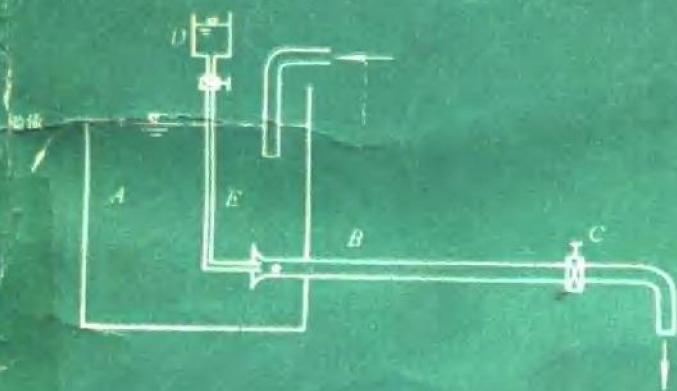


流体力学基础

——沈元题

朱一镛 主编



北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书内容以阐述流体运动中最简单、最基本的现象和概念，力学原理和规律为主；并结合典型例题和部分习题说明了流体力学在一般工程问题中的广泛应用。在本书的叙述上，力求由浅入深，详尽清楚，其目的在于希望培养学生具有严谨的分析和解决一般流体力学问题的初步能力、便于自学；并能为改进课堂教学方法及内容提供前提条件。

本书是一本学习流体力学和空气动力学的入门，可供航空航天飞行器设计及工程力学类，航海类，机械类等有关专业类的大学本科生和专科生作为技术基础课教材使用或参考。也是有志于这方面自学者的一本入门参考书。

流体力学基础

LIUTI LIXUE JICHU

朱一锬 主编

责任编辑 郭维烈

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

北京京辉印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张：15.25 字数：409千字

1990年5月第一版 1990年5月第一次印刷 印数：3000册

ISBN 7-81012-169-3/TB·028 定价：3.45元

前 言

本书是根据北京航空航天大学、西北工业大学和南京航空学院三院校共同讨论拟定的教学大纲编写的，是一本学习以流体流动基本现象、概念和规律为基础的各类工程技术科学的基础教材，是一本学习流体力学和空气动力学的导论和入门书。

从1983年起，根据大学教育改革形势的发展和需要，北航等院校先后重新开设了工程流体力学课程，作为大学工程力学专业学习流体力学和空气动力学等的先修课程；后来又相继扩展到大学飞行器设计类专业、热动力类专业、以及航海工程与机械设计制造类专业等，都先后重新开设了同样的课程，来加强基础和扩大专业的面向。北航在1983年由徐华舫先生编写了“工程流体力学”讲义，1985年由朱一镔同志编写了“流体力学原理”讲义等教材。根据多年来的教学实践经验，在1987年由上述三院校有关同志共同商定，拟定出本书的教学编写大纲，分工负责编写，并列入航空工业部七五规划教材出版计划。

由于本书是一本入门教材，介绍的内容确定为流体流动中最简单、最基本的现象与概念，物理原理与规律；故理论分析方法大部分限于一维流，但所介绍的现象不限于此。对于本书所叙述的内容，力求紧密结合基本物理定律来阐明，做到既有严密的理论分析，又有必要的工程观点；并且结合典型例题讲解和习题，为学生从单纯学习概念、原理过渡到培养求解简单工程问题的能力搭上了桥梁。全部内容的安排力求由浅入深、由具体到抽象、由特殊到一般，力求做到符合人的认识规律，以便于自学。从而为改进课堂教学内容和方法提供必要的前提条件，最终达到培养学生具有严谨的分析和解决简单流体力学问题能力的目的，并为

