

流体力学

复旦大学数学系 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书系复旦大学数学系力学专业革新教材之一，内容包括理想不可压缩流体动力学、气体动力学、粘性流体动力学，也介绍了高超音速流、电磁流体动力学和化学流体动力学。本书可作综合大学力学专业流体力学课程的教材，讲授140学时，亦可作高等院校有关专业的参考书。

流 体 力 学

(试 用 本)

复旦大学数学系 编著

*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出093号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店经售

上海洪兴印刷厂印刷

*

开本850×1168 1/32 印张21 字数500,000

1960年10月第1版 1961年4月第2次印刷

印数6,001—8,500

统一书号：13119 · 400

定 价：(十)2.35 元

編輯說明

我們受到全國持續躍進的大好形勢的鼓舞和推動，積極響應了黨的號召，在兩年來教育大革命已經取得偉大成績的基礎上，掀起了一个聲勢浩大的教學改革的群眾運動。通過這個運動，我們揭露了現在教學體系、教學內容和教學方法上陳舊落後的狀況，抓住訂方案、編大綱、寫教材、搞試驗等重要環節，試圖建立一套以馬克思列寧主義、毛澤東思想為指導的，反映現代科學發展水平的，理論聯繫實際的新的教學體系和內容，以及與之相適應的教學方法，使培養人才的工作更好地貫徹黨的社會主義建設總路綫的精神。

作為這種探索和嘗試，我們對 1958 年新建的力學專業，採取師生結合的方法，編出了一套可供綜合大學力學專業試用的力學基礎課程教材，包括：流體力學、固體力學、一般力學、振動理論。其中一般力學是和數學專業合用的，故列入數學專業革新教材。

我們力圖使這套教材能具有以下幾個特點：

一、在選材上力圖體現為社會主義建設服務和反映現代科學發展水平的要求，因此增加了與當前生產實際有密切關係的內容，並介紹了現代科學的一些新發展，而對原有的內容在不影響基本理論的前提下作了精簡和壓縮。

二、在處理上，為了加強統一性，我們把原來計劃中的六門課程合併為三門，這樣就可以使原來關係密切的課程，如材料力學與彈、塑性力學，流體力學與氣體動力學，理論力學與振動理論相輔相成地組成一個整體，同時也便於安排一些新內容。在編寫過程

中我們還注意到力學課程與數學課程的統一安排。

三、在闡述上我們努力貫徹實踐——理論——實踐的原則。

徹底實現教學改革，建立起一套符合多快好省方針的教材是一個艱巨的任務，需要一個較長的時間來摸索。這一次編寫的教材只是一個開始。由於編寫教材的同志原來都是學數學的，既受到思想水平和科學水平的限制，又缺乏較充分的實踐經驗，因此不論在處理方法上或者是內容的科學性上，特別是在理論聯繫實際方面，都會有不少缺點與錯誤，懇切地希望同志們批評和指正。

同濟大學、交通大學、上海力學研究所和本校物理系，在這次編寫教材中給予我們很大幫助，上海科學技術出版社與中華書局上海印刷廠對這套教材的迅速出版，給了極大的支持，我們在這裡表示衷心的感謝。

復旦大學數學系

1960年5月

序

我国工农业的大跃进和现代科学技术的飞速发展，都对流体力学提出了更高的要求，因此综合大学力学专业的流体力学课程必须进行根本性的改革，大量增添现代化和生产实际迫切需要的内容，原有教材除了删去部分陈旧的内容外，对必须保留的部分也力求以更高的观点重新处理，使得这门课程能做到既减少学时，又增加新的内容，并且使学生更易于接受和掌握。

最近我们在党的领导下大搞教学改革，通过反复讨论，认为过去的教学内容主要存在如下的一些问题：

1. 理论联系实际的原则贯彻得很不够，过分注意数学推导和理论的系统性、完整性，而对力学概念与实际应用的联系阐述得不够，往往只对理想模型进行讨论，而对实际问题缺乏具体分析。同时，一些与当前生产建设密切有关的内容如河渠不定常流、管道流动与射流等很少介绍。

2. 现代化的内容反映得太少。由于现代高速飞行的发展而出现了不少新的发展方向，例如高超音速流、电磁流体力学、化学流体力学等，这些方面同时也与热核控制、化工、冶金等尖端技术有关，但是在教材中却很少反映，相反地对古典的理想不可压缩流体却讲述过多。

