21	3.4.3 扫掠	41
2.1 Fluent 的软件结构	21	3.4.4 直接创建 3D 几何体	41
		3.4.5 填充和包围	42



3.5	导入外部 CAD 文件	42	5.1.6	光顺网格与交换单元面	93
3.6	创建几何体的实例操作	44	5.1.7	项目保存	94
3.7	本章小结	47	5.2	设置求解器及操作条件	94
<b>第 4 章 生成网格</b>		<b>48</b>	5.2.1	求解器设置	94
4.1	网格生成概述	48	5.2.2	操作条件设置	95
4.1.1	网格划分技术	48	5.3	物理模型设定	96
4.1.2	网格类型	49	5.3.1	多相流模型	96
4.2	ANSYS ICEM CFD 简介	49	5.3.2	能量方程	97
4.2.1	工作流程	50	5.3.3	湍流模型	98
4.2.2	ICEM CFD 的文件类型	51	5.3.4	辐射模型	100
4.2.3	ICEM CFD 的用户界面	51	5.3.5	组分输运和反应模型	102
4.3	ANSYS ICEM CFD 的基本用法	51	5.3.6	离散相模型	103
4.3.1	几何模型的创建	52	5.3.7	凝固和熔化模型	104
4.3.2	几何文件导入	55	5.3.8	气动噪声模型	104
4.3.3	网格生成	56	5.4	材料性质设定	105
4.3.4	块的生成	63	5.4.1	物性参数	105
4.3.5	网格编辑	68	5.4.2	参数设定	106
4.3.6	网格输出	74	5.5	边界条件设定	108
4.4	ANSYS ICEM CFD 实例分析	75	5.5.1	边界条件分类	108
4.4.1	启动 ICEM CFD 并建立分析 项目	75	5.5.2	边界条件设置	109
4.4.2	导入几何模型	75	5.5.3	常用边界条件类型	111
4.4.3	模型建立	76	5.6	求解控制参数设定	127
4.4.4	生成块	79	5.6.1	求解方法设置	127
4.4.5	网格生成	84	5.6.2	松弛因子设置	129
4.4.6	网格质量检查	85	5.6.3	求解极限设置	129
4.4.7	网格输出	85	5.7	初始条件设定	130
4.5	本章小结	86	5.7.1	定义全局初始条件	130
<b>第 5 章 Fluent 计算设置</b>		<b>87</b>	5.7.2	定义局部区域初始值	131
5.1	网格导入与工程项目保存	87	5.8	求解设定	132
5.1.1	启动 Fluent	87	5.8.1	求解设置	132
5.1.2	网格导入	88	5.8.2	求解过程监视	133
5.1.3	网格质量检查	88	5.9	本章小结	137
5.1.4	显示网格	89	<b>第 6 章 计算结果后处理</b>		<b>138</b>
5.1.5	修改网格	90	6.1	Fluent 的后处理功能	138
			6.1.1	创建表面	138
			6.1.2	图形及可视化技术	139





