

计算流体力学教学参考书

FLUENT

流体工程仿真计算 实例与应用

韩占忠 王敬 兰小平 编



本书配有光盘

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

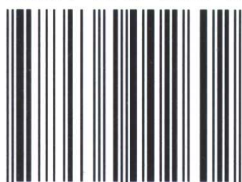
责任编辑：向继红

封面设计：庚辰年代

内容简介

本书是利用界面友好、使用简单的大型商业计算机应用软件FLUENT进行流体流动与传热计算的一本入门书籍。全书以“跟我学”的形式编写而成。书中给出了11个实例，读者只要按照书中的步骤一步一步进行，即可完成一个具体问题的数值模拟与分析，进而逐步掌握利用FLUENT进行流体流动数值模拟的基本方法。书中使用FLUENT 6.0版本，GAMBIT 2.0版本。本书配有1张光盘，可对书中所举实例进行动画演示。

ISBN 7-5640-0260-3



9 787564 002602 >

ISBN 7-5640-0260-3

定价：39.00 元

计算流体力学教学参考书

FLUENT—

流体工程仿真计算实例与应用

韩占忠 王 敬 兰小平 编

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

FLUENT:流体工程仿真计算实例与应用/韩占忠,王敬,
兰小平编. —北京:北京理工大学出版社,2004.6
计算流体力学教学参考书
ISBN 7-5640-0260-3

I. F… II. ①韩…②王…③兰… III. 流体工程—仿真—工
程计算—高等学校—教学参考资料 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 025775 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68912824(发行部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

电子邮箱 / chiefedit@bitpress.com.cn

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京圣瑞伦印刷厂

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 19.75

字 数 / 480 千字

版 次 / 2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

印 数 / 1~4000 册

责任校对 / 陈玉梅

定 价 / 39.00 元

责任印制 / 母长新

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

空气、水、油等易于流动的物质被统称为流体。在力的作用下,流体的流动可引起能量的传递、转换和物质的传送,利用流体进行力传递、进行功和能转换的机械就称为流体机械。比如,泵是一种将电能转换为流体动能并输送液体的机械;风机是一种将机械能或电能转换为风能的机械;水力发电机就是一种将水的势能和动能转换为电能的一种机械。此类例子举不胜举,因此,流体机械与我们的生活和工作密切相关。流体力学就是一门研究流体流动规律以及流体与固体相互作用的一门学科,研究的范围涉及到风扇的设计,发动机内气体的流动以及车辆外形的减阻设计,水利机械的工作原理,输油管道的铺设,供水系统的设计,乃至航海、航空和航天等领域内动力系统和外形设计等等。

自从1687年牛顿定律公布以来,直到本世纪50年代初,研究流体运动规律的主要方法有两种:一是实验研究,以实验为研究手段;另一种是理论分析方法,利用简单流动模型假设,给出某些问题的解析解。前者耗费巨大,而后者对于较复杂的非线性流动现象目前还有些无能为力。20世纪70年代以来,飞速发展起来的计算流体力学为实验研究和理论研究都起到了促进作用,也为简化流动模型提供了更多的依据,使很多分析方法得到发展和完善。实验研究、理论分析方法和数值模拟已成为当前研究流体运动规律的三种基本方法。

任何流体运动的规律都是以质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律为基础的。这些基本定律可由数学方程组来描述,如欧拉方程、N-S方程。采用数值计算方法,通过计算机求解这些控制流体流动的数学方程,进而研究流体的运动规律,这样的学科就是计算流体力学。

尽管流动规律仍然满足质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律,但流体力学不同于固体力学,一个根本原因就在于流体的流动过程中发生了巨大的形变,使问题求解变得异常复杂。其控制方程属于非线性的偏微分方程,除几个简单问题之外,一般来说很难求得解析解。为此,对具体问题进行数值求解就成为研究流体流动的一个重要的研究方向和方法,其基础就是计算流体力学。对于大多数人来说,不必要掌握流体力学微分方程的求解以及进行计算流体力学的深入研究,但在工作中又需要对某些具体的流动过程进行分析、计算和研究,由此,计算准确、界面友好、使用简单,又能解决问题的大型商业计算机软件应运而生。目前,比较著名的有FLUENT,CFX,STAR-CD等,本书将向读者介绍FLUENT软件。