3. 原教材中某些部分的讲述需要提高观点，加以重新处理。

针对以上问题，我们在这次教材革新中力求更多地反映现代的各种成就，增加与生产实际密切有关的内容，贯彻理论联系实际的原则，因此在新教材中我们作了如下的安排：在不影响介绍基本

理論的前提下,对不可压缩流体的平面問題作了較多的精簡,如刪去了机翼理論的某些部分和不定常流,增添了高超音速流、电磁流体力学、化学流体力学、高速附面层等現代化内容和河渠不定常流、气体在管道中的流动、射流等实际应用很广的部分。在更新处理原教材内容时,企图对物理性质多作微观解釋,并增加量綱理論,以加强对現象本质的闡述。

我們专业成立还不到二年,同时我們也是在专业成立时才开始学习力学的,知識非常缺乏,教学經驗也很不够。因此,由于思想水平和业务水平的限制,这本教材中不妥当甚至錯誤的地方一定不少,殷切地希望各方面批評指正。

复旦大学数学系流体力学編写小組

1960年5月

目 录

序

緒論	1
第一章 流体运动学	8
§ 1 分析流体运动的两种方法, 連續性方程	8
§ 2 柯西-海姆霍茨 (Cauchy-Helmholtz) 公式	17
§ 3 有旋运动和无旋运动, 速度势	23
第二章 流体动力学的基本方程	29
§ 1 质量力、表面力和应力張量	29
§ 2 运动方程, 广义牛頓定律	34
§ 3 能量方程	43
§ 4 貝努利积分和柯西积分	47
§ 5 理想流体动力学問題的一般提法	53
§ 6 动量定律与动量矩定律的直接应用	56
第三章 理想流体的旋渦运动	61
§ 1 旋渦运动的几个基本定理	61
§ 2 由无限空間的渦量場和速度散量場确定速度場、 一条渦綫的情况	68
第四章 理想不可压縮流体动力学的平面无旋运动	73
§ 1 引言	73
§ 2 简单流动的复势	77
§ 3 圓柱繞流	83
§ 4 任意周綫的繞流, 茹柯夫斯基-查浦雷金假定	91

§ 5	查浦雷金公式和茹柯夫斯基定理	105
§ 6	翼栅理論	112
§ 7	脫体繞流	127
第五章	理想不可壓縮流体动力学的空間問題	139
§ 1	引言	139
§ 2	奇点法	143
§ 3	軸对称流的一种解法	147
§ 4	有限翼展机翼理論	153
第六章	波动理論	168
§ 1	波动理論的基本方程式	168
§ 2	平面駐波和进行波	172
§ 3	波群和群速度	181
§ 4	波的能量和波阻	185
§ 5	河渠不定常流	197
第七章	不可壓縮粘性流体动力学的基本方程和相似律	207
§ 1	引言	207
§ 2	量綱理論	210
§ 3	相似和模拟	219
§ 4	不可壓縮粘性流体在圓管中的直綫运动	231
§ 5	圓柱軸承的流体动力学理論	236
第八章	不可壓縮流体的附面层理論	246
§ 1	附面层的概念, 平面定常层流附面层方程	246
§ 2	外部势流为 $U=Cx^m$ 的层流附面层	254
§ 3	动量方程, 近似計算层流附面层的波尔豪森法	263
§ 4	洛强斯基的层流附面层近似計算方法	267
第九章	湍流运动	274
§ 1	层流到湍流的过渡	274

§ 2 湍流时均运动, 雷诺方程	282
§ 3 普朗特混合长度理论, 湍流射流	288
§ 4 平面管和圆管的湍流, 对数速度公式	295
§ 5 光滑管的阻力公式, 层流底层	299
§ 6 管壁粗糙度对管阻力的影响	306
§ 7 型阻概念	311
第十章 气体动力学的基本方程与一元流动	317
§ 1 基本方程组, 音速	317
§ 2 等熵气流中的能量方程, 一元定常气流	323
§ 3 黎曼波, 强间断的形成	330
§ 4 间断面上的条件	338
第十一章 平面超音速流	348
§ 1 斜激波理论	348
§ 2 平面超音速流的基本方程和特征线	355
§ 3 平面无旋超音速流动的特征线法	361
§ 4 有旋超音速流中的特征线法, 机翼理论	376
第十二章 亚音速流	383
§ 1 小扰动理论	383
§ 2 速度图法	390
第十三章 跨音速流	405
§ 1 引言	405
§ 2 相似律	410
§ 3 具有脱体激波的任意对称体的绕流问题(多罗得尼欽方法)	412
第十四章 空间超音速流	425
§ 1 轴对称细长物体的超音速绕流	425
§ 2 有限翼展机翼理论	437
§ 3 锥型流	446

