

- ✦ 从几何建模到网格划分, 从计算求解到结果后处理, 系统地介绍Fluent的工作流程和方法
- ✦ 结合编者10余年的CFD经验和大量案例, 使读者掌握Fluent 17.0在实际工程中的应用
- ✦ 提供本书素材文件下载, 方便读者上机演练

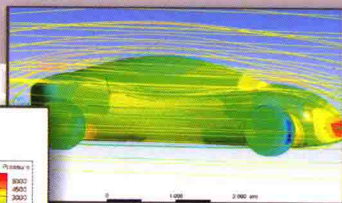
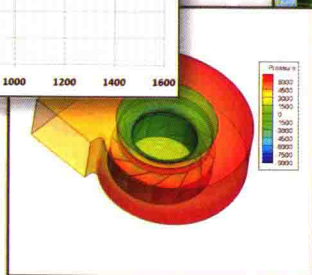
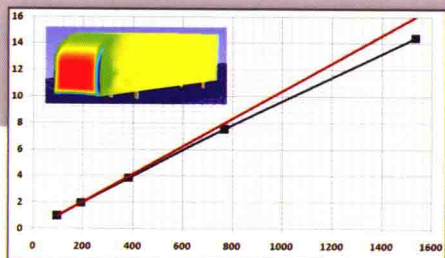
9个工程应用实例
本书素材文件下载

CAX工程应用丛书

Fluent 17.0

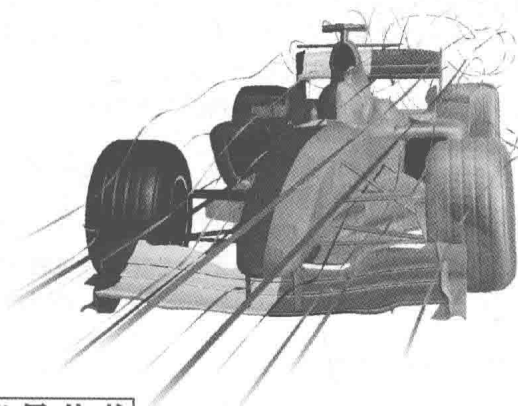
流体仿真从入门到精通

丁欣硕 刘斌 编著



清华大学出版社





CAX工程应用丛书

Fluent 17.0

流体仿真从入门到精通

丁欣硕 刘斌 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书通过大量实例系统地介绍 Fluent 17.0 的使用方法,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、后处理等功能的介绍,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。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,详细地讲解 Fluent 进行流体模拟计算的每一个步骤,使读者能够了解并掌握 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 17.0 流体仿真从入门到精通/丁欣硕,刘斌编著.

—北京:清华大学出版社,2018

(CAX 工程应用丛书)

ISBN 978-7-302-48813-2

I. ①F… II. ①丁… ②刘… III. ①工程力学—流体力学

—计算机仿真—应用软件 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 273119 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:李红英

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

质量反馈:010-62772015, 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:190mm×260mm

印 张:27.25

字 数:698 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:79.00 元

产品编号:072655-01

前言

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 17.0 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。

1. 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, 而且可以从整体出发, 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。

2. 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 多孔介质和气动噪音分析实例

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

3. 配套资源下载

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：



在扫描二维码后会用手机打开下载页面，也可以将资源文件推送到自己的邮箱中。

如果下载有问题，请电子邮件联系 booksaga@126.com，邮件主题为“Fluent 17.0 流体仿真从入门到精通配书资源”。

4. 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 and 学员
- Fluent 爱好者
- 广大科研工作人员

5. 本书作者

本书主要由丁欣硕、刘斌编著，高飞、张迪妮、李战芬、韩希强、张文电、宋玉旺、张明明、于沧海、凌桂龙、余胜威、张亮亮、郭海霞、王芳、付文利、唐家鹏、孙国强、乔建军、李昕、林晓阳、刘冰也参与了本书部分章节的编写。

6. 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，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
2017 年 10 月

