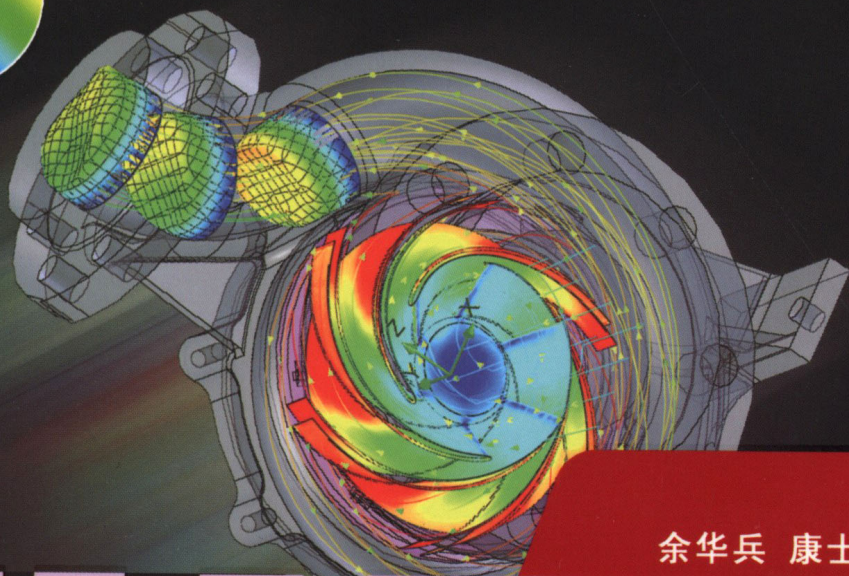


ANSYS工程应用系列丛书



三维书屋工作室

余华兵 康士廷 胡仁喜等编著

FLUENT

14.5

流场分析

视频操作 ■ 源文件 ■ 最终效果

从入门到精通



全面完整的知识体系
深入浅出的理论阐述
循序渐进的分析讲解
实用典型的实例引导



本书包含各书目分别由 ANSYS 工程应用领域的专家和学者执笔编写，书中融入了他们多年研究的经验和体会，为了便于读者快速掌握 ANSYS 工程开发技巧，书中引用大量的工程案例。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

FLUENT 14.5 流场分析从入门到精通

余华兵 康士廷 胡仁喜 等编著



机械工业出版社

本书全面介绍了 FLUENT 14.5 流场分析的各种功能和基本操作方法。全书共分为 12 章,分别介绍了流体力学基础、GAMBIT 基础知识、FLUENT 基础知识、Tecplot 软件、二维流动和传热的数值模拟、三维流动和传热的数值模拟、湍流模型模拟、多相流模型模拟、滑移网格模型模拟、动网格模型模拟、组分传输与气体燃烧的模拟和 UDF 使用等知识。

全书实例丰富,讲解精辟。随书光盘包含全书所有实例的源文件和操作过程的讲解视频,可以帮助读者方便地学习本书。

本书适合用作科研院所流体力学研究人员、流体力学相关专业硕博研究生及流体力学相关专业本科高年级学生的自学指导书或参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

FLUENT 14.5 流场分析从入门到精通/胡仁喜等编著. —北京:
机械工业出版社, 2014. 5
ISBN 978-7-111-47123-3

I. ① F… II. ①胡… 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 (2014) 第 134179 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 曲彩云 责任印制: 刘 岚

北京中兴印刷有限公司印刷

2014 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·23.25 印张·560 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47123-3

ISBN 978-7-89405-425-8 (光盘)

定价: 59.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）是20世纪60年代起伴随计算机技术迅速崛起的一门新型独立学科。它建立在流体动力学以及数值计算方法的基础上，以研究物理问题为目的，通过计算机数值计算和图像显示方法，在时间和空间上定量地描述流场数值解。

经过半个世纪的迅猛发展，各种CFD通用性软件包陆续出现，成为解决各种流体流动与传热问题的强有力的工具，并作为一种商品化软件为工业界广泛接受。随着其性能日趋完善以及应用范围的不断扩大，如今CFD技术早已超越了传统的流体机械与流体工程等应用范畴，成功应用于航空、航运、海洋、环境、水利、食品、化工、核能、冶金、建筑等各种科学技术领域。

试验研究、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试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。这是因为可以模拟的流体运动的复杂程度、解决问题的广度，都与计算机速度、内存容量等直接相关。
- 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。

以上这些是风洞试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试验研究相结合。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。依靠数值试验、地面试验和物理特性分析，验证计算方法的可靠性，从而进一步改进计算方法。

FLUENT 是通用 CFD 软件包，从 1975 年在谢菲尔德大学开发出 Tempest（FLUENT 的原形）到 1988 年 FLUENT Inc. 成立，再到 2006 年被 ANSYS 公司收购，其间 FLUENT 收购了同领域竞争的 FDI 公司和 POLYFLOW 公司，使其功能不断得到扩充和发展。

