

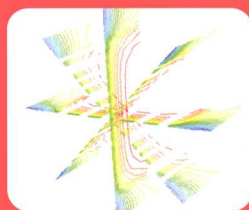
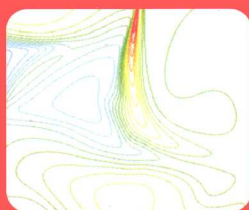
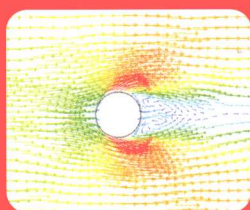
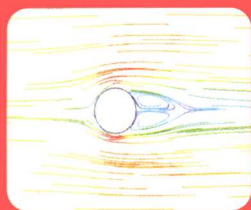
精通

李进良 李承曦 胡仁喜 等编著

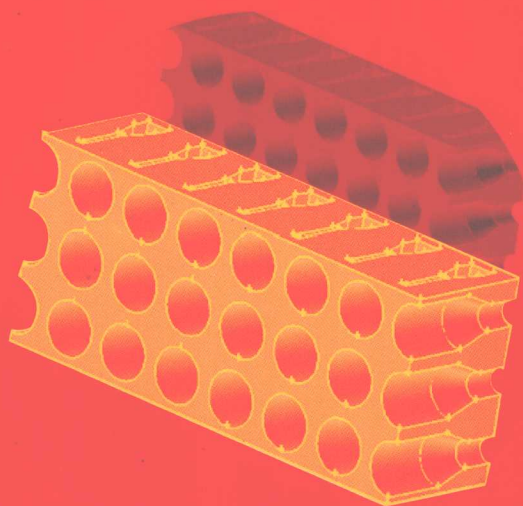


FLUENT 6.3

流场分析



- ★ FLUENT基础知识
- ★ 卡曼漩涡与卡曼涡街模拟
- ★ 二维流动和传热的数值模拟
- ★ 三维流动和传热的数值模拟
- ★ 多相流模型
- ★ 可动区域中流动问题的模拟
- ★ 动网格模型模拟
- ★ 组分传输与气体燃烧的模拟
- ★ UDF、UDS、Tecplot简介



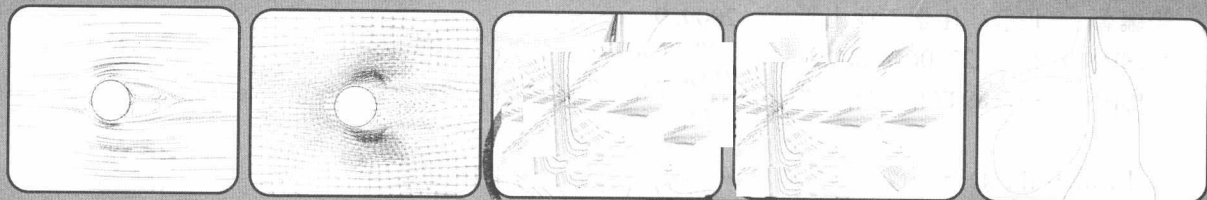
化学工业出版社

精通

李进良 李承曦 胡仁喜 等编著

FLUENT 6.3

流场分析



化学工业出版社

· 北京 ·

本书全面介绍了 FLUENT 6.3 流场分析的各种功能和基本操作方法。首先介绍了 CFD 基础理论和 FLUENT 基本知识;接着结合实例介绍了 FLUENT 中常用的计算模型及其在求解流体和传热传质等工程问题中的方法,包括圆柱绕流问题、二维/三维流动和传热的数值模拟、多相流模型模拟、可动区域中流动问题的模拟、动网格模型的模拟、组分传输与气体燃烧的模拟;最后对 UDF 和 UDS 软件、Tecplot 软件作了简单的介绍。

本书所赠光盘中包含了书中所有实例的源文件和视频演示动画,以方便读者学习使用。

本书适用于科研院所流体力学研究人员,流体力学相关专业硕博硕士研究生或本科高年级学生用作自学指导书或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