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 一些基本概念 1
 - 1.1.2 流体流动的分类 5
 - 1.1.3 边界层和物体阻力 5
 - 1.1.4 层流和湍流 7
 - 1.1.5 流体流动的控制方程 7
 - 1.1.6 边界条件与初始条件 8
 - 1.1.7 流体力学专业词汇 9
- 1.2 计算流体力学基础..... 12
 - 1.2.1 计算流体力学的发展 12
 - 1.2.2 计算流体力学的求解过程 13
 - 1.2.3 数值模拟方法和分类 13
 - 1.2.4 有限体积法的基本思想 15
 - 1.2.5 有限体积法的求解方法 17
- 1.3 计算流体力学应用领域 18
- 1.4 常用的 CFD 商用软件..... 18
 - 1.4.1 PHOENICS..... 19
 - 1.4.2 STAR-CD 19
 - 1.4.3 STAR-CCM+..... 19
 - 1.4.4 CFX 20
 - 1.4.5 Fluent..... 21
- 1.5 本章小结..... 22

第 2 章 Fluent 软件简介 23

- 2.1 Fluent 的软件结构 23
 - 2.1.1 启动 Fluent 24
 - 2.1.2 Fluent 用户界面 26
 - 2.1.3 Fluent 文件读入与输出 27
- 2.2 Fluent 计算类型及应用领域 32
- 2.3 Fluent 求解步骤 33
 - 2.3.1 制订分析方案 33
 - 2.3.2 求解步骤 33
- 2.4 Fluent 使用的单位制 34

- 2.5 Fluent 使用的文件类型 34

- 2.6 本章小结 35

第 3 章 创建几何模型 36

- 3.1 建立几何模型概述 36
- 3.2 DesignModeler 简介 37
 - 3.2.1 启动 DesignModeler 37
 - 3.2.2 DesignModeler 的用户界面 38
- 3.3 草图模式 40
 - 3.3.1 进入草图模式 40
 - 3.3.2 创建新平面 40
 - 3.3.3 创建草图 41
 - 3.3.4 几何模型的关联性 41
- 3.4 创建 3D 几何体 42
 - 3.4.1 拉伸 42
 - 3.4.2 旋转 43
 - 3.4.3 扫掠 44
 - 3.4.4 直接创建 3D 几何体 44
 - 3.4.5 填充和包围 45
- 3.5 导入外部 CAD 文件 46
- 3.6 创建几何体的实例操作 48
- 3.7 本章小结 51

第 4 章 生成网格 52

- 4.1 网格生成概述 52
 - 4.1.1 网格划分技术 52
 - 4.1.2 网格类型 52
- 4.2 ANSYS ICEM CFD 简介 53
 - 4.2.1 工作流程 54
 - 4.2.2 ICEM CFD 的文件类型 55
 - 4.2.3 ICEM CFD 的用户界面 55
- 4.3 ANSYS ICEM CFD 的基本用法 55
 - 4.3.1 几何模型的创建 56
 - 4.3.2 几何文件导入 59
 - 4.3.3 网格生成 60

4.3.4	块的生成	68	5.6.1	求解方法设置	136
4.3.5	网格编辑	73	5.6.2	松弛因子设置	138
4.3.6	网格输出	79	5.6.3	求解极限设置	138
4.4	ANSYS ICEM CFD 实例分析	80	5.7	初始条件设定	139
4.4.1	启动 ICEM CFD 并建立分析项目	80	5.7.1	定义全局初始条件	139
4.4.2	导入几何模型	81	5.7.2	定义局部区域初始值	140
4.4.3	模型建立	81	5.8	求解设定	141
4.4.4	生成块	84	5.8.1	求解设置	141
4.4.5	网格生成	90	5.8.2	求解过程监视	143
4.4.6	网格质量检查	91	5.9	本章小结	146
4.4.7	网格输出	91			
4.5	本章小结	92	第 6 章	计算结果后处理	147
第 5 章	Fluent 计算设置	93	6.1	Fluent 的后处理功能	147
5.1	网格导入与工程项目保存	93	6.1.1	创建表面	147
5.1.1	启动 Fluent	93	6.1.2	图形及可视化技术	148
5.1.2	网格导入	94	6.1.3	动画技术	151
5.1.3	网格质量检查	94	6.2	CFD-Post 后处理器	152
5.1.4	显示网格	95	6.2.1	启动后处理器	152
5.1.5	修改网格	96	6.2.2	工作界面	152
5.1.6	光顺网格与交换单元面	100	6.2.3	创建位置	153
5.1.7	项目保存	100	6.2.4	创建对象	163
5.2	设置求解器及操作条件	100	6.2.5	创建数据	169
5.2.1	求解器设置	101	6.3	本章小结	171
5.2.2	操作条件设置	101			
5.3	物理模型设定	102	第 7 章	稳态和非稳态模拟实例	172
5.3.1	多相流模型	102	7.1	管内稳态流动	172
5.3.2	能量方程	104	7.1.1	案例介绍	172
5.3.3	湍流模型	104	7.1.2	启动 Fluent 并导入网格	173
5.3.4	辐射模型	107	7.1.3	定义求解器	174
5.3.5	组分输运和反应模型	108	7.1.4	定义模型	174
5.3.6	离散相模型	110	7.1.5	设置材料	175
5.3.7	凝固和融化模型	111	7.1.6	边界条件	175
5.3.8	气动噪声模型	111	7.1.7	设置计算域	177
5.4	材料性质设定	112	7.1.8	求解控制	177
5.4.1	物性参数	112	7.1.9	初始条件	178
5.4.2	参数设定	113	7.1.10	求解过程监视	178
5.5	边界条件设定	116	7.1.11	计算求解	179
5.5.1	边界条件分类	116	7.1.12	结果后处理	179
5.5.2	边界条件设置	117	7.2	喷嘴内瞬态流动	180
5.5.3	常用边界条件类型	119	7.2.1	案例介绍	180
5.6	求解控制参数设定	136	7.2.2	启动 Fluent 并导入网格	181