6.1.3 动画技术	142	7.2.14 瞬态计算结果	177
6.2 CFD-Post 后处理器	143	7.3 本章小结	179
6.2.1 启动后处理器	143	<b>第 8 章 内部流动分析实例</b>	<b>180</b>
6.2.2 工作界面	143	8.1 圆管内气体的流动	180
6.2.3 创建位置	144	8.1.1 案例介绍	180
6.2.4 创建对象	154	8.1.2 启动 Fluent 并导入网格	181
6.2.5 创建数据	159	8.1.3 定义求解器	181
6.3 本章小结	160	8.1.4 定义模型	182
<b>第 7 章 稳态和非稳态模拟实例</b>	<b>161</b>	8.1.5 设置材料	182
7.1 管内稳态流动	161	8.1.6 边界条件	183
7.1.1 案例介绍	161	8.1.7 求解控制	183
7.1.2 启动 Fluent 并导入网格	162	8.1.8 初始条件	184
7.1.3 定义求解器	163	8.1.9 求解过程监视	184
7.1.4 定义模型	163	8.1.10 计算求解	185
7.1.5 设置材料	164	8.1.11 结果后处理	185
7.1.6 边界条件	164	8.2 三通内水的流动	187
7.1.7 设置计算域	165	8.2.1 案例介绍	187
7.1.8 求解控制	166	8.2.2 启动 Fluent 并导入网格	187
7.1.9 初始条件	166	8.2.3 定义求解器	188
7.1.10 求解过程监视	167	8.2.4 定义模型	188
7.1.11 计算求解	167	8.2.5 设置材料	189
7.1.12 结果后处理	168	8.2.6 设置区域条件	190
7.2 喷嘴内瞬态流动	169	8.2.7 边界条件	190
7.2.1 案例介绍	169	8.2.8 求解控制	192
7.2.2 启动 Fluent 并导入网格	169	8.2.9 初始条件	192
7.2.3 定义求解器	170	8.2.10 求解过程监视	193
7.2.4 定义模型	171	8.2.11 计算求解	194
7.2.5 设置材料	171	8.2.12 结果后处理	194
7.2.6 边界条件	172	8.3 本章小结	196
7.2.7 求解控制	173	<b>第 9 章 外部流动分析实例</b>	<b>197</b>
7.2.8 初始条件	173	9.1 圆柱绕流	197
7.2.9 求解过程监视	174	9.1.1 案例介绍	197
7.2.10 网格自适应	174	9.1.2 启动 Fluent 并导入网格	198
7.2.11 计算求解	175	9.1.3 定义求解器	199
7.2.12 结果后处理	175	9.1.4 定义模型	199
7.2.13 瞬态计算	177		



9.1.5	设置材料	199	10.1.9	求解过程监视	222
9.1.6	边界条件	200	10.1.10	动画设置	223
9.1.7	求解控制	201	10.1.11	计算求解	224
9.1.8	初始条件	201	10.1.12	结果后处理	224
9.1.9	求解过程监视	201	10.2	水罐内多相流动	225
9.1.10	计算求解	202	10.2.1	案例介绍	225
9.1.11	结果后处理	203	10.2.2	启动 Fluent 并导入网格	226
9.1.12	定义求解器修改	204	10.2.3	定义求解器	227
9.1.13	求解控制修改	204	10.2.4	定义湍流模型	227
9.1.14	计算求解	205	10.2.5	设置材料	228
9.1.15	求解控制修改	205	10.2.6	定义多相流模型	228
9.1.16	计算求解	205	10.2.7	边界条件	230
9.1.17	结果后处理	205	10.2.8	求解控制	231
9.2	机翼超音速流动	207	10.2.9	初始条件	232
9.2.1	案例介绍	207	10.2.10	计算结果输出设置	233
9.2.2	启动 Fluent 并导入网格	207	10.2.11	定义计算活动	233
9.2.3	定义求解器	208	10.2.12	求解过程监视	234
9.2.4	定义模型	208	10.2.13	动画设置	234
9.2.5	设置材料	209	10.2.14	计算求解	236
9.2.6	边界条件	209	10.2.15	结果后处理	236
9.2.7	求解控制	210	10.3	本章小结	236
9.2.8	初始条件	210	第 11 章	离散相分析实例	237
9.2.9	求解过程监视	211	11.1	反应器内粒子流动	237
9.2.10	计算求解	211	11.1.1	案例介绍	237
9.2.11	结果后处理	213	11.1.2	启动 Fluent 并导入网格	238
9.3	本章小结	216	11.1.3	定义求解器	238
第 10 章	多相流分析实例	217	11.1.4	定义湍流模型	239
10.1	自由表面流动	217	11.1.5	边界条件	239
10.1.1	案例介绍	217	11.1.6	定义离散相模型	240
10.1.2	启动 Fluent 并导入网格	218	11.1.7	修改边界条件	242
10.1.3	定义求解器	219	11.1.8	设置材料	242
10.1.4	定义湍流模型	219	11.1.9	求解控制	243
10.1.5	设置材料	220	11.1.10	初始条件	243
10.1.6	定义多相流模型	220	11.1.11	求解过程监视	244
10.1.7	求解控制	221	11.1.12	计算求解	244
10.1.8	初始条件	222	11.1.13	结果后处理	245