精通 FLUENT 6.3 流场分析 / 李进良, 李承曦, 胡仁喜
等编著. —北京: 化学工业出版社, 2009. 9

ISBN 978-7-122-06509-4

ISBN 978-7-89472-168-6 (光盘)

I. 精… II. ①李…②李…③胡… III. 流场(流体力学)-
计算机仿真-应用软件, Fluent 6.3 IV. TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 143512 号

策划编辑: 王思慧 瞿 微
责任编辑: 瞿 微

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16

印张 24 $\frac{1}{4}$

字数 600 千字

2009 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 49.80 元 (含 1CD-ROM)

版权所有 违者必究

前言

Computational Fluid Dynamics (简称 CFD, 计算流体动力学), 用离散化的数值方法及电子计算机对流体无黏绕流和黏性流动进行数值模拟和分析。无黏绕流包括低速流、跨声速流、超声速流等; 黏性流动包括湍流、边界层流动等。计算流体力学是计算力学的一个分支, 是为弥补理论分析方法的不足而于 20 世纪 60 年代发展起来的, 并相应地形成了各种数值解法, 主要是有限差分法和有限元法。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, 所以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和发展相应的数值解法。

实验研究、理论分析方法和数值模拟是研究流体运动规律的三种基本方法, 它们的发展是相互依赖、相互促进的。计算流体力学的兴起促进了流体力学的发展, 改变了流体力学研究工作的状况, 很多原来认为很难解决的问题, 如超声速、高超声速钝体绕流、分离流以及湍流问题等, 都有了不同程度的发展, 而且将为流体力学研究工作提供新的前景。

计算流体力学的兴起促进了实验研究和理论分析方法的发展, 为简化流动模型的创建提供了更多的依据, 使很多分析方法得到了发展和完善。然而, 更重要的是计算流体力学采用它独有的、新的研究方法——数值模拟方法, 研究流体运动的基本物理特性, 其特点如下。

(1) 给出流体运动区域内的离散解, 而不是解析解, 这区别于一般理论分析方法。

(2) 它的发展与计算机技术的发展直接相关。这是因为可能模拟的流体运动的复杂程度、解决问题的广度和能模拟的流体运动的复杂程度, 都与计算机速度、内存等直接相关。

(3) 若物理问题的数学提法(包括数学方程及其相应的边界条件)是正确的, 则可在较广泛的流动参数(如马赫数、雷诺数、气体性质、模型尺度等)范围内研究流体力学问题, 且能给出流场参数的定量结果。

以上这些是风洞实验和理论分析难以做到的, 然而, 要创建正确的数学方程还必须与实验研究相结合。另外, 严格的稳定性分析、误差估计和收敛性理论的发展还跟不上数值模拟的进展。所以在计算流体力学中, 仍必须依靠一些较简单的、线性化的、与原问题有密切关系的模型方程的严格数学分析, 给出所求解问题数值解的理论依据。依靠数值实验、地面实验和物理特性分析, 验证计算方法的可靠性, 从而进一步改进计算方法。

FLUENT 是目前国际上比较流行的商用 CFD 软件包, 在美国的市场占有率为 60%, 凡是和流体、热传递和化学反应等有关的行业均可使用。它具有丰富的物理模型、先进的数值计算方法和强大的前后处理功能, 在航空航天、汽车设计、石油、天然气、涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。例如, 在石油、天然气工业上的应用就包括燃烧、井下分析、喷射控制、环境分析、油气消散/聚积、多相流、管道流动等。另外, 通过 FLUENT 提供的用户自定义函数可以改进和完善模型, 从而处理更加个性化的问题。

本书全面介绍了 FLUENT 6.3 流场分析的各种功能和基本操作方法。全书共 11 章, 第

1 章和第 2 章介绍了 CFD 基础理论和 FLUENT 基本知识,第 3 章~第 9 章结合实例介绍了 FLUENT 中常用的计算模型及其在求解流体和传热传质等工程问题中的方法,第 10 章和第 11 章对 UDF 和 UDS 软件以及 Tecplot 软件作了简单的介绍。