7.2.3	定义求解器	182
7.2.4	定义模型	182
7.2.5	设置材料	183
7.2.6	边界条件	183
7.2.7	求解控制	184
7.2.8	初始条件	185
7.2.9	求解过程监视	185
7.2.10	网格自适应	186
7.2.11	计算求解	187
7.2.12	结果后处理	187
7.2.13	瞬态计算	189
7.2.14	瞬态计算结果	189
7.3	本章小结	191

第 8 章 内部流动分析实例 192

8.1	圆管内气体的流动	192
8.1.1	案例介绍	192
8.1.2	启动 Fluent 并导入 网格	193
8.1.3	定义求解器	193
8.1.4	定义模型	194
8.1.5	设置材料	194
8.1.6	边界条件	195
8.1.7	求解控制	195
8.1.8	初始条件	196
8.1.9	求解过程监视	197
8.1.10	计算求解	197
8.1.11	结果后处理	197
8.2	三通内水的流动	199
8.2.1	案例介绍	199
8.2.2	启动 Fluent 并导入 网格	199
8.2.3	定义求解器	200
8.2.4	定义模型	201
8.2.5	设置材料	202
8.2.6	设置区域条件	202
8.2.7	边界条件	203
8.2.8	求解控制	204
8.2.9	初始条件	205
8.2.10	求解过程监视	205
8.2.11	计算求解	208
8.2.12	结果后处理	208
8.3	本章小结	210

第 9 章 外部流动分析实例 211

9.1	圆柱绕流	211
9.1.1	案例介绍	211
9.1.2	启动 Fluent 并导入 网格	211
9.1.3	定义求解器	212
9.1.4	定义模型	213
9.1.5	设置材料	213
9.1.6	边界条件	214
9.1.7	求解控制	215
9.1.8	初始条件	215
9.1.9	求解过程监视	216
9.1.10	计算求解	217
9.1.11	结果后处理	217
9.1.12	定义求解器修改	218
9.1.13	求解控制修改	218
9.1.14	计算求解	219
9.1.15	求解控制修改	220
9.1.16	计算求解	220
9.1.17	结果后处理	220
9.2	机翼超音速流动	222
9.2.1	案例介绍	222
9.2.2	启动 Fluent 并导入 网格	222
9.2.3	定义求解器	223
9.2.4	定义模型	223
9.2.5	设置材料	224
9.2.6	边界条件	225
9.2.7	求解控制	225
9.2.8	初始条件	226
9.2.9	求解过程监视	226
9.2.10	计算求解	227
9.2.11	结果后处理	229
9.3	本章小结	232

第 10 章 多相流分析实例 233

10.1	自由表面流动	233
10.1.1	案例介绍	233
10.1.2	启动 Fluent 并导入 网格	234
10.1.3	定义求解器	234
10.1.4	定义湍流模型	234
10.1.5	设置材料	235