后修课程打下扎实的基础。

凡是学过了高等数学，大学物理和理论力学等课程的大学本科生，专科生，学习本书不会有太大的困难。

全书共分七章，第一章流体的物理属性和第七章流体机械由南京航空学院张国富同志撰写，第二章流体静力学和第四章相似和量纲分析原理由西北工业大学鲍国华同志撰写（第四章初稿是由西北工业大学的夏玉顺同志撰写的）；第三章流体力学基础由北京航空航天大学朱一锟同志撰写，第五章粘性流体的流动与低速管流由北京航空航天大学的王振羽同志撰写，第六章可压缩气体的一维流动由北京航空航天大学夏雪瀚同志撰写，在编写的过程中，大家分头编写，互相审阅后提出修改意见，各部分内容都经过了三次以上的修定；在定稿过程中又同主编经过多次商讨；最后，全书由主编统一润色定稿。北航流体力学研究所的张瑞年同志完成了全部描图工作。全体参加编写本教材的同志对所引用参考文献资料的作者们表示衷心感谢。由于编者水平有限，教学经验不足，书中一定会有这样或那样的缺点和错误，望广大读者和同学们批评指正。

本书承北京科技大学李有章教授仔细、认真的审阅，并提出了许多宝贵的修改意见，特此致谢。

承蒙我国著名空气动力学家、北京航空航天大学名誉校长沈元教授为本书题写书名特此致谢。

编 者

1989.5.

目 录

第一章 流体的物理属性.....	(1)
§1-1 流体的定义、连续性和易流性.....	(1)
一、连续性介质假设.....	(1)
二、流体的易流性.....	(2)
§1-2 流体的物理属性.....	(4)
一、计量单位制.....	(4)
二、流体的密度、重度、比容和比重.....	(4)
三、完全气体的状态参数和方程.....	(5)
四、流体的弹性、压缩性和音速.....	(6)
五、流体的粘性.....	(11)
六、液体的表面张力和毛细现象.....	(17)
七、液体的饱和蒸气压力.....	(20)
八、流体的导热性质.....	(21)
§1-3 流体的模型化.....	(22)
附表1-1 在标准大气压下某些常见液体的物理性 质	(24)
附表1-2 某些常见气体的物理性质	(25)
附表1-3 水的物理性质	(25)
习题.....	(26)
第二章 流体静力学.....	(27)
§2-1 作用在流体微团上的力分类.....	(27)
一、体积力.....	(27)

二、表面力·····	(28)
§2-2 流体的静压力及其特征·····	(29)
§2-3 流体静力学的平衡方程·····	(31)
一、平衡微分方程·····	(31)
二、流体静止的体积力限制条件·····	(33)
三、等压面·····	(34)
§2-4 液体内部的压力分布和静压力传递·····	(36)
一、重力场中静止液体内部的压力分布·····	(36)
二、静压力的传递·····	(39)
§2-5 液体压力计原理·····	(40)
一、测压管·····	(41)
二、U形管压力计·····	(41)
三、差压计·····	(43)
四、倾斜管微压计·····	(44)
§2-6 液体作用在壁面上的合力和压心·····	(46)
一、平面上液体压力的合力与压心·····	(46)
二、曲面上液体压力的合力与压心·····	(50)
§2-7 阿基米德原理·····	(55)
一、浮力原理·····	(56)
二、潜体的平衡与稳定·····	(57)
三、浮体的平衡与稳定·····	(58)
§2-8 液体的相对平衡·····	(59)
一、作等加速直线运动液体的平衡·····	(60)
二、绕垂直轴等角速旋转液体的平衡·····	(63)
§2-9 大气的静平衡和国际标准大气·····	(65)
习题·····	(69)
第三章 流体力学基础·····	(73)
§3-1 流场·····	(73)

一、描述流动的方法	(73)
二、流场的几何图象	(75)
三、流面、流管和流量	(81)
四、相对运动	(83)
§3-2 流场模型化和加速度表达式	(86)
一、一维流场、二维流场和三维流场	(86)
二、加速度表达式	(89)
§3-3 雷诺输运方程和质量方程	(97)
一、基本物理定律和控制体分析方法	(97)
二、雷诺输运方程	(99)
三、质量方程 (或称连续方程)	(102)
§3-4 理想流体沿流线的欧拉运动方程	(112)
§3-5 不可压理想流体沿流线的伯努利方程	(116)
一、定常不可压理想流体沿流线的伯努利方程	(117)
二、伯努利方程的应用	(120)
§3-6 能量方程	(136)
一、能量方程的推导	(136)
二、能量方程的各种形式及其应用	(140)
§3-7 动量方程和动量矩方程	(146)
一、惯性坐标系中的动量方程	(146)
二、动量方程的应用	(151)
三、非惯性坐标系中的动量方程	(163)
四、动量矩方程	(166)
习题	(174)

第四章 相似和量纲分析原理 (197)

§4-1 引言	(197)
§4-2 相似理论	(198)
一、相似的基本概念	(198)

二、相似准数	(203)
三、相似律的应用	(205)
§4-3 量纲分析原理	(210)
一、量纲的基本概念	(210)
二、物理方程量纲一致性原理	(211)
三、 π 定理及其应用	(211)
附表4-1 流体力学中常用物理量的SI单位和量纲...	(221)
习题	(222)

第五章 粘性流体的流动与低速管流

§5-1 层流与湍流	(225)
一、雷诺实验	(225)
二、层流与湍流的主要特征	(228)
§5-2 粘性流体的外部流动现象	(234)
一、邻近固体壁面边界的流动现象	(234)
二、边界层概念	(237)
三、分离现象	(240)
§5-3 粘性流体的内部流动现象	(242)
一、进口段的流动	(242)
二、流动横截面上的速度分布	(245)
三、管流中的分离现象	(248)
四、二次流	(249)
§5-4 低速管流的基本方程	(250)
一、管流的能量方程	(250)
二、管流的动量方程（流动阻力和能量耗散的关系）	(254)
三、沿程损失因子 f	(256)
§5-5 低速管流的沿程损失	(258)
一、圆管层流	(258)

二、湍流光滑管	(262)
三、湍流粗糙管	(270)
四、湍流光滑管和粗糙管的判据	(273)
五、圆管流动的沿程损失实验	(278)
六、非圆管中的沿程损失——水力直径或半径	(284)
七、哈振-威廉斯公式	(287)
八、求解圆管中流动沿程损失因子 f 的步骤综述	(289)
§5-6 低速管流的局部损失	(292)
一、突然扩张	(295)
二、逐渐扩张	(297)
三、突然收缩	(300)
四、逐渐收缩	(303)
五、弯头	(303)
§5-7 管路和管路系统的流动阻力计算	(305)
一、简单管路	(306)
二、串联和并联管路	(311)
三、管网系统	(321)
习题	(325)

第六章 可压缩气体的一维流动(333)

§6-1 可压缩流体力学基础	(333)
一、热力学基础知识回顾	(333)
二、小扰动波的传播、音速和马赫数	(337)
三、微弱扰动区的划分	(339)
§6-2 可压缩气体的一维定常流动	(342)
一、一维定常流的基本方程 (微分形式)	(342)
二、一维定常等熵流的基本方程 (积分形式)	(344)
三、一维定常流能量方程的各种形式	(345)
四、驻点参数	(346)

五、临界状态参数, 最大速度和速度系数	(348)
六、熵和总压的关系	(351)
七、气流按不可压缩处理的限度	(351)
§6-3 一维定常等熵变截面管流	(357)
一、流速与截面积的变化关系	(357)
二、流量公式和截面比关系式	(360)
三、气流对内管壁的作用力	(364)
§6-4 正激波	(367)
一、正激波的形成	(368)
二、正激波的基本方程	(369)
三、普兰特激波关系式	(370)
四、正激波前后流动参数的关系式	(371)
五、弱激波	(374)
六、兰金-雨贡纽方程	(375)
七、正激波在静止气体中的传播	(376)
§6-5 几何喷管中的流动	(380)
一、收缩形喷管中的流动	(380)
二、拉瓦尔喷管中的流动	(384)
§6-6 摩擦、热交换和质量交换等因素对等截面管中 气体流动的影响	(392)
一、等截面绝热摩擦管中的流动	(392)
二、等截面加热管中的流动	(397)
三、等截面变质量管中的流动	(398)
附表 一维等熵流气体动力学函数表 ($k=1.4$) 节录	(400)
习题	(401)
第七章 流体机械	(403)
§7-1 流体机械的简单分类	(403)

§7-2 离心式泵	(405)
一、概述	(405)
二、离心式泵叶轮的基本方程	(406)
三、离心式泵的特性曲线	(415)
四、离心式泵的相似理论	(425)
五、泵和管路系统的匹配	(432)
§7-3 往复式活塞泵	(441)
一、往复式活塞泵的工作原理	(442)
二、活塞泵的扬程流量特性	(443)
三、活塞泵的扬程、功率和效率	(447)
四、活塞泵的吸上扬程限制和压缩空气室	(452)
§7-4 旋转泵	(458)
一、齿轮泵	(458)
二、叶片泵 (旋板泵).....	(460)
§7-5 液压传动简单工作原理.....	(462)
一、概述	(462)
二、液压作动筒 (马达).....	(463)
三、举例	(465)
习题	(467)
附录 国际单位、工程单位、英制单位及其换算	(471)
参考文献	(473)

第一章 流体的物理属性

流体一般可以分为液体和气体。本章先着重从力学角度区分流体与固体的异同，对流体下定义；然后介绍流体的重要物理属性与参数，以及在流体力学分析与计算中采用的流体模型等。

§ 1-1 流体的定义、连续性和易流性

一、连续性介质假设

从微观结构上看，固体和流体的内部都是由大量离散的、不断运动的分子所组成。不同之处就在分子间的距离及分子运动平均自由行程上，固体最小，液体较大，而气体最大。这就导致固体分子间的内聚力最大，液体次之，而气体最小。从而在宏观表象上显示出差异：一定量的固体具有一定的体积并保持一定的几何外形；一定量的液体具有一定的体积，但几何外形却随盛液容器形状的变化而改变；一定量的气体，其体积和外形则完全由密封容器的大小和形状所决定。但就固体或流体分子间的距离来讲，一般都比分子本身的尺寸大得多，这意味着不仅流体，而且在固体内部都是有间隙的；“空”的地方多，“实”的地方少，即内部不连续。但是，就间隙的绝对尺寸来讲，一般却又都是十分微小的；从宏观角度来研究固体和流体的力学问题时，如在固体或流体中任意取出一个微团（微体积元）来分析，该微团内必然包含很多的分子，这许许多多分子运动的统计特性就体现为微团的特性（如微团的应力，密度，温度和宏观运动速度等等）；把最小单位由分子扩大到微团，就可以把固体和流体看成是由连续分布

的微团所组成的，内部是没有任何空隙的，连绵一片的介质。这就是连续性介质假说。

在各类流体力学问题中，只要与流体相互作用的物体尺寸足够大（物体的几何尺寸大小一般用有代表性的特征尺寸来表示，例如飞机的机翼则可用它的弦长，水泵则可用它的直径等），比流体分子平均自由行程大得很多的情况下，物体的受力可根据连续流体介质与物体的相互作用来计算。当然，如果物体的几何特征尺寸并不比流体分子平均自由行程大很多，例如在高空稀薄空气中飞行的航天飞行器情况。航天飞行器的受力等则应根据空气分子流与飞行器的相互作用来计算，不能引用流体微团概念和连续性介质假说。

一般引用称做努生数的量来划分流体能否按连续介质处理的标志；努生数的定义为

$$K_n = \frac{\lambda}{l} \quad (1-1a)$$

式中， λ 为流体分子平均自由行程， l 为物体的几何特性尺寸；故努生数是一个无量纲量。显然，只有

$$K_n \ll 1.0 \quad (1-1b)$$

才能把绕物体流动的流体按连续介质来处理。

一旦可以采用连续性介质假设，就可以把流体的一切物理性质和运动状态，例如流体的密度，压力，温度以及宏观运动速度等参数，表成为流体所占据空间点位置和时间的连续、可微的函数（只有在特殊的曲面上，才允许有不连续性，详情见第六章正激波情况），这就便于利用数学工具来分析解决流体力学问题。

二、流体的易流性

从力学角度看，流体和固体一样，能够承受压应力和产生压缩变形；但流体几乎不能承受拉应力；而最能说明流体和固体本质区别的、是两者承受剪应力和产生剪切变形能力上的不同。在