本书由三维书屋工作室总策划,主要由李进良、李承曦和胡仁喜编写。另外,参加编写的还有谢侃、王义发、谷德桥、张俊生、阳平华、周冰、董伟、王兵学、王渊峰、郑长松、王敏、王艳池、李瑞、周广芬、李鹏、陈丽芹、王玉秋、李世强、王佩楷、袁涛、王培合、刘昌丽、康士廷、熊慧、张日晶、路纯红等。由于编者水平有限,写作时间仓促,书中难免有不妥、疏漏之处,竭诚欢迎广大读者登录网站 www.bjsanweishuwu.com 或发电子邮件到编者信箱 win760520@126.com,对本书提出批评和建议,以便做进一步修改和补充。

编者

2009 年 6 月

目 录

第 1 章 流体力学基础.....	1
1.1 流体力学基本概念.....	1
1.1.1 连续介质模型.....	1
1.1.2 流体的基本性质.....	2
1.1.3 作用在流体上的力.....	3
1.1.4 流动分析基础.....	4
1.2 流体运动的基本概念.....	4
1.3 流体流动及换热的基本控制方程.....	7
1.4 边界层理论.....	10
第 2 章 FLUENT 基础知识.....	12
2.1 CFD 软件概述.....	12
2.2 FLUENT 软件包概述.....	16
2.3 计算网格.....	18
2.3.1 网格类型.....	18
2.3.2 网格类型的选择.....	20
2.3.3 网格质量.....	21
2.4 GAMBIT 功能简介.....	22
2.4.1 GAMBIT 的特点.....	22
2.4.2 GAMBIT 的基本操作步骤.....	23
2.4.3 GAMBIT 的启动界面.....	24
2.4.4 GAMBIT 的用户操作界面.....	25
2.5 FLUENT 6.3 求解器功能简介.....	28
2.5.1 FLUENT 6.3 求解步骤.....	28
2.5.2 FLUENT 6.3 启动界面.....	29
2.5.3 FLUENT 6.3 图形用户界面.....	29
2.5.4 FLUENT 6.3 文件读写.....	30
2.5.5 FLUENT 6.3 对网格的基本操作.....	33
2.5.6 FLUENT 6.3 基本计算模型.....	36
2.5.7 FLUENT 6.3 求解器选择.....	36
2.5.8 选择 FLUENT 6.3 的运行环境.....	38
2.5.9 FLUENT 6.3 的材料定义.....	39



2.5.10	FLUENT 6.3 的湍流模型	41
2.5.11	FLUENT 6.3 边界条件	47
2.5.12	设置 FLUENT 6.3 求解参数	55
第 3 章	圆柱绕流问题	58
3.1	卡曼漩涡与定常流动	58
3.1.1	创建模型	59
3.1.2	网格划分	62
3.1.3	边界条件和区域的设定	63
3.1.4	网格的输出	64
3.1.5	利用 FLUENT 求解器求解	65
3.2	卡曼涡街与非定常流动	75
3.2.1	选择计算模型	75
3.2.2	后处理	79
第 4 章	二维流动和传热的数值模拟	82
4.1	轴对称孔板流量计的流动模拟	82
4.1.1	利用 GAMBIT 创建模型	83
4.1.2	网格的划分	84
4.1.3	边界条件和区域的设定	86
4.1.4	网格的输出	87
4.1.5	利用 FLUENT 求解器求解	87
4.2	套管式换热器的流动和传热的模拟	95
4.2.1	利用 GAMBIT 创建模型	95
4.2.2	网格的划分	96
4.2.3	边界条件和区域的设定	98
4.2.4	网格的输出	99
4.2.5	利用 FLUENT 求解器求解	99
第 5 章	三维流动和传热的数值模拟	107
5.1	三维弯管流动的模拟	107
5.1.1	利用 GAMBIT 创建模型	107
5.1.2	划分实体网格	115
5.1.3	边界条件和区域的设定	116
5.1.4	网格输出	116
5.1.5	利用 FLUENT 求解器求解	117
5.1.6	后处理	122
5.2	三维喷管流的数值模拟	126
5.2.1	利用 GAMBIT 创建三维喷管模型	126