10.1.6	定义多相流模型	236	11.2.1	案例介绍	265
10.1.7	求解控制	237	11.2.2	启动 Fluent 并导入网格	265
10.1.8	初始条件	237	11.2.3	定义求解器	266
10.1.9	求解过程监视	238	11.2.4	定义模型	266
10.1.10	动画设置	239	11.2.5	设置材料	267
10.1.11	计算求解	240	11.2.6	边界条件	268
10.1.12	结果后处理	240	11.2.7	求解控制	271
10.2	水罐内多相流动	241	11.2.8	初始条件	271
10.2.1	案例介绍	241	11.2.9	求解过程监视	272
10.2.2	启动 Fluent 并导入 网格	242	11.2.10	计算求解	272
10.2.3	定义求解器	243	11.2.11	结果后处理	272
10.2.4	定义湍流模型	243	11.2.12	定义离散相模型	276
10.2.5	设置材料	244	11.2.13	修改材料设置	277
10.2.6	定义多相流模型	245	11.2.14	计算求解	278
10.2.7	边界条件	246	11.2.15	结果后处理	278
10.2.8	求解控制	248	11.3	本章小结	279
10.2.9	初始条件	248	第 12 章	传热流动分析实例	280
10.2.10	计算结果输出设置	250	12.1	芯片传热分析	280
10.2.11	定义计算活动	250	12.1.1	案例介绍	280
10.2.12	求解过程监视	251	12.1.2	启动 Fluent 并导入 网格	281
10.2.13	动画设置	252	12.1.3	定义求解器	282
10.2.14	计算求解	253	12.1.4	定义模型	282
10.2.15	结果后处理	254	12.1.5	设置材料	283
10.3	本章小结	254	12.1.6	设置区域条件	283
第 11 章	离散相分析实例	255	12.1.7	边界条件	284
11.1	反应器内粒子流动	255	12.1.8	求解控制	287
11.1.1	案例介绍	255	12.1.9	初始条件	287
11.1.2	启动 Fluent 并导入 网格	256	12.1.10	求解过程监视	287
11.1.3	定义求解器	257	12.1.11	计算求解	289
11.1.4	定义湍流模型	257	12.1.12	结果后处理	289
11.1.5	边界条件	258	12.1.13	网格自适应	291
11.1.6	定义离散相模型	259	12.1.14	计算求解	294
11.1.7	修改边界条件	260	12.1.15	结果后处理	295
11.1.8	设置材料	261	12.2	车灯传热分析	297
11.1.9	求解控制	261	12.2.1	案例介绍	297
11.1.10	初始条件	262	12.2.2	启动 Fluent 并导入 网格	297
11.1.11	求解过程监视	262	12.2.3	定义求解器	298
11.1.12	计算求解	263	12.2.4	定义模型	299
11.1.13	结果后处理	263	12.2.5	设置材料	299
11.2	喷嘴内粒子流动	265	12.2.6	设置区域条件	301

12.2.7	边界条件	302	14.1.1	案例介绍	335
12.2.8	求解控制	306	14.1.2	启动 Fluent 并导入 网格	335
12.2.9	初始条件	307	14.1.3	定义求解器	336
12.2.10	求解过程监视	308	14.1.4	定义湍流模型	336
12.2.11	计算求解	310	14.1.5	定义多相流模型	337
12.2.12	结果后处理	311	14.1.6	定义多组分模型	337
12.3	本章小结	312	14.1.7	设置材料	338
第 13 章	多孔介质和气动噪音分析		14.1.8	导入 UDF 文件	344
	实例	313	14.1.9	边界条件	346
13.1	催化转换器内多孔介质流动	313	14.1.10	求解控制	348
13.1.1	案例介绍	313	14.1.11	初始条件	348
13.1.2	启动 Fluent 并导入 网格	314	14.1.12	求解过程监视	348
13.1.3	定义求解器	315	14.1.13	计算求解	349
13.1.4	定义湍流模型	315	14.1.14	结果后处理	350
13.1.5	设置材料	316	14.2	表面化学反应模拟	351
13.1.6	设置计算域	316	14.2.1	案例介绍	351
13.1.7	边界条件	317	14.2.2	启动 Fluent 并导入 网格	352
13.1.8	求解控制	318	14.2.3	定义求解器	353
13.1.9	初始条件	319	14.2.4	定义能量模型	354
13.1.10	求解过程监视	319	14.2.5	定义多组分模型	354
13.1.11	计算求解	320	14.2.6	设置材料	355
13.1.12	结果后处理	321	14.2.7	边界条件	358
13.2	圆柱外气动噪声模拟	325	14.2.8	求解控制	362
13.2.1	案例介绍	325	14.2.9	初始条件	363
13.2.2	启动 Fluent 并导入 网格	326	14.2.10	求解过程监视	363
13.2.3	定义求解器	327	14.2.11	计算求解	364
13.2.4	定义湍流模型	327	14.2.12	结果后处理	364
13.2.5	设置材料	328	14.3	本章小结	367
13.2.6	边界条件	328	第 15 章	动网格分析实例	368
13.2.7	求解控制	329	15.1	理论基础	368
13.2.8	初始条件	329	15.1.1	基本思路	368
13.2.9	求解过程监视	330	15.1.2	基本设置	369
13.2.10	计算求解	330	15.2	阀门运动	370
13.2.11	定义声学模型	331	15.2.1	案例介绍	371
13.2.12	计算求解	332	15.2.2	启动 Fluent 并导入 网格	371
13.2.13	结果后处理	332	15.2.3	定义求解器	372
13.3	本章小结	334	15.2.4	定义模型	372
第 14 章	化学反应分析实例	335	15.2.5	设置材料	373
14.1	多相流燃烧模拟	335	15.2.6	边界条件	374