图 1-1(a), (b)上, 分别表出了在同样大小剪应力作用下, 固体和流体产生的剪切变形情况。如图 1-1(a)所示, 固体上下固连着二块平板, 通过上平板对固体加上剪力 F ; 由材料力学知, 固体将产生一定的剪切角变形量, 只要不超过该固体材料的弹性极限, 该剪切角变形量的大小将与剪切应力 $\tau = F/A$ 成比例。 A 是固体与上平板相连接部分的面积。

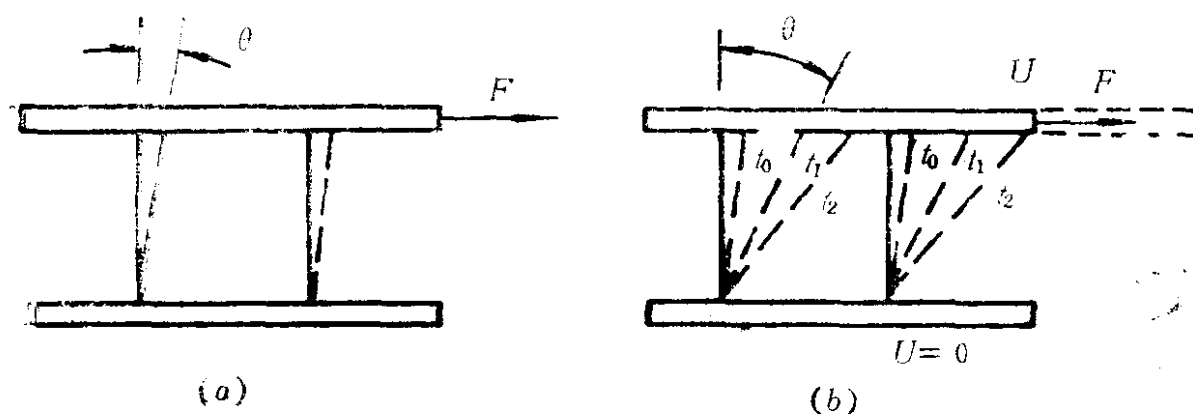


图 1-1

对流体做同样的实验。在时间 $t = t_0$ 瞬间, 先用色液标画出受剪切应力的一块流体体元的边界线, 见图 1-1(b)。然后加力 F 于上平板, 只要力 F 不取掉, 流体体元将一直变形下去。图上用虚线标出了相应瞬间 ($t_2 > t_1 > t_0$), 流体体元边界线的变形情况。图上还表明了与固壁相接触的流体, 其运动速度始终与固壁运动速度相同的情况, 这称为无滑移条件。如下平板静止不动, 与其相接触的流体运动速度也为零。由图 1-1(b) 可见, 流体体元的剪切角变形量 θ 的大小, 不仅取决于所加剪切应力 τ 的大小, 而且还与剪切应力 τ 的作用时间长短有关。因此, 不论所加剪切应力 τ 多么小, 只要不等于零, 流体都将在该剪切应力作用下连续不断地产生变形运动 (流动), 这种性质称为流体的易流性。

因此, 从力学角度对流体的定义是连续的且具有易流性质的介质。

§ 1-2 流体的物理属性

一、计量单位制

在介绍流体的各种物理属性之前，简单回顾一下各种物理量的单位制。本书采用国际单位制（SI）。在力学的范围内，国际单位制有四个基本量纲（或称因次）。这四个基本量纲和相应的基本单位是：长度（其量纲用符号 L 表示）、质量（量纲符号为 M ），时间（量纲符号为 T ）和热力学温度（量纲符号为 t ）；相应的计量基本单位为米、公斤（或千克），秒和开。其他有关物理量的量纲和导出单位，可以依据该物理量的定义或它应遵循的物理定律，通过上述四个基本量纲和基本单位表达出来。详情可参看第四章有关内容。

二、流体的密度、重度、比容和比重

流体的密度 是指单位体积中所包含的流体质量，用符号 ρ 表示。对于均质流体，如流体的体积为 τ ，该体积包含的流体质量为 m ，则

$$\rho = \frac{m}{\tau} \quad (1-2a)$$

显然密度的量纲为 ML^{-3} ，单位是公斤/米³。对于非均质流体，空间各点处的密度是不相同的。上式只相当于该体积内流体的平均密度。要计算该体积内某点处流体的密度时，可围绕该点取体积为 $\delta\tau$ 的微团，设该微团所包含的流体质量为 δm ，则该流体微团的平均密度则为

$$\overline{\rho} = \frac{\delta m}{\delta \tau} \quad (1-2b)$$

该点处的流体密度则为

$$\rho = \lim_{\delta \tau \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta \tau} = \frac{dm}{d\tau} \quad (1-3)$$

某些常见液体的 ρ 值，可见本章附表 1-1

流体的重度 是指单位体积中所包含的流体重量，用符号 γ 表示。对于均质流体有

$$\gamma = \frac{W}{\tau} \quad (1-4)$$

式中， W 是体积 τ 中所包含流体的重量，量纲是 MLT^{-2} ，单位是牛。重度 γ 的量纲为 $ML^{-2}T^{-2}$ ，单位是牛/米³。

对于非均质流体，同样有某点处流体重度概念。设 g 为当地重力加速度，则某点处流体重度 γ 和密度 ρ 之间有下列关系存在：

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

流体的比容 是指单位质量流体所占有的体积，它是流体密度的倒数。用符号 v 表示。即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-6)$$

它的量纲是 $M^{-1}L^3$ ，单位是米³/公斤。

流体的比重 ($s.g.$) 是流体的密度与在指定温度和压强下水的密度之比。显然，比重是无量纲的量。某些常见液体的比重 $s.g.$ ，见本章附表 1-1。知道流体的 $s.g.$ 后，则可按下式计算流体的密度和重度，即

$$\rho = (s.g.) \times \rho_w \quad (1-7)$$

$$\gamma = (s.g.) \times \gamma_w \quad (1-8)$$

式中， ρ_w ， γ_w 是指定温度和压力下水的密度和重度。

三、完全气体的状态参数和方程

热力学中讨论的理想气体，在流体力学中习惯上改称为完全气体。在常温、常压下，大多数常见的气体都可以按完全气体来对待。按照气体分子运动论，完全气体状态参数密度、压力和温

度之间存在下列关系：

$$\frac{p}{\rho} = \frac{\bar{R}}{m} T \quad (1-9)$$

式中， p 为气体的绝对压力，其量纲为 $ML^{-1}T^{-2}$ ，单位为牛/米²或帕； T 为气体的绝对温度，单位为开； $\bar{R}$ 为通用气体常数，其量纲为 $L^2T^{-2}t^{-1}$ ，单位为焦耳/（公斤·开）； m 为气体的分子量，这是一个无量纲的量。某些常见气体的 $\bar{R}$ 值，可见附表 1-2。式

(1-9) 称为克拉贝隆方程。如果取 $R = \bar{R}/m$ ， R 称为气体常数。则式(1-9) 变为

$$p = \rho RT \quad (1-10)$$

某些常见气体的 R 值，可参看附表 1-2。式(1-10)称为完全气体的状态方程。

气体状态参数发生了一系列的变化时，热力学称为过程。对于完全气体的热力学过程，可用下式表出：

$$pv^n = \text{Const.}, \quad p^{\frac{1}{n}}v = \text{Const.} \quad (1-11)$$

式中， n 称为多变过程的指数。

有如下一些典型的变化过程：

等容过程	$v = \text{Const.}, n = \infty$
等压过程	$p = \text{Const.}, n = 0$
等温过程	$T = \text{Const.}, n = 1$
绝热可逆过程	$s = \text{Const.}, n = k$
多变过程	$n = -\infty \sim +\infty$

s 代表单位质量气体的熵，它的量纲为 $L^2T^{-2}t^{-1}$ ，单位为焦耳/（公斤·开） $k = c_p/c_v$ 是气体的比热比，是一个无量纲的常数；其中 c_p 是气体的等压比热， c_v 是气体的等容比热，它们的量纲和单位都与熵 s 的相同。某些常见气体的 k, c_p 等大小，可参看附表 1-2。

四、流体的弹性、压缩性和音速

流体的弹性或压缩性是指流体在承受一定量的压力时，体积