5.2.2	划分网格	133
5.2.3	边界条件和区域的设定	135
5.2.4	输入网格文件	136
5.2.5	利用 FLUENT 进行三维喷管流	137
5.3	三维机头温度场的数值模拟	146
5.3.1	利用 GAMBIT 创建模型	147
5.3.2	实体网格的划分	151
5.3.3	边界条件和区域的设定	152
5.3.4	网格输出	152
5.3.5	利用 FLUENT 求解器求解	153
5.3.6	后处理	158
5.4	混合器流动和传热的数值模拟	161
5.4.1	利用 GAMBIT 创建模型	162
5.4.2	网格划分	165
5.4.3	区域和边界条件的设置	165
5.4.4	网格输出	166
5.4.5	利用 FLUENT 求解器求解	167
5.4.6	后处理	174
5.5	三维喷管流动与换热的耦合求解	181
5.5.1	利用 GAMBIT 读入三维物理模型	182
5.5.2	利用 GAMBIT 划分网格	183
5.5.3	设定区域属性与边界条件	185
5.5.4	输出网格文件	187
5.5.5	利用 FLUENT 进行流动与换热的耦合求解	187
5.5.6	后处理	201
5.6	周期性三维流动与传热模拟	204
5.6.1	利用 GAMBIT 创建几何模型	205
5.6.2	利用 GAMBIT 划分网格	211
5.6.3	利用 GAMBIT 初定边界	212
5.6.4	利用 GAMBIT 导出 Mesh 文件	214
5.6.5	利用 FLUENT 6.3 导入 Mesh 文件	215
5.6.6	周期边界计算模型的设定过程	215
5.6.7	FLUENT 6.3 自带后处理	221
第 6 章	多相流模型	225
6.1	明渠流动的 VOF 模型模拟	225
6.1.1	利用 GAMBIT 创建几何模型	226
6.1.2	利用 GAMBIT 划分网格	228
6.1.3	利用 GAMBIT 初定边界	229



6.1.4	网格的输出	230
6.1.5	利用 FLUENT 求解器求解	230
6.1.6	VOF 模型的设定过程	231
6.1.7	模型初始化	238
6.1.8	设定观看录像	239
6.1.9	保存 Case 和 Data 文件	240
6.1.10	迭代计算	240
6.1.11	FLUENT 6.3 自带后处理	241
6.2	低气相容积率的气泡流 Mixture 模型模拟	242
6.2.1	利用 GAMBIT 创建几何模型	243
6.2.2	利用 GAMBIT 划分网格	245
6.2.3	利用 GAMBIT 初定边界	246
6.2.4	利用 GAMBIT 导出 Mesh	247
6.2.5	利用 FLUENT 6.3 导入 Mesh 文件	247
6.2.6	Mixture 模型的设定过程	247
6.2.7	模型初始化	253
6.2.8	迭代计算	253
6.2.9	FLUENT 6.3 自带后处理	253
第 7 章	可动区域中流动问题的模拟	256
7.1	无旋转坐标系的三维旋转流动	256
7.1.1	利用 GAMBIT 创建几何模型	256
7.1.2	利用 GAMBIT 划分网格	259
7.1.3	利用 GAMBIT 初定边界	261
7.1.4	利用 GAMBIT 导出 Mesh 文件	262
7.1.5	利用 FLUENT 6.3 导入 Mesh 文件	263
7.1.6	计算模型的设定过程	263
7.1.7	模型初始化	269
7.1.8	迭代计算	269
7.1.9	FLUENT 6.3 自带后处理	270
7.2	单一旋转坐标系中三维旋转流动	272
7.2.1	利用 FLUENT 6.3 导入 Case 文件	272
7.2.2	$\Omega=\omega/2$ 涡动模型的修改和计算	273
7.2.3	$\Omega=\omega$ 涡动模型的修改和计算	276
7.3	用 MRF 法模拟二维离心泵的流场	278
7.3.1	利用 GAMBIT 创建几何模型	279
7.3.2	利用 GAMBIT 划分网格	288
7.3.3	利用 GAMBIT 初建边界条件	289
7.3.4	利用 GAMBIT 导出 Mesh 文件	292