15.2.7	设置分界面	374
15.2.8	动网格设置	375
15.2.9	求解控制	378
15.2.10	初始条件	378
15.2.11	求解过程监视	378
15.2.12	计算求解	379
15.2.13	结果后处理	379
15.3	风力涡轮机分析 1	380
15.3.1	案例介绍	380
15.3.2	启动 Fluent 并导入 网格	381
15.3.3	定义求解器	382
15.3.4	定义模型	382
15.3.5	设置材料	383
15.3.6	边界条件	383
15.3.7	设置分界面	385
15.3.8	动网格设置	386
15.3.9	求解控制	387
15.3.10	初始条件	387
15.3.11	求解过程监视	388
15.3.12	计算结果输出设置	388
15.3.13	计算求解	388
15.3.14	结果后处理	389
15.4	风力涡轮机分析 2	390
15.4.1	定义求解器	390
15.4.2	动网格设置	390
15.4.3	动画设置	392
15.4.4	计算求解	393
15.4.5	结果后处理	393
15.5	本章小结	394

第 16 章 Fluent 在 Workbench 中的应用

应用

16.1	圆管内气体的流动	395
16.1.1	案例介绍	395
16.1.2	启动 Workbench 并建立 分析项目	395
16.1.3	导入几何体	396
16.1.4	划分网格	397

16.1.5	定义模型	400
16.1.6	边界条件	401
16.1.7	求解控制	401
16.1.8	初始条件	402
16.1.9	求解过程监视	402
16.1.10	计算求解	403
16.1.11	结果后处理	403
16.1.12	保存与退出	405
16.2	三通内气体的流动	405
16.2.1	案例介绍	406
16.2.2	启动 Workbench 并建立 分析项目	406
16.2.3	导入几何体	407
16.2.4	划分网格	408
16.2.5	定义模型	410
16.2.6	边界条件	411
16.2.7	求解控制	412
16.2.8	初始条件	412
16.2.9	求解过程监视	413
16.2.10	计算求解	413
16.2.11	结果后处理	414
16.2.12	保存与退出	416
16.3	探头外空气流动	416
16.3.1	案例介绍	416
16.3.2	启动 Workbench 并建立 分析项目	417
16.3.3	导入几何体	417
16.3.4	划分网格	417
16.3.5	定义模型	419
16.3.6	边界条件	420
16.3.7	求解控制	421
16.3.8	初始条件	421
16.3.9	求解过程监视	422
16.3.10	计算求解	422
16.3.11	结果后处理	423
16.3.12	保存与退出	425
16.4	本章小结	425

参考文献	426
------------	-----

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: ρ 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 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^3 , 常温 20℃时空气的密度为 1.24 kg/m^3 。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^2 。流体的重度单位为 N/m^3 。

(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:

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



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叫做牛顿流体, 即严格满足牛顿内摩擦定律且 μ 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 τ_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。

流体的等温压缩率为 β ,当质量为 M ,体积为 V 的流体外部压强发生 Δp 的变化时,体积会发生 ΔV 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 Δp 与 ΔV 总是符号相反的缘故; β 的单位为 $1/Pa$ 。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:

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

流体的体积膨胀系数 α ,当质量为 M 、体积为 V 的流体温度发生 ΔT 的变化时,体积会发生 ΔV 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; α 的单位为 $1/K$ 。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:

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

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

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 σ 表示, 单位是 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。