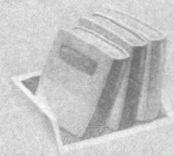


11.2 喷嘴内粒子流动·····	246	12.2.2 启动 Fluent 并导入网格·····	275
11.2.1 案例介绍·····	246	12.2.3 定义求解器·····	276
11.2.2 启动 Fluent 并导入网格·····	246	12.2.4 定义模型·····	276
11.2.3 定义求解器·····	247	12.2.5 设置材料·····	276
11.2.4 定义模型·····	248	12.2.6 设置区域条件·····	278
11.2.5 设置材料·····	248	12.2.7 边界条件·····	279
11.2.6 边界条件·····	249	12.2.8 求解控制·····	283
11.2.7 求解控制·····	252	12.2.9 初始条件·····	283
11.2.8 初始条件·····	252	12.2.10 求解过程监视·····	284
11.2.9 求解过程监视·····	252	12.2.11 计算求解·····	286
11.2.10 计算求解·····	253	12.2.12 结果后处理·····	287
11.2.11 结果后处理·····	253	12.3 本章小结·····	288
11.2.12 定义离散相模型·····	256		
11.2.13 修改材料设置·····	257	<b>第 13 章 多孔介质和气动噪声分析实例·····</b>	<b>289</b>
11.2.14 计算求解·····	258	13.1 催化转换器内多孔介质流动·····	289
11.2.15 结果后处理·····	258	13.1.1 案例介绍·····	289
11.3 本章小结·····	259	13.1.2 启动 Fluent 并导入网格·····	290
		13.1.3 定义求解器·····	291
<b>第 12 章 传热流动分析实例·····</b>	<b>260</b>	13.1.4 定义湍流模型·····	291
12.1 芯片传热分析·····	260	13.1.5 设置材料·····	292
12.1.1 案例介绍·····	260	13.1.6 设置计算域·····	292
12.1.2 启动 Fluent 并导入网格·····	261	13.1.7 边界条件·····	293
12.1.3 定义求解器·····	261	13.1.8 求解控制·····	294
12.1.4 定义模型·····	262	13.1.9 初始条件·····	295
12.1.5 设置材料·····	262	13.1.10 求解过程监视·····	295
12.1.6 设置区域条件·····	263	13.1.11 计算求解·····	296
12.1.7 边界条件·····	264	13.1.12 结果后处理·····	296
12.1.8 求解控制·····	266	13.2 圆柱外气动噪声模拟·····	300
12.1.9 初始条件·····	266	13.2.1 案例介绍·····	300
12.1.10 求解过程监视·····	267	13.2.2 启动 Fluent 并导入网格·····	300
12.1.11 计算求解·····	268	13.2.3 定义求解器·····	301
12.1.12 结果后处理·····	268	13.2.4 定义湍流模型·····	302
12.1.13 网格自适应·····	270	13.2.5 设置材料·····	302
12.1.14 计算求解·····	272	13.2.6 边界条件·····	303
12.1.15 结果后处理·····	272	13.2.7 求解控制·····	304
12.2 车灯传热分析·····	274	13.2.8 初始条件·····	304
12.2.1 案例介绍·····	274	13.2.9 求解过程监视·····	305