FLUENT 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。

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，FLUENT 软件采用不同的离散格式和数值方法，以期在特定的领域内使计算速度、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的复杂流动计算问题。基于上述思想，FLUENT 开发了适用于各个领域的流动模拟软件，这些软件能够模拟流体流动、传热传质、化学反应和其他复杂的物理现象，软件之间采用了统一的网格生成技术及共同的图形界面，而各软件之间的区别仅在于应用的工业背景不同，因此大大方便了用户。

FLUENT 同传统的 CFD 计算方法相比，具有以下优点：

1) 稳定性好。FLUENT 经过大量算例考核，同试验符合较好。

2) 适用范围广。FLUENT 含有多种传热燃烧模型及多相流模型，可应用于从可压到不可压、从低速到高超声速、从单相流到多相流、化学反应、燃烧、气固混合等几乎所有与流体相关的领域

3) 精度提高。可达二阶精度。

本书全面介绍了 FLUENT 14.5 流场分析的各种功能和基本操作方法。全书共分为 12 章，分别介绍了流体力学基础、GAMBIT 基础知识、FLUENT 基础知识、Tecplot 软件、二维流动和传热的数值模拟、三维流动和传热的数值模拟、湍流模型模拟、多相流模型模拟、滑移网格模型模拟、动网格模型模拟、组分传输与气体燃烧的模拟和 UDF 使用等知识。

全书实例丰富，讲解精辟。随书光盘包含全书所有实例的源文件和操作过程的讲解视频，可以帮助读者方便地学习本书。

本书主要由余华兵、康士廷和胡仁喜主要编写。另外，参加编写的还有李鹏、周冰、董伟、李瑞、王敏、张俊生、王玮、孟培、王艳池、阳平华、袁涛、闫聪聪、王培合、路纯红、王义发、王玉秋、杨雪静、张日晶、卢园、万金环、王渊峰、王兵学等。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陆网站 www.bj-sanweishuwu.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，以便作进一步修改和补充。

编者

目 录

前言

第 1 章 流体力学基础	1
1.1 流体力学基本概念	2
1.1.1 连续介质模型	2
1.1.2 流体的基本性质	2
1.1.3 作用在流体上的力	4
1.1.4 流动分析基础	4
1.2 流体运动的基本概念	5
1.3 流体流动及传热的基本控制方程	8
1.4 边界层理论	10
第 2 章 GAMBIT 基础知识	12
2.1 CFD 软件概述	13
2.2 FLUENT 软件包概述	16
2.3 计算网络	18
2.3.1 网格类型	19
2.3.2 网格类型的选择	21
2.3.3 网格质量	21
2.4 GAMBIT 功能简介	22
2.4.1 GAMBIT 的特点	23
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
2.4.5 二维搅拌模型与网格划分	29
2.4.6 三维气体吸收塔模型与网格划分	33
2.4.7 三管相贯模型与网格划分	37
第 3 章 FLUENT 软件的操作使用	43
3.1 FLUENT14.5 求解器功能简介	44
3.1.1 FLUENT 14.5 求解步骤	44
3.1.2 FLUENT 14.5 启动界面	44
3.1.3 FLUENT 14.5 图形用户界面	45
3.1.4 FLUENT 14.5 文件读写	46
3.1.5 FLUENT 14.5 对网格的基本操作	49
3.1.6 FLUENT 14.5 基本计算模型	53
3.1.7 FLUENT 14.5 求解器选择	53
3.1.8 选择 FLUENT 14.5 的运行环境	54
3.1.9 FLUENT 14.5 的材料定义	55

3.1.10	FLUENT 14.5 的湍流模型	58
3.1.11	FLUENT 14.5 边界条件	65
3.1.12	设置 FLUENT 14.5 求解参数	73
3.2	三维机头温度场的数值模拟实例	75
3.2.1	利用 GAMBIT 创建模型	76
3.2.2	实体网格的划分	80
3.2.3	边界条件和区域的设定	80
3.2.4	网格输出	81
3.2.5	利用 FLUENT 求解器求解	82
3.2.6	后处理	87
第 4 章	Tecplot 软件简介	90
4.1	Tecplot 概述	91
4.1.1	Tecplot 软件菜单介绍	91
4.1.2	Tecplot 软件边框工具栏选项的介绍	93
4.1.3	2D 图形的编辑	93
4.1.4	3D 图形的编辑	99
4.2	Tecplot 后处理实例——三维弯管水流速度场模拟	104
4.2.1	实例概述	104
4.2.2	模型的建立	104
4.2.3	网格的划分	106
4.2.4	求解计算	106
4.2.5	Tecplot 后处理	108
第 5 章	二维流动和传热的数值模拟	110
5.1	轴对称孔板流量计的流动模拟	111
5.1.1	利用 GAMBIT 创建模型	111
5.1.2	网格的划分	112
5.1.3	边界条件和区域的设定	114
5.1.4	网格的输出	115
5.1.5	利用 FLUENT 求解器求解	115
5.2	二维自然对流传热问题的分析	122
5.2.1	利用 GAMBIT 创建模型	122
5.2.2	网格的划分	123
5.2.3	求解计算	124
5.3	喷嘴内气体流动分析	128
5.3.1	利用 GAMBIT 创建模型	128
5.3.2	网格的划分	129
5.3.3	求解计算	130
5.4	二维瞬间闸门倾洪流动模拟	133
5.4.1	利用 GAMBIT 创建模型	133

5.4.2	网格的划分	134
5.4.3	求解计算	134
第 6 章	三维流动和传热的数值模拟	138
6.1	三维弯管流动的模拟	139
6.1.1	利用 GAMBIT 创建模型	139
6.1.2	划分实体网格	146
6.1.3	边界条件和区域的设定	148
6.1.4	网格输出	148
6.1.5	利用 FLUENT 求解器求解	148
6.1.6	后处理	154
6.2	三维室内温度传热模拟	156
6.2.1	利用 GAMBIT 创建模型	157
6.2.2	网格的划分	158
6.2.3	求解计算	159
6.3	三维喷管流动与传热的耦合求解	163
6.3.1	利用 GAMBIT 读入三维物理模型	164
6.3.2	利用 GAMBIT 划分网格	165
6.3.3	设定区域属性与边界条件	166
6.3.4	输出网格文件	168
6.3.5	利用 FLUENT 进行流动与换热的耦合求解	168
6.3.6	后处理	179
6.4	周期性三维流动与传热模拟	181
6.4.1	利用 GAMBIT 创建几何模型	182
6.4.2	利用 GAMBIT 划分网格	188
6.4.3	利用 GAMBIT 初定边界	189
6.4.4	利用 GAMBIT 导出 Mesh 文件	192
6.4.5	利用 FLUENT 14.5 导入 Mesh 文件	192
6.4.6	周期边界计算模型的设定过程	192
6.4.7	FLUENT 14.5 自带后处理	200
第 7 章	湍流模型模拟	204
7.1	湍流模型概述	205
7.1.1	单方程模型	205
7.1.2	标准 $k\sim\epsilon$ 模型	206
7.1.3	重整化群 $k\sim\epsilon$ 模型	207
7.1.4	可实现 $k\sim\epsilon$ 模型	207
7.1.5	雷诺应力模型	209
7.1.6	大涡模拟	210
7.2	湍流模型的设置	210
7.3	湍流模型实例——瀑布流过圆柱形石块时的流场	212

7.3.1	建立模型	212
7.3.2	网格的划分	214
7.3.3	求解计算	215
第 8 章	多相流模型模拟	223
8.1	FLUENT 中的多相流模型	224
8.1.1	VOF 模型	224
8.1.2	混合模型	224
8.1.3	欧拉模型	225
8.2	通用多相流模型的选择与使用	226
8.2.1	通用多相流模型的选择	226
8.2.2	通用多相流模型的设置	226
8.2.3	一般多相流问题的求解策略	228
8.3	二维喷射流场模拟实例	228
8.3.1	建立模型	229
8.3.2	划分网格	229
8.3.3	求解计算	230
8.4	低气相容积率的气泡流混合模型模拟	236
8.4.1	利用 GAMBIT 创建几何模型	236
8.4.2	利用 GAMBIT 划分网格	239
8.4.3	利用 GAMBIT 初定边界	240
8.4.4	利用 GAMBIT 导出 Mesh 文件	240
8.4.5	利用 FLUENT 14.5 导入 Mesh 文件	241
8.4.6	混合模型的设定过程	241
8.4.7	模型初始化	246
8.4.8	迭代计算	247
8.4.9	FLUENT 14.5 自带后处理	247
8.5	套管内气液两相流动模拟	249
8.5.1	利用 GAMBIT 创建几何模型	249
8.5.2	利用 GAMBIT 划分网格	252
8.5.3	求解计算	252
第 9 章	滑移网格模型模拟	258
9.1	滑移网格模型概述	259
9.2	滑移网格的设置	260
9.3	用 MRF 法模拟二维离心泵的流场	261
9.3.1	利用 GAMBIT 创建几何模型	262
9.3.2	利用 GAMBIT 划分网格	272
9.3.3	利用 GAMBIT 初建边界条件	273
9.3.4	利用 GAMBIT 导出 Mesh 文件	275
9.3.5	利用 FLUENT 14.5 导入 Mesh 文件	275