质量力: 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:

$$f = f_x i + f_y j + f_z k \quad (1-14)$$

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。

表面力: 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 101325 Pa , 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:

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



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, 有静压力、动压力和总压强之分。

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:

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

式中: $p/\rho g$ 称为压强水头, 也是压能项, p 为静压强; $v^2/2g$ 称为速度水头, 也是动能项; z 称为位置水头, 也是重力势能项; 这三项之和就是流体质点的总机械能; H 称为总的水头高。

若把上式等式两边同时乘以 ρg , 则有:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \rho g H \quad (1-17)$$

式中: p 称为静压强, 简称静压; $\frac{1}{2}\rho v^2$ 称为动压强, 简称动压, 也是动能项; $\rho g H$ 称为总压强, 简称总压。



对于不考虑重力的流动, 总压就是静压和动压之和。

1.1.2 流体流动的分类

流体流动按运动形式分: 若 $\text{rot} \vec{v} = 0$, 则流体做无旋运动; 若 $\text{rot} \vec{v} \neq 0$, 则流体做有旋运动。

流体流动按时间变化分: 若 $\frac{\partial}{\partial t} = 0$, 则流体做定常运动; 若 $\frac{\partial}{\partial t} \neq 0$, 则流体做不定常运动。

流体流动按空间变化分: 流体的运动有一维运动、二维运动和三维运动。

1.1.3 边界层和物体阻力

(1) 边界层

对于工程实际中大量出现的大雷诺数问题, 应该分成两个区域: 外部势流区域和边界层区域。

对于外部势流区域, 可以忽略粘性力, 因此可以采用理想流体运动理论解出外部流动, 从而知道边界层外部边界上的压力和速度分布, 并将其作为边界层流动的外边界条件。

在边界层区域必须考虑粘性力, 而且只有考虑了粘性力才能满足粘性流体的粘附条件。边界层虽小, 但是物理量在物面上的分布、摩擦阻力及物面附近的流动都和边界层内流动有联系, 因此非常重要。

描述边界层内粘性流体运动的是 N-S 方程。由于边界层厚度 δ 比特征长度小很多, 而且 x 方向速度分量沿法向的变化比切向大得多, 因此 N-S 方程可以在边界层内做很大的简化, 简化后的方程称为普朗特边界层方程, 它是处理边界层流动的基本方程。边界层示意图如图 1-1 所示。

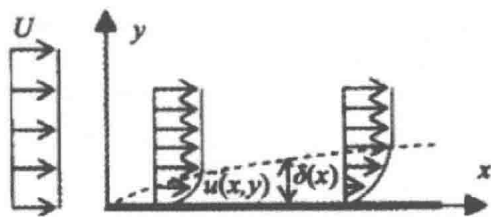


图 1-1 边界层示意图

大雷诺数边界层流动的性质:

边界层的厚度较物体的特征长度小得多, 即 δ/L (边界层相对厚度) 是一个小量。边界层内粘性力和惯性力同阶。

对于二维平板或楔边界层方程, 通过量阶分析得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (1-18)$$

边界条件: 在物面 $y=0$ 上 $u=v=0$, 在 $y=\delta$ 或 $y \rightarrow \infty$ 时, $u=U(x)$ 。

初始条件: 当 $t=t_0$ 时, 已知 u, v 的分布。

对于曲面物体, 应采用贴体曲面坐标系, 从而建立相应的边界层方程。

(2) 物体阻力

阻力是由流体绕物体流动所引起的切向应力和压力差造成的, 故阻力可分为摩擦阻力和压差阻力两种。

摩擦阻力是指作用在物体表面的切向应力在来流方向上的投影的总和, 是粘性直接作用的结果。

压差阻力是指作用在物体表面的压力在来流方向上的投影的总和, 是粘性间接作用的结果, 是由于边界层的分离, 在物体尾部区域产生尾涡而形成的。压差阻力的大小与物体的形状有很大关系, 故又称为形状阻力。

摩擦阻力与压差阻力之和称为物体阻力。

物体的阻力系数由下式确定:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad (1-19)$$

式中: A 为物体在垂直于运动方向或来流方向的截面积。例如, 对于直径为 d 的小圆球的低速运动来说, 阻力系数为:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad (1-20)$$

式中: $\text{Re} = \frac{V_\infty d}{\nu}$, 此式在 $\text{Re} < 1$ 时, 计算值与试验值吻合得较好。