第十五章 一元不定常流的某些問題	456
§ 1 引言	456
§ 2 自模运动	456
§ 3 关于間断面的討論	462
§ 4 自模运动的代数积分	465
§ 5 z, V 平面上积分曲綫場的研究	471
§ 6 强爆炸問題	476
§ 7 活塞运动問題	481
第十六章 高超音速流	489
§ 1 引言	489
§ 2 极限状态	492
§ 3 相似律	497
§ 4 平面截面律	506
§ 5 高超音速流的近似計算法	512
第十七章 高速附面层	527
§ 1 引言	527
§ 2 粘性气体层流附面层, 多罗得尼欽变换	532
§ 3 非等溫的不可压缩层流附面层	543
§ 4 平板的高速层流附面层	552
§ 5 激波与附面层的相互干扰	563
第十八章 气体在管道中的运动	569
§ 1 运动方程	569
§ 2 气体在管道中的定常运动	585
§ 3 絕热管道中的定常运动	589
§ 4 等截面管道中气体的加热流动	593
§ 5 气体从容器经过小孔的絕热出流和局部阻力系数	603
§ 6 气体充满容器的時間問題	606

§ 7 气体从变容积容器中流空問題.....	611
§ 8 容器中同时进气与排气的問題.....	616
第十九章 电磁流体力学.....	623
§ 1 引言.....	623
§ 2 导电流体在磁場中的运动方程.....	624
§ 3 小扰动波的傳播.....	628
§ 4 磁气体动力学的間断理論.....	632
§ 5 磁气体动力学的一元不定常运动.....	639
第二十章 化学流体力学.....	642
§ 1 引言.....	642
§ 2 基本方程.....	645
§ 3 燃燒概念.....	651
§ 4 火焰傳播速度.....	654

緒 論

一、流体力学的对象和目的

流体力学是一門研究液体与气体宏观运动与平衡的学科，它是为工程技术、农田水利及宇宙航行等服务的。它所接触的問題非常广泛，从經典的机翼繞流問題到近代的高速飞行器表面发热問題，从火箭发动机中的燃燒問題到化工、冶金工程中的种种复杂流动問題，从水輪机中的叶栅理論到近代各种气动力机械的設計，从管道流动到船舶阻力，从海洋波浪到大气流动規律，从电磁流体力学到稀薄气体的研究等等。流体力学是和生产实践紧密联系着的，随着生产和工程技术的不断发展，流体力学的内容将更为充实。

在总路綫的光輝照耀下，我国工农业生产出现了空前的大跃进，自 1958 年以来，广大人民在社会主义建設的实践中，对流体力学提出了許多新的研究課題，說明了流体力学在目前是迫切需要发展的；同时也告訴我們，流体力学的接触面是非常广泛的，流动的类型也是复杂多样的，因此要求流体力学工作者必須更好地从生产实际出发，按照实践——理論——实践的原則来开展流体力学的研究工作。

为了要在各种复杂的現象中取得研究成果，必須要善于从实际出发，依靠广大群众的創造，在大量的实践与实验的基础上选出組成現象的主要部分及影响現象变化的主要因素，建立起理論模型，得出研究結論后再与实际进行比較与驗證，如此反复进行，方能正确掌握流动規律，从而促进生产发展。下面我們先来闡述流

体的一些基本性质，从而建立起符合实际的模型，以利于在本篇中介绍基本理论。

二、流体的基本性质和假定

1. 連續性 我们把流体看作是由无数流体微团連續地组成的。所谓流体微团或流体质点是指这样的小块流体：它的大小与放置在流体中的实物(如机翼)的大小相比较是微不足道的，但比起分子自由程长度却要大得多，它包含足够多的分子，能施行统计平均的方法求出宏观的特征量(如压力、密度、宏观速度、温度等等)，从而使我们可以考察这些宏观量的变化情况。因此連續性假设首先意味着流体介质是由这种带有宏观特征量的流体质点連續地组成的；其次还意味着质点运动过程的連續性。