7.3.5	利用 FLUENT 6.3 导入 Mesh 文件.....	292
7.3.6	计算模型的设定过程.....	292
7.3.7	模型初始化	297
7.3.8	迭代计算	298
7.3.9	FLUENT 6.3 自带后处理	298
7.4	用滑动网格法模拟二维离心泵的流场	300
7.4.1	利用 FLUENT 6.3 导入 Case 文件.....	300
7.4.2	滑动网格模型的修改与设定.....	301
7.4.3	设定观看录像.....	302
7.4.4	迭代计算	303
7.4.5	FLUENT 6.3 自带后处理	305
第 8 章	动网格模型的模拟.....	306
8.1	用动网格方法模拟隧道中两车相对行驶的流场.....	306
8.1.1	利用 GAMBIT 创建几何模型.....	306
8.1.2	利用 GAMBIT 划分网格.....	308
8.1.3	利用 GAMBIT 初建边界条件.....	309
8.1.4	利用 GAMBIT 导出 Mesh 文件.....	309
8.1.5	利用 FLUENT 6.3 导入 Mesh 文件.....	310
8.1.6	动网格计算模型的设定过程.....	310
8.1.7	模型初始化	314
8.1.8	迭代计算	314
8.1.9	FLUENT 6.3 自带后处理	315
8.2	FLUENT 动网格问题.....	316
8.2.1	利用 FLUENT 求解动网格问题	316
8.2.2	计算结果后处理.....	322
第 9 章	组分传输与气体燃烧的模拟.....	326
9.1	问题描述	326
9.2	利用 GAMBIT 创建模型.....	327
9.3	网格的处理	329
9.4	利用 FLUENT 求解器求解.....	330
9.5	采用变比热容的解法	340
9.6	后处理	342
第 10 章	UDF 和 UDS.....	351
10.1	UDF 概述	351
10.1.1	UDF 基础知识.....	351
10.1.2	UDF 能够解决的问题.....	351



10.1.3	UDF 宏	352
10.1.4	UDF 的预定义函数	354
10.1.5	UDF 的编写	358
10.2	UDS 基础知识	359
第 11 章	Tecplot 软件简介	363
11.1	Tecplot 软件菜单介绍	363
11.2	Tecplot 软件边框工具栏选项的介绍	365
11.3	2D 图形的编辑	365
11.4	3D 图形的编辑	372

第1章 流体力学基础

流体力学是力学的一个重要的分支,也是理论性很强的一门科学,涉及到很多复杂的理论和公式。本章重点介绍流体力学和流体运动的基本概念,以及流体流动和换热的基本控制方程、边界层的基本理论。通过本章的学习,让读者掌握流体流动和换热的基本控制方程,为后面的软件操作打下理论基础。

1.1 流体力学基本概念

本节简要介绍流体的连续介质模型、基本性质以及研究流体运动的方法。

1.1.1 连续介质模型

气体与液体都属流体。从微观角度讲,无论是气体还是液体,分子间都存在间隙,同时由于分子的随机运动,导致流体的质量不但在空间上分布不连续,而且在任意空间点上流体物理量相对时间也不连续。但是从宏观的角度考虑,流体的结构和运动又表现出明显的连续性与确定性,而流体力学研究的正是流体的宏观运动,在流体力学中,正是用宏观流体模型来代替微观有空隙的分子结构。1753年欧拉首先采用“连续介质”作为宏观流体模型,将流体看成是由无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质,这个模型称为连续介质模型。

流体的密度定义为:

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

式中, ρ 为流体密度; m 为流体质量; V 表示质量为 m 的流体所占的体积。

对于非均质流体,流体中任一点的密度定义为:

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow \Delta v_0} \frac{\Delta m}{\Delta v} \quad (1-2)$$

式中, Δv_0 是设想的一个最小体积,在 Δv_0 内包含足够多的分子,使得密度的统计平均值 ($\Delta m / \Delta v_0$) 有确切的意义。 Δv_0 是流体质点的体积,所以连续介质中某一点的流体密度实质上是流体质点的密度,同样,连续介质中某一点的流体速度,是指在某瞬时质心在该点的流体质点的质心速度。不仅如此,对于空间上任意点的流体物理量都是指位于该点上的流体质点的物理量。