13.2.10 计算求解	306	第 15 章 动网格分析实例	341
13.2.11 定义声学模型	306	15.1 理论基础	341
13.2.12 计算求解	307	15.1.1 基本思路	341
13.2.13 结果后处理	307	15.1.2 基本设置	342
13.3 本章小结	309	15.2 阀门运动	343
第 14 章 化学反应分析实例	310	15.2.1 案例介绍	344
14.1 多相流燃烧模拟	310	15.2.2 启动 Fluent 并导入网格	344
14.1.1 案例介绍	310	15.2.3 定义求解器	345
14.1.2 启动 Fluent 并导入网格	311	15.2.4 定义模型	345
14.1.3 定义求解器	311	15.2.5 设置材料	346
14.1.4 定义湍流模型	312	15.2.6 边界条件	346
14.1.5 定义多相流模型	312	15.2.7 设置分界面	347
14.1.6 定义多组分模型	313	15.2.8 动网格设置	348
14.1.7 设置材料	313	15.2.9 求解控制	350
14.1.8 导入 UDF 文件	319	15.2.10 初始条件	351
14.1.9 边界条件	321	15.2.11 求解过程监视	351
14.1.10 求解控制	322	15.2.12 计算求解	352
14.1.11 初始条件	323	15.2.13 结果后处理	352
14.1.12 求解过程监视	323	15.3 风力涡轮机分析 1	353
14.1.13 计算求解	324	15.3.1 案例介绍	353
14.1.14 结果后处理	324	15.3.2 启动 Fluent 并导入网格	354
14.2 表面化学反应模拟	326	15.3.3 定义求解器	354
14.2.1 案例介绍	326	15.3.4 定义模型	355
14.2.2 启动 Fluent 并导入网格	326	15.3.5 设置材料	355
14.2.3 定义求解器	327	15.3.6 边界条件	356
14.2.4 定义能量模型	328	15.3.7 设置分界面	357
14.2.5 定义多组分模型	328	15.3.8 动网格设置	358
14.2.6 设置材料	329	15.3.9 求解控制	359
14.2.7 边界条件	332	15.3.10 初始条件	360
14.2.8 求解控制	336	15.3.11 求解过程监视	360
14.2.9 初始条件	336	15.3.12 计算结果输出设置	360
14.2.10 求解过程监视	337	15.3.13 计算求解	361
14.2.11 计算求解	337	15.3.14 结果后处理	361
14.2.12 结果后处理	337	15.4 风力涡轮机分析 2	362
14.3 本章小结	340	15.4.1 定义求解器	362
		15.4.2 动网格设置	362

15.4.3	动画设置	364	16.2.5	定义模型	380
15.4.4	计算求解	365	16.2.6	边界条件	380
15.4.5	结果后处理	365	16.2.7	求解控制	381
15.5	本章小结	365	16.2.8	初始条件	381
<b>第 16 章 Fluent 在 Workbench 中的应用</b>		<b>366</b>	16.2.9	求解过程监视	382
16.1	圆管内气体的流动	366	16.2.10	计算求解	382
16.1.1	案例介绍	366	16.2.11	结果后处理	383
16.1.2	启动 Workbench 并建立分析 项目	366	16.2.12	保存与退出	385
16.1.3	导入几何体	367	16.3	探头外空气流动	385
16.1.4	划分网格	368	16.3.1	案例介绍	385
16.1.5	定义模型	371	16.3.2	启动 Workbench 并建立分析 项目	385
16.1.6	边界条件	371	16.3.3	导入几何体	386
16.1.7	求解控制	372	16.3.4	划分网格	386
16.1.8	初始条件	372	16.3.5	定义模型	388
16.1.9	求解过程监视	373	16.3.6	边界条件	389
16.1.10	计算求解	373	16.3.7	求解控制	389
16.1.11	结果后处理	373	16.3.8	初始条件	390
16.1.12	保存与退出	375	16.3.9	求解过程监视	390
16.2	三通内气体的流动	375	16.3.10	计算求解	391
16.2.1	案例介绍	375	16.3.11	结果后处理	391
16.2.2	启动 Workbench 并建立分析 项目	376	16.3.12	保存与退出	393
16.2.3	导入几何体	376	16.4	本章小结	393
16.2.4	划分网格	377	<b>参考文献</b>		<b>394</b>



# 第 1 章

## 流体力学与计算流体力学基础

### ↓ 引言

计算流体动力学分析 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 的基本定义是通过计算机进行数值计算, 模拟流体流动时的各种相关物理现象, 包括流动、热传导、声场等。计算流体动力学分析广泛应用于航空航天设计、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。

本章将介绍流体动力学的基础理论、流体力学基础和常用的 CFD 软件。

### ↓ 学习目标

- ★ 掌握流体动力学分析的基础理论
- ★ 通过实例掌握流体动力学分析的过程
- ★ 掌握计算流体力学的基础知识
- ★ 了解常用的 CFD 软件

## 1.1

## 流体力学基础

本节将介绍流体力学一些重要的基础知识, 包括流体力学的基本概念和基本方程。流体力学是进行流体力学工程计算的基础, 如果想对计算的结果进行分析与整理, 在设置边界条件时有所依据, 那么学习流体力学的相关知识是必要的。

### 1.1.1 一些基本概念



#### (1) 流体的密度

流体密度的定义是单位体积内所含物质的多少。若密度是均匀的, 则有:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-1)$$

式中:  $\rho$  为流体的密度;  $M$  是体积为  $V$  的流体所含物质的质量。

由上式可知, 密度的单位是  $\text{kg/m}^3$ 。对于密度不均匀的流体, 其某一点处密度的定义为:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-2)$$

例如，4℃时水的密度为 1000 kg/m<sup>3</sup>，常温 20℃时空气的密度为 1.24 kg/m<sup>3</sup>。各种流体的具体密度值可查阅相关文献。



流体的密度是流体本身固有的物理量，随着温度和压强的变化而变化。

### (2) 流体的重度

流体的重度与流体密度有一个简单的关系式，即：

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中： $g$  为重力加速度，值为 9.81 m/s<sup>2</sup>。流体的重度单位为 N/m<sup>3</sup>。

### (3) 流体的比重

流体的比重定义为该流体的密度与 4℃时水的密度之比。

### (4) 流体的粘性

在研究流体流动时，若考虑流体的粘性，则称为粘性流动，相应地称流体为粘性流体；若不考虑流体的粘性，则称为理想流体的流动，相应地称流体为理想流体。

流体的粘性可由牛顿内摩擦定律表示：

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



说明

牛顿内摩擦定律适用于空气、水、石油等大多数机械工业中的常用流体。凡是符合切应力与速度梯度成正比的流体都叫作牛顿流体，即严格满足牛顿内摩擦定律且  $\mu$  保持为常数的流体，否则就称其为非牛顿流体。例如，溶化的沥青、糖浆等流体均属于非牛顿流体。

非牛顿流体有以下 3 种不同的类型。

- 塑性流体，如牙膏等。塑性流体有一个保持不产生剪切变形的初始应力  $\tau_0$ ，只有克服了这个初始应力，其切应力才与速度梯度成正比，即：

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

- 假塑性流体，如泥浆等。其切应力与速度梯度的关系是：

$$\tau = \mu \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (n < 1) \quad (1-6)$$

- 胀塑性流体，如乳化液等。其切应力与速度梯度的关系是：

$$\tau = \mu \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (n > 1) \quad (1-7)$$

## (5) 流体的压缩性

流体的压缩性是指在外界条件变化时,其密度和体积发生了变化。这里的条件有两种,一种是外部压强产生了变化;另一种是流体的温度发生了变化。

① 流体的等温压缩率为 $\beta$ ,当质量为 $M$ 、体积为 $V$ 的流体外部压强发生 $\Delta p$ 的变化时,体积会发生 $\Delta V$ 的变化。定义流体的等温压缩率为:

$$\beta = -\frac{\Delta V/V}{\Delta p} \quad (1-8)$$

这里的负号是考虑到 $\Delta p$ 与 $\Delta V$ 总是符号相反; $\beta$ 的单位为 $1/\text{Pa}$ 。流体等温压缩率的物理意义为当温度不变时,每增加单位压强所产生的流体体积的相对变化率。