本书是以基础知识、二维流动和三维流动的顺序编写而成的。其中第一章是流体力学的基础知识和FLUENT软件简介,可作为后续内容的简单铺垫。读者可在后面的学习中不断翻阅这一章,以期对所进行模拟的问题和结果有一个理论的说明。第二章是二维流动数值模拟部分,建模和计算都比较简单,是本书的基础。第三章是三维流动问题,建模和计算以及后处理都比较复杂。由于篇幅的限制,本书不可能面面俱到并进行详细讲解,但相信读者通过本书的学习,一定能领会其中的技巧。

本书是利用 FLUENT 软件进行流体流动与传热计算的一本入门书籍,是以“跟我学”的形式编写的。在编写中,所使用 FLUENT 的版本是 6.0, GAMBIT 的版本是 2.0。书中给出了 11 个具体的例子,读者只要按照书中的步骤一步一步进行,即可完成一个具体问题的数值模拟与分析。通过本书中若干个例子的学习,读者可逐步掌握利用 FLUENT 进行流体流动数值模拟的基本方法,进入流体流动与传热数值模拟这一广阔的领域,尽情地对所感兴趣的问题进行数值模拟和研究,在各自研究的领域内发挥各自的特点,不再受到流体流动问题的困扰。本书第一章、第二章的第 1,2,3,4,5 节以及第三章的第 1 节由韩占忠编写;第三章的第 2 节由兰小平编写;第二章的第 6 节和第三章的第 3,4,5 节由王敬编写;全书由韩占忠总纂。在本书的编写过程中,得到了北京理工大学机械与车辆工程学院王国玉教授的热心指导以及硕士研究生陶磊、张震等同学的大力协助,还得到了中国北方车辆研究所工程分析与可靠性中心的魏来生主任、汪建兵工程师和郭刘洋工程师的大力帮助,在此一并致谢。

本书既是广大工程技术人员利用 FLUENT 软件进行流体流动数值模拟计算的一本入门书,又可作为大专院校相关专业本科和硕士研究生的流体力学以及传热学的教学参考书。鉴于编者水平有限,书中难免有不当之处,还请广大读者给予指正,不胜感谢。

编 者
2004 年 3 月

目 录

第一章 流体力学基础与 FLUENT 简介

第一节 概论	(1)
一、流体的密度、重度和比重	(1)
二、流体的黏性——牛顿流体与非 牛顿流体	(2)
三、流体的压缩性——可压缩与不 可压缩流体	(3)
四、液体的表面张力	(4)
第二节 流体力学中的力与压强	(4)
一、质量力与表面力	(4)
二、绝对压强、相对压强与真空度	(4)
三、液体的汽化压强	(5)
四、静压、动压和总压	(5)
第三节 能量损失与总流的能量方程	(6)
一、沿程损失与局部损失	(6)
二、总流的伯努里方程	(7)
三、入口段与充分发展段	(7)
第四节 流体运动的描述	(8)
一、定常流动与非定常流动	(8)
二、流线与迹线	(8)
三、流量与净通量	(8)
四、有旋流动与有势流动	(8)
五、层流与湍流	(9)
第五节 亚音速与超音速流动	(10)
一、音速与流速	(10)
二、马赫数与马赫锥	(10)
三、速度系数与临界参数	(11)
四、可压缩流动的伯努里方程	(11)
五、等熵滞止关系式	(11)
第六节 正激波与斜激波	(12)
一、正激波	(12)
二、斜激波	(13)
第七节 流体多维流动基本控制方程	(14)
一、物质导数	(14)
二、连续性方程	(14)
三、N-S 方程	(15)

第八节 边界层与物体阻力	(16)
一、边界层及基本特征	(16)
二、层流边界层微分方程	(16)
三、边界层动量积分关系式	(17)
四、物体阻力	(18)
第九节 湍流模型	(18)
第十节 FLUENT 简介	(19)
一、程序的结构	(19)
二、FLUENT 程序可以求解的 问题	(20)
三、用 FLUENT 程序求解问题 的步骤	(21)
四、关于 FLUENT 求解器的说明	(21)
五、FLUENT 求解方法的选择	(21)
六、边界条件的确定	(22)