1.1.2 流体的基本性质

1. 流体压缩性

流体体积会随着作用其上的压强的增大而减小, 这一特性称为流体的压缩性, 通常用压缩系数 β 来度量。它具体定义为: 在一定温度下, 升高单位压强时流体体积的相对缩小量, 即:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-3)$$

当密度为常数时, 流体为不可压缩流体, 否则为可压缩流体。纯液体的压缩性很差, 通常情况下可以认为液体的体积和密度是不变的。对于气体, 其密度随压强的变化是和热力过程有关的。

2. 流体的膨胀性

流体体积会随温度的升高而增大, 这一特性称为流体的膨胀性, 通常用膨胀系数 α 度量。它具体定义为: 在压强不变的情况下, 温度每上升 1°C , 流体体积的相对增大量, 即:

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-4)$$

一般来说, 液体的膨胀系数都很小, 通常情况下工程中不考虑液体膨胀性。

3. 流体的黏性

在作相对运动的两流体层的接触面上, 存在一对等值且反向的力阻碍两相邻流体层的相对运动, 流体的这种性质叫做流体的黏性, 由黏性产生的作用力叫做黏性阻力或内摩擦力。黏性阻力产生的物理原因是由于存在分子不规则运动的动量交换和分子间吸引力。根据牛顿内摩擦定律, 两层流体间切应力的表达式为:

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

式中, τ 为切应力; μ 为动力黏性系数, 与流体种类和温度有关; dV/dy 为垂直于两层流体接触面上的速度梯度。我们把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。

黏性系数受温度的影响很大, 当温度升高时, 液体的黏性系数减小, 黏性下降, 而气体的黏性系数增大, 黏性增加。当压强不是很高的情况下, 黏性系数受压强的影响很小, 只有当压强很高 (例如几十个兆帕) 时, 才需要考虑压强对黏性系数的影响。

当流体的黏性较小 (如空气和水的黏性都很小), 运动的相对速度也不大时, 所产生的黏性应力比起其他类型的力 (如惯性力) 可忽略不计。此时, 我们可以近似地把流体看成是无黏性的, 称为无黏流体, 也叫做理想流体; 而对于需要考虑黏性的流体, 则称为黏性流体。



4. 流体的导热性

当流体内部或流体与其他介质之间存在温度差时, 温度高的地方与温度低的地方之间会发生热量传递。热量传递有热传导、热对流、热辐射 3 种形式。当流体在管内高速流动时, 在紧贴壁面的位置会形成层流底层, 液体在该处的流速很低, 几乎可看作是零, 所以与壁面进行的主要是热传导, 而层流以外的区域的热流传递形式主要是热对流。单位时间内通过单位面积由热传导所传递的热量可按傅立叶导热定律确定:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1-6)$$

式中, n 为面积的法线方向; $\partial T/\partial n$ 为沿 n 方向的温度梯度; λ 为导热系数; 负号“-”表示热量传递方向与温度梯度方向相反。

通常情况下, 流体与固体壁面间的对流换热量可用下式表达:

$$q = h(T_1 - T_2) \quad (1-7)$$

式中, h 为对流换热系数, 与流体的物性、流动状态等因素有关, 主要是由实验数据得出的经验公式来确定。

1.1.3 作用在流体上的力

作用在流体上的力可分为质量力与表面力两类。所谓质量力(或称体积力)是指作用在体积 V 内每一液体质量(或体积)上的非接触力, 其大小与流体质量成正比。重力、惯性力、电磁力都属于质量力。所谓表面力是指作用在所取流体体积表面 S 上的力, 它是由与这块流体相接触的流体或物体的直接作用而产生的。