在这个連續性假设的基础上，为了利用偏微分方程等数学工具，我们还认为速度、密度与压力等特征量是质点与时间的連續函数，只有在个别曲面上，才容许有不連續性。

由上述連續性的基本假设和特征量分布的連續性的补充假设所得出的结果，与实验结果符合得很好，那么，这就表明了这些假设是合理的，正确的，因此，連續性假设也就成为流体力学的一个基本假设。

当然，連續性假设不能在任意情况下都适用，例如，随着海拔高度的增加，空气逐渐稀薄，到一定高度后，空气将不能再当作連續介质了。

气体随海拔高度的增加而逐渐稀薄的程度见表1。

从表1我们看到，在海平面上努森数 $K_n < 10^{-6}$ ，在50公里高空才达到千分之一，可想而知，在五六十公里高空的大气内(此时大约 $K_n \sim 10^{-3}$)，仍然可以把空气看作是連續介质。在更高的地方，大气就不能再看作是連續介质，而是非連續的稀薄气体。对于稀薄气体的稀薄程度应该注意这样一点：它是与物体的大小及运

表 1

拔海高度(千米)	分子自由程 l (大約)	努森 (Knudsen) 数 l/L^*
0	$<10^{-5}$ 厘米	$<10^{-6}$
50	$\sim 10^{-2}$ 厘米	$\sim 10^{-3}$
100	~ 1 分米	~ 1
150	100 米	$\sim 10^3$
200	100 千米	$\sim 10^6$

* L 为物体的特征长度,在此取为 10 厘米。

动速度都有关系的,因为从动力学的观点来说,考虑到物体与气体之间的相互关系,在同一密度的气体中,物体愈大,运动速度愈快,就与气体分子接触机会愈多,因而就显得稠密了;反之,接触机会少,就显得稀薄。在我们这一门流体力学的课程中不研究稀薄气体的问题。

2. 压缩性 实际上,流体都是可以压缩的,也就是说,流体的密度是随着压力与温度的改变而发生变化。例如水在温度不变的情况下,每增加一个大气压,它的体积比原来减少 0.005% 左右。而对空气来说,在压力不变的时候,温度增高到 100°C , 密度大约能减少 27%。由此可见,流体是存在着压缩性的;只不过像水那样的流体,压缩性很小,可以当作不可压缩流体看待,而空气就有明显的压缩性。

水的不可压缩性也只有相对意义,在某些情况下,如水底爆炸,水的密度的变化还是不可忽略的。反过来,空气运动也可能是不可压缩的,如当流速比音速小得多的时候,空气密度的变化就可忽略不计,此时就把空气当作不可压缩流体看待。因此是否要考虑流体的压缩性须视问题的具体情况而定。

根据压缩性,可把流体力学划分成两大类:一类是不可压缩流体力学,另一类是可压缩流体力学。

3. 粘性 当我们观察河道、渠道中的水流时，可以明显看到越靠近河岸，流速越小。这表明河岸对邻近它的流体有约束作用，流体内部也有相互约束的作用力，这种性质就叫作流体的粘性。

我们还可以根据下面的实验在宏观上说明流体的粘性。

假设两不动的平行平板间充满了静止的流体(图0-1)，当我们使下面的平板保持不动，而将上面的平板以等速 $\bar{U}$ 平行移动，我们会看到板间的流体很快就处于流动状态，且靠近

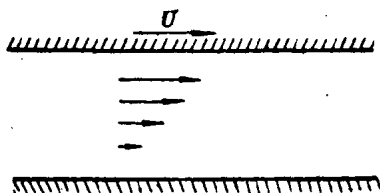


图 0-1

运动平板的流体质点比远离运动平板的流体质点有较大的速度。

这样一个事实告诉我们：一方面，运动的平板带动了紧靠着它的流体质点，也就是说，平板与流体之间存在着切向作用力，我们称它为流体的外摩擦。另一方面，靠近运动平板的流体层将运动传给了紧靠它的离运动平板较远的流体层，这说明流体之间在其接触面上存在着切向作用力，这就是流体的内摩擦。一般所指流体的摩擦即内摩擦。

牛顿(Newton)对这类现象进行了归纳，得到通常所谓的牛顿定律：两流体层之间单位面积上的摩擦力 τ 与垂直于流动方向的速度梯度成正比

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial n}.$$

式中的 μ 与运动性质无关，取决于流体的物理性质与温度，通常称为粘性系数。 μ 除以流体的密度称为运动的粘性系数

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}.$$

粘性系数 μ 的量纲是

$$\frac{\text{力} \cdot \text{长度}}{\text{长度}^2 \cdot \text{速度}} = \frac{\text{力}}{\text{长度} \cdot \text{速度}}。$$

在物理制单位中, μ 的量綱 $[\mu] = \left[\frac{\text{克}}{\text{厘米} \cdot \text{秒}} \right]$; 在工程单位制中 $[\mu] = \left[\frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2} \right]$ 。

运动粘性系数的量綱在物理制单位中为 $[\nu] = \left[\frac{\text{厘米}^2}{\text{秒}} \right]$, 工程单位制中 $[\nu] = \left[\frac{\text{米}^2}{\text{秒}} \right]$ 。

粘性系数随温度变化的性质可从表 2 与表 3 中看出。对于液体来讲, 当温度增高时, 粘性系数要减小, 但对于空气, 则随温度的升高而增大。对于液体的粘性系数与空气的粘性系数的这个差别, 我們可以从粘性的微观过程来了解。原来流体的粘性一方面由分子間的吸引力所引起, 另方面也是分子因不规则的热运动而交换动量的結果。当温度升高时动量增大, 由动量交换所决定的粘性增大, 而分子間的吸引力减小, 因而由它所决定的粘性减小。对于液体的粘性来讲, 吸引力的因素是主要的, 对于空气则动量交换的因素是主要的, 因此液体的粘性系数与空气的粘性系数就具有了上述的差别。

表 2 水的粘性系数与温度的关系

温度 (°C)	$\mu \times 10^2 \frac{\text{克}}{\text{厘米} \cdot \text{秒}}$	$\nu \times 10^2 \frac{\text{厘米}^2}{\text{秒}}$	温度 (°C)	$\mu \times 10^2 \frac{\text{克}}{\text{厘米} \cdot \text{秒}}$	$\nu \times 10^2 \frac{\text{厘米}^2}{\text{秒}}$
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.141	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

表 3 空气的粘性系数和温度的关系

溫度 (°C)	$\mu \times 10^4$ $\frac{\text{克}}{\text{厘米} \cdot \text{秒}}$	ν $\frac{\text{厘米}^2}{\text{秒}}$	溫度 (°C)	$\mu \times 10^4$ $\frac{\text{克}}{\text{厘米} \cdot \text{秒}}$	ν $\frac{\text{厘米}^2}{\text{秒}}$
0	1.709	0.132	160	2.425	0.298
20	1.808	0.150	180	2.505	0.322
40	1.901	0.169	200	2.582	0.346
60	1.997	0.188	220	2.658	0.371
80	2.088	0.209	240	2.733	0.397
100	2.175	0.230	260	2.806	0.424
120	2.260	0.252	280	2.877	0.451
140	2.344	0.274	300	2.946	0.481

一般我們都将粘性系数 μ 看作温度的函数。粘性系数与温度的关系式, 又称为物理方程。我們将在以后用到时具体给出。

根据处理問題时的不同要求和粘性的大小, 我們有时可略去粘性不計, 而把流体看成是无粘性的即理想流体, 这样在流体力学中引入了理想流体和粘性流体的分类。

4. 导热性 流体的导热性同样是分子热运动的结果, 因此与粘性有着相互联系。富里埃(Fourier)的热傳导經驗公式为

$$dQ = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} d\sigma,$$

其中 dQ 是单位時間通过面积 $d\sigma$ 的热量, n 是 $d\sigma$ 的法綫方向, λ 为热傳导系数。

通过曲面 S 的热量, 由富里埃公式积分得到

$$Q = \iint_S \lambda \frac{\partial T}{\partial n} d\sigma.$$

在一般的流体力学中, 就是以連續性作为基本假設的, 在此基础上, 再考虑流体的压缩性, 粘性和导热性, 并由此来研究流体的运动及其与固体之間的作用力。

流体还具有許多其他复杂的性质, 如輻射、多相介质的扩散、