第二章 二维流动与传热的数值计算

第一节 冷、热水混合器内部二维 流动	(27)
一、前处理——利用 GAMBIT 建立 计算模型	(28)
第 1 步 确定求解器	(28)
第 2 步 创建坐标网格图	(29)
第 3 步 由节点创建直线	(31)
第 4 步 创建圆弧边	(32)
第 5 步 创建小管嘴	(33)
第 6 步 由线组成面	(34)
第 7 步 确定边界线的内部节点分布 并创建结构化网格	(35)
第 8 步 设置边界类型	(38)
第 9 步 输出网格并保存会话	(40)
二、利用 FLUENT 进行混合器内流动 与热交换的仿真计算	(41)
第 1 步 与网格相关的操作	(41)
第 2 步 建立求解模型	(44)
第 3 步 设置流体的物理属性	(46)
第 4 步 设置边界条件	(46)

第 5 步 求解	(49)	第 5 步 创建网格	(100)
第 6 步 显示计算结果	(53)	第 6 步 设置边界类型	(102)
第 7 步 使用二阶离散化方法重新 计算	(59)	第 7 步 输出网格文件	(103)
第 8 步 自适应性网格修改功能	(61)	二、利用 FLUENT 进行仿真计算	(104)
小结	(65)	第 1 步 启动 FLUENT 2D 求解器 并读入网格文件	(104)
课后练习	(65)	第 2 步 网格检查与确定长度单位	(104)
第二节 喷管内二维非正常流动	(65)	第 3 步 建立计算模型	(105)
一、利用 GAMBIT 建立计算模型	(66)	第 4 步 设置流体材料属性	(107)
第 1 步 确定求解器	(66)	第 5 步 设置工作压强	(108)
第 2 步 创建坐标网格图和边界线 的节点	(66)	第 6 步 设置边界条件	(108)
第 3 步 由节点创建直线	(68)	第 7 步 利用求解器进行求解	(109)
第 4 步 利用圆角功能对 I 点处的 角倒成圆弧	(68)	第 8 步 计算结果的后处理	(117)
第 5 步 由边线创建面	(69)	小结	(121)
第 6 步 定义边线上的节点分布	(70)	课后练习	(122)
第 7 步 创建结构化网格	(71)	第四节 三角翼不可压缩的外部绕流 (空化模型应用)	(122)
第 8 步 设置边界类型	(72)	第 1 步 启动 FLUENT 2D 求解器 并读入网格文件	(122)
第 9 步 输出网格并保存会话	(73)	第 2 步 网格检查与确定长度 单位	(122)
二、利用 FLUENT 进行喷管内流动 的仿真计算	(74)	第 3 步 设置求解器	(124)
第 1 步 与网格相关的操作	(74)	第 4 步 设置流体材料及其物理 性质	(126)
第 2 步 确定长度单位	(76)	第 5 步 设置流体的流相	(126)
第 3 步 建立求解模型	(77)	第 6 步 设置边界条件	(128)
第 4 步 设置流体属性	(78)	第 7 步 求解	(130)
第 5 步 设置工作压强为 0 atm	(79)	第 8 步 对计算结果的后处理	(135)
第 6 步 设置边界条件	(79)	小结	(137)
第 7 步 求解定常流动	(81)	课后练习	(137)
第 8 步 非正常边界条件设置以及 非正常流动的计算	(87)	第五节 VOF 模型的应用	(137)
第 9 步 求解非定常流	(89)	一、利用 GAMBIT 建立计算模型	(138)
第 10 步 对非正常流动计算数据 的保存与后处理	(92)	第 1 步 启动 GAMBIT 并选择 FLUENT5/6 求解器	(138)
小结	(97)	第 2 步 建立坐标网格并创建 节点	(138)
课后练习	(98)	第 3 步 由节点连成直线段	(139)
第三节 三角翼的可压缩外部绕流	(98)	第 4 步 创建圆弧	(140)
一、利用 GAMBIT 建立计算模型	(98)	第 5 步 创建线段的交点 G	(140)
第 1 步 启动 Gambit, 并选择求解器 为 FLUENT5/6	(98)	第 6 步 将两条线在 G 点处分别 断开	(141)
第 2 步 创建节点	(98)	第 7 步 删除 DG 直线和 FG 弧线	(141)
第 3 步 由节点连成线	(99)	第 8 步 由边创建面	(143)
第 4 步 由边线创建面	(100)		

第 9 步 定义边线上的节点分布 … (143)	第 2 步 创建混合器主体 …… (202)
第 10 步 在面上创建结构化网格…(144)	第 3 步 设置混合器的切向入流管 … (203)
第 11 步 设置边界类型 …… (145)	第 4 步 去掉小圆柱体与大圆柱体相 交的多余部分,并将三个圆柱 体联结成一个整体 …… (205)
第 12 步 输出网格文件并保存 会话 …… (146)	第 5 步 创建主体下部的圆锥 …… (205)
二、利用 FLUENT 2D 求解器进行 求解 …… (147)	第 6 步 创建出流小管 …… (206)
第 1 步 读入、显示网格并设置 长度单位 …… (147)	第 7 步 将混合器上部、渐缩部分 和下部出流小管组合为一 个整体 …… (207)
第 2 步 设置求解器 …… (147)	第 8 步 对混合器内区域划分 网格 …… (207)
第 3 步 设置流体材料及属性 …… (149)	第 9 步 检查网格划分情况 …… (209)
第 4 步 设置基本相和第二相 …… (150)	第 10 步 设置边界类型 …… (210)
第 5 步 运算环境设置 …… (151)	第 11 步 输出网格文件(.msh) … (210)
第 6 步 设置边界条件 …… (151)	二、利用 FLUENT 3D 求解器进行 求解 …… (210)
第 7 步 求解 …… (153)	第 1 步 检查网格并定义长度 单位 …… (210)
第 8 步 计算结果的后处理 …… (165)	第 2 步 创建计算模型 …… (211)
小结 …… (171)	第 3 步 设置流体的材料属性 …… (212)
第六节 组分传输与气体燃烧 …… (171)	第 4 步 设置边界条件 …… (214)
一、利用 GAMBIT 建立计算模型 …… (172)	第 5 步 求解初始化 …… (216)
第 1 步 打开 GAMBIT …… (172)	第 6 步 设置监视器 …… (216)
第 2 步 对空气进口边界进行 分网 …… (172)	第 7 步 保存 Case 文件 …… (217)
第 3 步 设置边界条件 …… (172)	第 8 步 求解计算 …… (217)
第 4 步 输出 2D 网格 …… (173)	第 9 步 保存计算结果 …… (218)
二、利用 FLUENT-2D 求解器进行 模拟计算 …… (173)	三、计算结果的后处理 …… (218)
第 1 步 与网格相关的操作 …… (174)	第 1 步 读入 Case 和 Data 文件 … (218)
第 2 步 设置求解模型 …… (174)	第 2 步 显示网格 …… (218)
第 3 步 流体材料设置 …… (176)	第 3 步 创建等(坐标)值面 …… (218)
第 4 步 边界条件设置 …… (178)	第 4 步 绘制温度与压强分布图 … (219)
第 5 步 使用常比热容的初始化 并求解 …… (181)	第 5 步 绘制速度矢量图 …… (221)
第 6 步 采用变比热容的解法 …… (184)	第 6 步 绘制流体质点的迹线 …… (222)
第 7 步 后处理 …… (186)	第 7 步 绘制 XY 曲线 …… (224)
第 8 步 NO _x 预测 …… (192)	小结 …… (228)
小结 …… (199)	课后练习 …… (228)
第三章 三维流动与传热的数值计算	第二节 粘性流体通过圆管弯头段的 三维流动 …… (228)
第一节 冷、热水混合器内的三维流动 与换热 …… (201)	一、前处理——利用 GAMBIT 建立计算 模型 …… (229)
一、利用 GAMBIT 建立混合器计算 模型 …… (202)	第 1 步 确定求解器 …… (229)
第 1 步 启动 GAMBIT 并选定求解器 (FLUENT5/6) …… (202)	

第2步	创建圆环	(229)
第3步	创建立方体	(229)
第4步	移动立方体	(230)
第5步	分割圆环	(230)
第6步	删除3/4圆环	(231)
第7步	建立弯管直段	(231)
第8步	移动弯管直段	(232)
第9步	整合弯管和直段	(232)
第10步	边界层的设定	(232)
第11步	划分面网格	(233)
第12步	划分体网格	(234)
第13步	定义边界类型	(235)
第14步	输出网格文件	(235)
二、利用 FLUENT 3D 求解器进行模拟计算		
第1步	启动 FLUENT, 进入 3D 模式	(236)
第2步	读入网格数据	(237)
第3步	网格检查	(237)
第4步	显示网格	(237)
第5步	建立求解模型	(238)
第6步	设置标准 $k-\epsilon$ 湍流模型	(238)
第7步	设置流体的物理属性	(239)
第8步	设置边界条件	(240)
第9步	求解控制	(242)
第10步	求解	(243)
第11步	显示初步计算结果	(245)
第12步	流线显示	(248)
小结		
第三节 三维稳态热传导问题		
一、利用 GAMBIT 进行网格划分		
第1步	导入几何模型	(250)
第2步	选取求解器	(251)
第3步	网格划分	(251)
第4步	边界条件设置	(252)
第5步	网格检查	(253)
第6步	输出网格	(255)
二、利用 FLUENT-3D 求解器进行数值模拟计算		
第1步	在 FLUENT 中读入网格文件	(255)
第2步	选取求解器	(256)
第3步	材料设置	(257)
第4步	边界条件	(258)
第5步	求解控制	(261)
第6步	后处理	(263)
小结		
第四节 动网格问题		
一、利用 FLUENT-3D 进行计算		
第1步	与网格有关的操作	(265)
第2步	模型设置	(267)
第3步	材料设置	(268)
第4步	边界条件设置	(268)
第5步	网格运动设置	(268)
第6步	求解	(273)
二、利用 FLUENT-3D 进行后处理		
第1步	检查最后一个时间步(BDC)的解	(279)
第2步	检查上死点的解	(279)
第3步	回放温度等高线动画	(281)
第4步	显示上死点时缸内的流动矢量切面	(281)
小结		
第五节 叶轮机械的 Mixing Plane 模型		
一、利用 FLUENT-3D 求解器进行计算		
第1步	网格	(286)
第2步	单位设置	(287)
第3步	计算模型设置	(288)
第4步	混合面(Mixing Plane)设置	(289)
第5步	流体材料设置	(290)
第6步	边界条件设置	(291)
第7步	求解	(296)
二、利用 FLUENT-3D 进行后处理		
第1步	生成后处理的一个等值面	(302)
第2步	显示速度矢量	(302)
第3步	平面 $x=0$ 上绘全压的周向平均量	(304)
第4步	显示全压的等高线图	(305)
小结		
附录		
参考文献		



第一章 流体力学基础与 FLUENT 简介

本章介绍流体力学一些重要的基础知识，并对 FLUENT 软件包的结构、功能和使用进行简单介绍。流体力学是进行流体力学工程计算的基础，从软件使用的角度来说，可以略过这一部分直接阅读后续章节。但若想对所计算的结果进行分析与整理，在设置边界条件时有所依据，则流体力学的有关知识是最基础性的。本章主要叙述流体流动的一些基本概念和基本理论，对于有一定基础的读者可略过。

第一节 概 论

看到一股风吹过树梢，看到一江水流过岸边，看到汽车驶过后所卷起的扬尘，打开水龙头看到自来水哗哗的流出，流体的流动是那样的自然。面对这些现象，我们用什么样的量才能描述不同的流体，用什么方法才能描述这千姿百态的流动世界呢？区别于不同流体的是其本身的物理性质，例如密度、黏度、压缩性等物理量；而描述流体运动的量，从局部讲是某一点的速度、压强和流体密度，从整体讲则主要是平均速度、动量和压力等；而流体运动的原因则是外部的作用力。

一、流体的密度、重度和比重

流体的密度：我们常说空气比液体轻，油又比水轻，其原因就是空气的密度比液体小，油的密度又比水小。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：

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

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：

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

例如，零下 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时水的密度为 $1\ 000\ \text{kg/m}^3$ ，常温 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时空气的密度为 $1.24\ \text{kg/m}^3$ 。各种流体的具体密度值可查阅有关文献。

这里要特别注意，流体的密度是流体本身所固有的物理量，它随温度和压强的变化而变化。

流体的重度：流体的重度与流体的密度有一个简单的关系式，即：

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

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

流体的比重：流体的比重定义为该流体的密度与零下 4°C 时水的密度之比。

二、流体的黏性——牛顿流体与非牛顿流体

流体的黏性：可由牛顿内摩擦定律导出。

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

式中： τ 表示切应力，单位为 Pa ； du/dy 表示流体的剪切变形速率； μ 则表示二者之间的比例系数，又称为流体的动力黏度，单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。另外，还将 μ/ρ 的比值称为运动黏度，常用 ν 表示，其单位为 m^2/s 。

例如， 20°C 时水的动力黏度为 $0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，运动黏度为 $1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ； 20°C 时空气的动力黏度为 $0.18 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，运动黏度为 $14.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

在研究流体流动过程时，若考虑流体的黏性，则称为黏性流动，相应的称流体为黏性流体；若不考虑流体的黏性，则称为理想流体的流动，相应的称流体为理想流体。

牛顿内摩擦定律适用于空气、水、石油等绝大多数机械工业中常用的流体。凡是符合切应力与速度梯度成正比，如图 1-1-1(a)，可以用一条通过原点的直线所表示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，如图 1-1-1(b)(c)(d)。例如溶化的沥青、糖浆等流体均属于非牛顿流体。

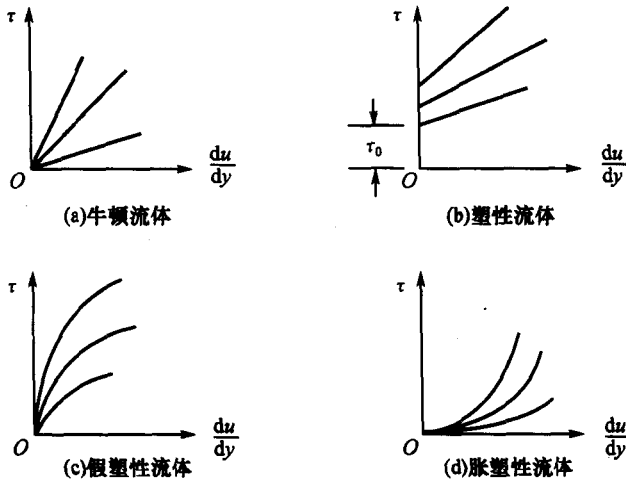


图 1-1-1 牛顿流体与非牛顿流体

非牛顿流体有如下三种不同类型：

塑性流体，如牙膏等，他们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后，其切应力才与速度梯度成正比，即：

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

假塑性流体，如泥浆等。其切应力与速度梯度的关系是：

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

胀塑性流体，如乳化液等。其切应力与速度梯度的关系是：

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

注意：

- (1) 流体的黏度与压强的关系不大，而与温度的关系密切。
- (2) 液体的黏度随温度的增高而降低；气体的黏度随温度的增高而增大。

三、流体的压缩性——可压缩与不可压缩流体

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，一是外部压强发生了变化；另一个就是流体的温度发生了变化。

流体的等温压缩率 β

当质量为 M ，体积为 V 的流体外部压强发生 Δp 的变化时，相应其体积也发生了 ΔV 的变化，则定义流体的等温压缩率为：

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

这里的负号是考虑到 ΔV 与 Δp 总是符号相反的缘故； β 的单位为 $1/\text{Pa}$ 。流体等温压缩率的物理意义：当温度不变时，每增加单位压强所产生的流体体积相对变化率。

考虑到压缩前后流体的质量不变，上式还有另外一种表示形式，即：

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

气体的等温压缩率可由气体状态方程求得：

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

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，相应其体积也发生了 ΔV 的变化，则定义流体的体积膨胀系数为：

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

考虑到膨胀前后流体的质量不变，上式还有另外一种表示形式，即：

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

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

对于气体，可由气体状态方程得到：

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

例如 20°C 时水在一个大气压下的等温压缩率为 $0.505 \times 10^{-4} \text{ Pa}^{-1}$ ；体积膨胀系数为 $1.61 \times$

10^{-4} K^{-1} 。

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，相应的称流体为压缩流体，例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，相应的称流体为不可压缩流体，例如水、油等液体的流动。

四、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有拉应力，称为表面张力，其方向与液面相切，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。

细玻璃管插入水中时，由于表面张力向上，能自动将管中的液柱提升一个高度 h ，则有：

$$h = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho g d} \quad (1-1-14)$$

例如，对于 20°C 的水，水与玻璃的接触角 $\theta = 0^\circ$ ，表面张力 $\sigma = 0.073 \text{ N/m}$ ，水的密度为 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，玻璃管的直径为 5 mm ，则水在玻璃管中的上升高度为 6 mm 。

第二节 流体力学中的力与压强

一、质量力与表面力

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上的力称为质量力。比如在重力场中的重力 mg ，直线运动的惯性力 ma ，等等。质量力是一个矢量，一般用单位质量所具有的质量力来表示，其形式如下

$$\mathbf{f} = f_x \mathbf{i} + f_y \mathbf{j} + f_z \mathbf{k} \quad (1-2-1)$$

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，称为切向力。

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：

① 静压强的方向垂直指向作用面；② 流场内一点处静压强的大小与方向无关。

对于理想流体流动，流体质点只受到正压力，没有切向力。

对于黏性流体流动，流体质点所受到的作用力既有正压力，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，切向力可由广义牛顿内摩擦定律求得。

二、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 $101\,325 \text{ Pa}$ ，通常用 p_{atm} 表示。若压强大

* $1 \text{ mmHg} = 133.322 \text{ Pa}$

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就称为真空度, 通常用 p_v 表示。如以压强 0 Pa 为计算的基准, 则这个压强就称为绝对压强, 通常用 p_s 表示。这三者的关系如下:

$$\begin{aligned} p_r &= p_s - p_{\text{atm}} \\ p_v &= p_{\text{atm}} - p_s \end{aligned} \quad (1-2-2)$$

在流体力学中, 压强都用符号 p 表示, 但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, 压强用绝对压强。当然, 特殊情况应有所说明。

压强 p 的定义是单位面积所承受力的大小, 单位是 N/m^2 。压强常用单位是 Pa(帕斯卡), 也可用单位 bar(巴)进行度量, 这些单位之间的关系如下:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Pa} &= 1 \text{ N/m}^2 \\ 1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

另外压强也常用液柱高 h 、标准大气压(p_{atm})表示:

$$p = \rho gh \quad (1-2-3)$$

$$1 p_{\text{atm}} = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O}^{**} = 101\,325 \text{ Pa}$$

三、液体的汽化压强

液体向气体发生转化称为液体的汽化。这种转化有两种途径:

(1) 压强不变, 增加温度。当温度超过某一临界值 t_v (沸点) 时, 就发生了汽化, 这种现象叫做沸腾。其物理原因是温度升高后分子动能加大, 克服液体表面张力的束缚从而由液体变成气体逸出液体表面。

(2) 保持温度不变, 当压强降低到某一临界值 p_v (汽化压强) 后, 液体也发生了汽化, 这种现象称为汽化。其物理原因是压强降低后减弱了分子之间的引力, 减弱了表面张力, 使液体分子可以挣脱表面张力的束缚, 由液体变成气体逸出液体表面。

水的汽化压强与沸点温度对应关系见表 1-2-1。

表 1-2-1 水的汽化压强 (绝对) 与沸点温度对应表

$t / ^\circ\text{C}$	100	80	60	40	20	10	0	$t_v / ^\circ\text{C}$
p_v / Pa	101 300	47 400	20 000	7 400	2 340	1 230	615	p / Pa

四、静压、动压和总压

对于静止状态下的流体而言, 只有静压强。对于流动状态的流体, 有静压强、动压强、测压管压强和总压强之分, 其名称的来源应当从伯努里 (Bernoulli) 方程谈起。

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

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = H \quad (1-2-4)$$

** 1 mmH₂O = 9.80 665 Pa

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的机械能； H 称为总的水头高。

若把上式等式两边同时乘以 ρg ，则有：

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \rho g H \quad (1-2-5)$$

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； $\rho g H$ 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。

例如，图 1-2-1 所示为一个皮托 (Pitot) 管插入水渠中，设点 1 的水流速度为 v ，压强为 $p = \rho g h$ ；点 2 处是滞止点，其压强为 $p_0 = \rho g(h+y)$ ；对于 1, 2 两点列出伯努利方程，有：

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \frac{p_0}{\rho g} \quad (1-2-6)$$

或

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = p_0 \quad (1-2-7)$$

则 p 称为点 1 的静压强； $p v^2/2$ 称为点 1 的动压强； p_0 称为点 1 的总压强。

关于可压缩流动见亚音速与超音速流动部分。

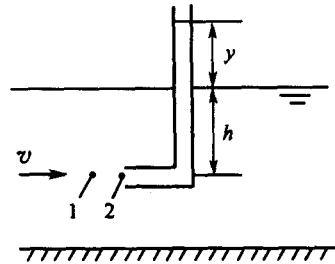


图 1-2-1 皮托管

第三节 能量损失与总流的能量方程

一、沿程损失与局部损失

沿程损失：流体流经一段长为 L ，直径为 d 的等截面圆管，由于流体具有黏性以及壁面粗糙的影响，其能量必然有所损失。其水头损失 h 可由达西公式给出：

$$h_f = \lambda \frac{L v^2}{d 2g} \quad (1-3-1)$$

式中： λ 称为沿程损失系数。对于层流流动， $\lambda = \frac{64}{Re}$ ；对于光滑管湍流，有布拉修斯(Blasius)公式：

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (1-3-2)$$

对于其他情况， λ 的值可由莫迪 (Moody) 图查得。

局部损失：流体流过弯头、三通等装置时，流体运动受到扰乱，必然产生压强损失，这种在局部范围内产生的损失统称为局部损失。局部水头损失的表达式为：

$$h_f = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (1-3-3)$$

式中： ζ 为局部损失系数。

对于突然扩大管，有包达定理：

$$h_f = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad (1-3-4)$$

式中： v_1 和 v_2 分别为突扩截面前后的平均速度。对于其他的局部损失系数，可查看其他流体力学书籍或手册。

二、总流的伯努里方程

考虑到流体在流动过程中的能量损失，沿流动方向从截面 1 到截面 2 的伯努里方程应该是：

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \sum h_f \quad (1-3-5)$$

式中： α_1 和 α_2 分别是截面 1 和截面 2 上的动能修正系数。对于湍流，一般取 1；对于层流，一般取 2。

上式又叫做总流的伯努里方程，其使用条件是在定常流动下，两个截面均应取在缓变流截面。这里所谓缓变流截面是指流体质点速度的方向不发生剧烈变化的截面。比如闸门、突扩截面就不是缓变流截面。这里要特别注意，弯头部分也不是缓变流截面，因为在这一区域，流体质点的速度方向一直在变化着。

三、入口段与充分发展段

真实流体自无穷远流入一个直径为 d 的圆形管道，自入口开始的一段长度范围内，每一个截面上的速度分布都是不一样的。在入口截面处，速度均相等，设为 v_0 ；进入管内以后，由于在壁面处速度为 0，速度开始变化；随着流入管内长度的增加，壁面的影响逐渐扩大；当流入管内长度达到一定的值 L_0 后，壁面对流动的影响已经达到稳定状态。我们把自入口开始长度为 L_0 的这一段称为入口段，而把以后的段称为充分发展段。

对于层流流动，由试验得到入口段的长度为：

$$L = 0.02875 d Re \quad (1-3-6)$$

如果管路长度 $L \gg L_0$ ，则入口段的影响可以忽略。否则，计算沿程损失的公式为：

$$h_f = \frac{A L v^2}{Re d 2g} \quad (1-3-7)$$

式中 A 的试验值可由表 1-2-2 查得。

表 1-2-2 A 的试验值

$L / (dRe)$	0.002 50	0.005 00	0.010 00	0.012 50	0.015 00	0.020 00	0.025 00	0.028 75
A	122.00	105.00	88.00	82.40	79.16	74.38	71.50	69.56