在流体表面围绕 M 点选取一微元面积, 作用在其上的表面力用 ΔF_S 表示, 将 ΔF_S 分解为垂直于微元表面的法向力 ΔF_n 和平行于微元表面的切向力 ΔF_T 。在静止流体或运动的理想流体中, 表面力只存在垂直于表面上的法向力 ΔF_n , 这时, 作用在 M 点周围单位面积上的法向力就定义为 M 点上的流体静压强, 即:

$$P = \lim_{\Delta S \rightarrow \Delta S_0} \frac{\Delta \vec{F}_n}{\Delta S} \quad (1-8)$$

式中, ΔS_0 是和流体质点的体积具有相比拟尺度的微小面积。

静压强又常称为静压, 流体静压强具有如下两个重要特性。

- 流体静压强的方向总是和作用面相垂直, 并且指向作用面。
- 在静止流体或运动理想流体中, 某一点静压强的大小与所取作用面的方位无关。

对于理想流体流动, 流体质点只受法向力, 没有切向力。对于黏性流体流动, 流体质点所受作用力既有法向力, 也有切向力。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, 切向力由广义牛顿内摩擦定律求得。



1.1.4 流动分析基础

在研究流体运动时有两种不同的方法，拉格朗日法和欧拉法。拉格朗日法是从分析流体各个质点的运动入手，来研究整个流体的运动。欧拉法是从分析流体所占据的空间中各固定点处的流体运动入手，来研究整个流体的运动。

在任意空间点上，流体质点的全部流动参数，例如速度、压强、密度等都不随时间的变化而改变，这种流动称为定常流动；若流体质点的全部或部分流动参数随时间的变化而改变，则称为非定常流动。

人们常用迹线或流线的概念来描述流场。迹线是任何一个流体质点在流场中的运动轨迹，它是某一流体质点在一段时间内所经过的路径，是同一流体质点不同时刻所在位置的连线；流线是某一瞬时各流体质点的运动方向线，在该曲线上各点的速度矢量相切于这条曲线。在定常流中，流动与时间无关，流线不随时间的改变而改变，流体质点沿着流线运动，流线与迹线重合。对于非定常流，迹线与流线是不同的。

1.2 流体运动的基本概念

1. 层流流动与紊流流动

当流体在圆管中流动时，如果管中流体是一层一层流动的，各层间互不干扰，互不相混，这样的流动状态称为层流流动。当流速逐渐增大时，流体质点除了沿管轴向运动外，还有垂直于管轴向方向的横向流动，即层流流动已被打破，完全处于无规则的乱流状态，这种流动状态称为紊流或湍流流动。我们把流动状态发生变化（例如从层流到紊流）时的流速称为临界速度。

大量实验数据与相似理论证实，流动状态不是取决于临界速度，而是由综合反映管道尺寸、流体物理属性、流动速度的组合量——雷诺数来决定的。雷诺数 Re 定义为：

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (1-9)$$

式中， ρ 为流体密度； u 为平均流速； d 为管道直径； μ 为动力黏性系数。

由层流转变到紊流时所对应的雷诺数称为上临界雷诺数，用 Re'_{cr} 表示；由紊流转变到层流所对应的雷诺数称为下临界雷诺数，用 Re_{cr} 表示。通过比较实际流动的雷诺数 Re 与临界雷诺数，就可确定黏性流体的流动状态。

- 当 $Re < Re_{cr}$ 时，流动为层流状态。
- 当 $Re > Re'_{cr}$ 时，流动为紊流状态。
- 当 $Re < Re_{cr} < Re'_{cr}$ 时，可能为层流，也可能为紊流。

在工程应用中，取 $Re_{cr}=2000$ ，当 $Re < 2000$ 时，流动为层流流动，当 $Re > 2000$ 时，可认为流动为紊流流动。

实际上, 雷诺数反映了惯性力与黏性力之比, 雷诺数越小, 表明流体黏性力对流体的作用较大, 能够消弱引起紊流流动的扰动, 保持层流状态; 雷诺数越大, 表明惯性力对流体的作用更明显, 易使流体质点发生紊流流动。