9.3.6	计算模型的设定过程	276
9.3.7	模型初始化	281
9.3.8	迭代计算	282
9.3.9	FLUENT 14.5 自带后处理	282
9.4	用滑动网格法模拟二维离心泵的流场	284
9.4.1	利用 FLUENT 14.5 导入 Case 文件	285
9.4.2	滑动网格模型的修改与设定	285
9.4.3	设定观看录像	286
9.4.4	迭代计算	287
9.4.5	FLUENT 14.5 自带后处理	289
第 10 章	动网格模型模拟	291
10.1	动网格模型概述	292
10.2	动网格的设置	293
10.2.1	动网格参数的设置	294
10.2.2	动网格运动方式的定义	295
10.2.3	动网格预览	296
10.3	二维实体入水模拟实例	297
10.3.1	建立模型	297
10.3.2	划分网格	298
10.3.3	求解计算	299
10.4	活塞在气缸中运动模拟实例	303
10.4.1	利用 FLUENT 求解动网格问题	304
10.4.2	计算结果后处理	309
第 11 章	组分传输与气体燃烧的模拟	312
11.1	燃烧模型	313
11.1.1	燃烧模型概述	313
11.1.2	燃烧模型的计算方式	314
11.1.3	燃烧模拟的设置	316
11.2	氢气燃烧反应实例	318
11.2.1	气体燃烧温度场模拟	318
11.2.2	废气排放组分浓度模拟	324
第 12 章	UDF 使用简介	330
12.1	UDF 基础	331
12.1.1	UDF 概述	331
12.1.2	FLUENT 网格拓扑	331
12.1.3	FLUENT 数据类型	332
12.2	UDF 宏	333
12.2.1	UDF 中访问 FLUENT 变量的宏	333
12.2.2	UDF 实用工具宏	338

12.2.3 常用 DEFINE 宏	348
12.3 UDF 的解释和编译	351
12.3.1 UDF 的解释	351
12.3.2 UDF 的编译	352
12.3.3 在 FLUENT 中激活 UDF	352
12.4 UDF 应用实例——管道流动凝固过程	354

第 1 章

流体力学基础

流体力学是力学的一个重要分支,也是理论性很强的一门学科,涉及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,以及流体流动和传热的基本控制方程、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传热的基本控制方程,为后面的软件操作打下理论基础。

学

习

要

点

● 流体基本性质概述

● 描述流体运动的基本控制方程

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

气体与液体都属于流体。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 是设想的一个最小体积，在 Δv 内包含足够多的分子，使得密度的统计平均值 ($\Delta m/\Delta v$) 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，对于空间任意点的流体物理量都是指位于该点的流体质点的物理量。

1.1.2 流体的基本性质

1. 流体的压缩性

流体体积会随着作用于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与热

力过程有关。

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. 流体的粘性

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粘性, 由粘性产生的作用力叫做粘性阻力或内摩擦力。粘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 为动力粘度, 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。

粘度受温度的影响很大, 当温度升高时, 液体的粘度减小, 粘性下降, 而气体的粘度增大, 粘性增加。在压强不是很高的情况下, 粘度受压强的影响很小, 只有当压强很高(例如几十个兆帕)时, 才需要考虑压强对粘度的影响。

当流体的粘性较小(如空气和水的粘性都很小), 运动的相对速度也不大时, 所产生的粘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粘性的, 称为无粘流体, 也叫做理想流体; 而对于需要考虑粘性的流体, 则称为粘性流体。

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, 几乎可以认为是零, 所以与壁面进行的热量传递形式主要是热传导, 而层流以外的区域的热量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里叶导热定律确定:

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

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 为热导率; 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传热量可用下式表达:

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

式中， h 为表面传热系数，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。对于粘性流体流动，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。在定常流动中，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。对于非定常流动，迹线与流线是不同的。

1.2 流体运动的基本概念

1. 层流流动与湍流流动

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，这种流动状态称为湍流或湍流流动。我们把流动状态发生变化（例如从层流到湍流）时的流速称为临界速度。

大量试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 为动力粘度。

由层流转变到湍流时所对应的雷诺数称为上临界雷诺数，用 Re'_{cr} 表示；由湍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，就可确定粘性流体的流动状态。

当 $Re < Re_{cr}$ 时，流动为层流状态。

当 $Re > Re'_{cr}$ 时，流动为湍流状态。

当 $Re_{cr} < Re < Re'_{cr}$ 时，可能为层流，也可能为湍流。

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，可认为流动为湍流流动。

实际上，雷诺数反映了惯性力与粘性力之比，雷诺数越小，表明流体粘性力对流体的作用较大，能够削弱引起湍流流动的扰动，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，易使流体质点发生湍流流动。

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，如果考虑粘性，由于存在摩擦力，这时流动为有旋流动；如果粘性可以忽略，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，需要考虑粘性影响，因此，附面层内为有旋流动，附面层外的流动，粘性可以忽略，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，若忽略粘性作用，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