考虑到压缩前后流体的质量不变,上面的公式还有另一种表示形式,即:

$$\beta = \frac{d\rho}{\rho dp} \quad (1-9)$$

气体的等温压缩率可由气体状态方程求得:

$$\beta = 1/p \quad (1-10)$$

② 流体的体积膨胀系数为 $\alpha$ ,当质量为 $M$ 、体积为 $V$ 的流体温度发生 $\Delta T$ 的变化时,体积会发生 $\Delta V$ 的变化。定义流体的体积膨胀系数为:

$$\alpha = \frac{\Delta V/V}{\Delta T} \quad (1-11)$$

考虑到膨胀前后流体的质量不变,上面的公式还有另一种表示形式,即:

$$\alpha = -\frac{d\rho}{\rho dT} \quad (1-12)$$

这里的负号是考虑到随着温度的增高,体积必然增大,而密度必然减小; $\alpha$ 的单位为 $1/\text{K}$ 。体积膨胀系数的物理意义为当压强不变时,每增加单位温度所产生的流体体积的相对变化率。

气体的体积膨胀系数可由气体状态方程求得:

$$\alpha = 1/T \quad (1-13)$$

③ 在研究流体流动过程时,若考虑到流体的压缩性,则称为可压缩流动,相应地称流体为可压缩流体,如相对速度较高的气体流动。若不考虑流体的压缩性,则称为不可压缩流动,相应地称流体为不可压缩流体,如水、油等液体的流动。

## (6) 液体的表面张力

液体表面相邻两部分之间的拉应力是分子作用力的一种表现。液面上的分子受液体内部分子吸引而使液面趋于收缩,表现为液面任何两部分之间具体的拉应力,称为表面张力,其方向和液面相切,并与两部分的分界线相垂直。单位长度上的表面张力用 $\sigma$ 表示,单位是 $\text{N/m}$ 。



(7) 质量力和表面力

作用在流体微团上的力可分为质量力与表面力。

① 与流体微团质量大小有关并且集中作用在微团质量中心的力称为质量力。比如在重力场中的重力  $mg$ 、直线运动的惯性力  $ma$  等。

质量力是一个矢量，一般用单位质量所具有的质量力表示，形式如下：

$$f = f_x i + f_y j + f_z k \tag{1-14}$$

式中： $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  为单位质量力在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的投影，或简称为单位质量分力。

② 大小与表面面积有关而且分布作用在流体表面上的力称为表面力。表面力按其作用方向可以分为两种：一种是沿表面内法线方向的压力，称为正压力；另一种是沿表面切向的摩擦力，称为切应力。

作用在静止流体上的表面力只有沿表面内法线方向的正压力。单位面积上所受到的表面力称为这一点处的静压强。静压强有两个特征：

- 静压强的方向垂直指向作用面。
- 流场内一点处静压强的大小与方向无关。



说明

对于理想流体流动，流体质点只受到正压力，没有切向力。对于粘性流体流动，流体质点所受到的作用力既有正压力，又有切向力。单位面积上所受到的切向力称为切应力。对于一元流动，切向力由牛顿内摩擦定律求出；对于多元流动，切向力可由广义牛顿内摩擦定律求得。

(8) 绝对压强、相对压强与真空度

一个标准大气压的压强是 760 mmHg，相当于 101325Pa，通常用  $p_{atm}$  表示。若压强大于大气压，则以此压强为计算基准得到的压强称为相对压强，也称为表压强，通常用  $p_r$  表示。

若压强小于大气压，则压强低于大气压的值称为真空度，通常用  $p_v$  表示。

如果以压强 0 Pa 为计算的基准，那么这个压强称为绝对压强，通常用  $p_s$  表示。

三者的关系如下：

$$p_r = p_s - p_{atm}, \quad p_v = p_{atm} - p_s \tag{1-15}$$



说明

在流体力学中，压强都用符号  $P$  表示。一般来说，有一个约定，对于液体来说，压强用相对压强；对于气体来说，特别是马赫数大于 0.1 的流动，应视为可压缩流动，压强用绝对压强。当然，特殊情况应进行说明。

(9) 静压、动压和总压

对于静止状态下的流体，只有静压强；对于流动状态的流动，有静压强、动压强和总压强之分。

在一条流线上，流体质点的机械能是守恒的，这就是伯努里 (Bernoulli) 方程的物理意义。对于理想流体的不可压缩流动，表达式如下：

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = H \tag{1-16}$$