2. 有旋流动与无旋流动

有旋流动是指流场中各处的旋度 (流体微团的旋转角速度) 不等于零的流动, 无旋流动是指流场中各处的旋度都为零的流动。流体质点的旋度是一个矢量, 用 ω 表示, 其表达式为:

$$\omega = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \quad (1-10)$$

若 $\omega=0$, 流动为无旋流动, 否则为有旋流动。

流体运动是有旋流动还是无旋流动, 取决于流体微团是否有旋转运动, 与流体微团的运动轨迹无关。流体流动中, 如果考虑黏性, 由于存在摩擦力, 这时流动为有旋流动; 如果黏性可以忽略, 而流体本身又是无旋流, 如均匀流, 这时流动为无旋流动。例如, 均匀气流流过平板, 在紧靠壁面的附面层内, 需要考虑黏性影响, 因此, 附面层内为有旋流动, 附面层外的流动, 黏性可以忽略, 为无旋流动。

3. 声速与马赫数

声速是指微弱扰动波在流体介质中的传播速度, 它是流体可压缩性的标志, 对于确定可压缩流的特性和规律起着重要作用。声速表达式的微分形式为:

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (1-11)$$

声速在气体中传播时, 由于在微弱扰动的传播过程中, 气流的压强、密度和温度的变化都是无限小量, 若忽略黏性作用, 整个过程接近可逆过程, 同时该过程进行得很迅速, 又接近一个绝热过程, 所以微弱扰动的传播可以认为是一个等熵的过程。对于完全气体, 声速又可表示为:

$$c = \sqrt{kRT} \quad (1-12)$$

式中, k 为比热比; R 为气体常数。

上述公式只能用来计算微弱扰动的传播速度, 对于强扰动, 如激波、爆炸波等, 其传播速度比声速大, 并随波的强度增大而加快。

流场中某点处气体流速 V 与当地声速 c 之比为该点处气流的马赫数, 用 Ma 公式表示如下:

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (1-13)$$

马赫数表示气体宏观运动的动能与气体内部分子无规则运动的动能 (即内能) 之比。



当 $Ma \leq 0.3$ 时, 密度的变化可以忽略; 当 $Ma > 0.3$ 时, 就必须考虑气流压缩性的影响, 因此, 马赫数是研究高速流动的重要参数, 是划分高速流动类型的标准。当 $Ma > 1$ 时, 为超声速流动; 当 $Ma < 1$ 时, 为亚声速流动; 当 $Ma = 0.8 \sim 1.2$ 时, 为跨声速流动。超声速流动与亚声速流动的规律是有本质的区别, 跨声速流动兼有超声速与亚声速流动的某些特点, 是更复杂的流动。

4. 膨胀波与激波

膨胀波与激波是超声速气流特有的重要现象, 超声速气流在加速时要产生膨胀波, 减速时会出现激波。

当超声速气流流经由微小外折角所引起的马赫波时, 气流加速, 压强和密度下降, 这种马赫波就是膨胀波。超声速气流沿外凸壁流动的基本微分方程如下:

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\theta}{\sqrt{Ma^2 - 1}} \quad (1-14)$$

当超声速气流绕物体流动时, 在流场中往往出现强压缩波, 即激波。气流经过激波后, 压强、温度和密度均突然升高, 速度则突然下降。超声速气流被压缩时一般都会产生激波, 按照激波的形状, 可分为以下 3 类。

- 正激波: 气流方向与波面垂直。
- 斜激波: 气流方向与波面不垂直。例如, 当超声速气流流过楔形物体时, 在物体前缘往往产生斜激波。
- 曲线激波: 波形为曲线形。

设激波前的气流速度、压强、温度、密度和马赫数分别为 v_1 、 p_1 、 T_1 、 ρ_1 、 Ma , 经过激波后变为 v_2 、 p_2 、 T_2 和 ρ_2 , 则激波前后气流应满足以下方程。

连续性方程:

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \quad (1-15)$$

动量方程:

$$p_1 - p_2 = \rho_1 v_1^2 - \rho_2 v_2^2 \quad (1-16)$$

能量方程 (绝热):

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{k}{k-1} \times \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{k}{k-1} \times \frac{p_2}{\rho_2} \quad (1-17)$$

状态方程:

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} \quad (1-18)$$

据此, 可得出激波前后参数的关系: