

高等学校教材

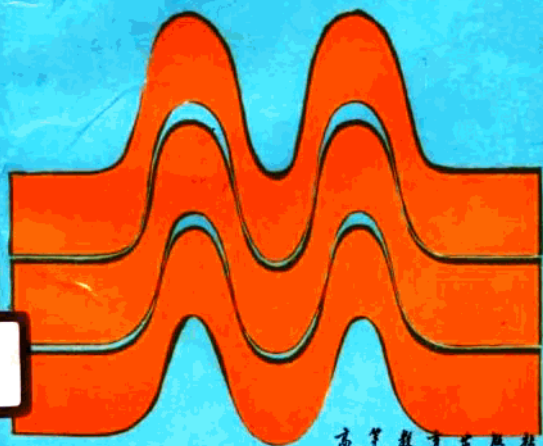
工程流体力学

(水力学)

上册

闻德荪 魏亚东 李兆年 王世和 编

闻德荪 主编



高等教育出版社

内 容 提 要

本书是根据高等学校环境类专业、给水排水工程专业(80~100学时)的工程流体力学(水力学)课程教学基本要求编写的,可作为上述专业的教材,也可作为其他相近专业的参考书。全书分上、下两册,共十四章。上册共八章:绪论,流体静力学,流体运动学,理想流体动力学和平面势流,实际流体动力学基础,量纲分析和相似原理,流动阻力和能量损失,边界层基本理论和绕流运动;下册共六章:有压管流,明渠流,孔口、管嘴、闸孔出流及堰流,紊流射流和扩散,渗流,可压缩流体的流动。

本书注重加强理论基础,并注意适当结合专业,联系实际。各章均有一定数量的例题和习题,管网计算附有FORTRAN语言程序和计算结果。

高等学校教材
工程流体力学
(水力学)

上 册

闻德荪 魏亚东 编
李兆年 王世和

闻德荪 主编

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
四川省金堂新华印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 11.625 字数 277,000

1990年9月第1版 1990年9月第1次印刷

印数 0001—1,700

ISBN 7-04-003170-1/TB-176

定价 3.00 元

前 言

本书是为高等学校环境类专业、给水排水工程专业编写的工程流体力学(水力学)教材。它是在三校编写的讲义基础上,经过教学实践和吸收国内外有关教材的优点修改而成的。本书试图根据内容,建立一个既符合学科系统性又符合教学和认识规律的体系,来阐述工程流体力学的基本概念、基本原理和基本方法。本书内容,注意适应科学技术发展的需要,注重加强理论基础和能力的培养,力求贯彻理论联系实际、知识与能力辩证统一的原则。

根据工程流体力学的发展趋势,三维流动的基本原理及其分析方法,是基本的、重要的,且将长期起作用的。因此本书在介绍流体运动基本方程时,以三维流动的基本原理及其在特殊情况下的应用为线索,结合介绍一维流动的基本原理及其分析方法。

全书尽可能贯穿介绍工程流体力学处理问题的基本方法和常用方法,如理论分析方法中的无限微量法、有限控制体法和实验方法中的量纲分析与相似原理以及雷诺时均运算法则、量级对比、相似变换法等及它们的应用。

本书在介绍基本概念时,力求严格、确切、形象、清晰;在介绍基本原理时,既着重物理观点的阐述,又对必要的数学处理给予扼要的推导过程,并指出适用的范围和条件;在介绍基本理论的应用时,提出关键、要点和带规律性的应用方法、步骤,例如总流伯努利方程的应用,关键在于对流动现象的分析、取好过流断面和计算点、基准面以及能量损失的计算等。

为了巩固和加深对基本理论的理解、提高计算技能以及培养

分析问题、解决问题的能力,各章均有一定数量的例题和习题,管网计算附有 FORTRAN 语言程序和计算结果。

本书内容可分为基本理论、应用与专题两部分,共十四章。上册共八章:绪论,流体静力学,流体运动学,理想流体动力学和平面势流,实际流体动力学基础,量纲分析和相似原理,流动阻力和能量损失,边界层基本理论和绕流运动;下册共六章:有压管流,明渠流,孔口、管嘴、闸孔出流及堰流,紊流射流和紊流扩散,渗流,可压缩流体的流动。

本书采取集体讨论,分工执笔,主编统稿审订的编写方式。参加编写的有:东南大学闻德荪(第一、三、四、五、十二章)、重庆建筑工程学院魏亚东(第二、七、八章)、北京建筑工程学院李兆年(第六、九、十三章)、东南大学王世和(第十、十一、十四章),主编是闻德荪。本书由哈尔滨建筑工程学院屠大燕教授和清华大学余常昭教授审阅。在编写过程中,得到校内外有关同志和专家的热情鼓励和支持,吸收了他们许多宝贵的经验、意见和建议。在此一并致以衷心的感谢!

由于时间较紧,水平有限,书中不妥之处恳切希望各位批评、指正。

编 者

1990年3月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 工程流体力学的任务及其发展简史	1
§ 1-2 连续介质假设·流体的主要物理性质	2
§ 1-3 作用在流体上的力	14
§ 1-4 工程流体力学的研究方法	15
习题	17
第二章 流体静力学	20
§ 2-1 流体静压强特性	20
§ 2-2 流体的平衡微分方程——欧拉平衡 微分方程	22
§ 2-3 流体静力学基本方程	26
§ 2-4 液体的相对平衡	36
§ 2-5 可压缩气体中的压强分布规律	41
§ 2-6 作用在平面上的液体总压力	43
§ 2-7 作用在曲面上的液体总压力	50
§ 2-8 浮力和潜体及浮体的稳定	54
习题	58
第三章 流体运动学	69
§ 3-1 描述流体运动的两种方法	69
§ 3-2 描述流体运动的一些基本概念	81
§ 3-3 流体运动的类型	83
§ 3-4 流体运动的连续性方程	88
§ 3-5 流体微团运动的基本形式	94

§ 3-6 无涡流(无旋流)和有涡流(有旋流)	103
习题	115
第四章 理想流体动力学和平面势流	119
§ 4-1 理想流体的运动微分方程——欧拉运动 微分方程	120
§ 4-2 理想流体元流的伯努利方程	130
§ 4-3 恒定平面势流	136
习题	173
第五章 实际流体动力学基础	177
§ 5-1 实际流体的运动微分方程——纳维—斯托克斯 方程	178
§ 5-2 实际流体元流的伯努利方程	189
§ 5-3 实际流体总流的伯努利方程	192
§ 5-4 不可压缩气体的伯努利方程	210
§ 5-5 总流的动量方程	215
习题	222
第六章 量纲分析和相似原理	232
§ 6-1 量纲分析	232
§ 6-2 流动相似的概念	244
§ 6-3 相似准则	247
§ 6-4 准数方程	252
§ 6-5 模型试验	254
习题	261
第七章 流动阻力和能量损失	264
§ 7-1 流体的两种流动型态——层流和紊流	264
§ 7-2 恒定均匀流沿程损失的表示式	269
§ 7-3 圆管中的层流运动	272

§ 7-4	紊流理论基础	274
§ 7-5	紊流沿程损失的分析和计算	291
§ 7-6	局部损失的分析和计算	309
	习题	322
第八章	边界层理论基础和绕流运动	329
§ 8-1	边界层的基本概念	329
§ 8-2	边界层微分方程——普朗特边界层方程	333
§ 8-3	边界层的动量积分方程	337
§ 8-4	平板上的层流边界层	340
§ 8-5	平板上的紊流边界层	344
§ 8-6	边界层的分离现象	350
§ 8-7	绕流运动	352
	习题	361

第一章 绪 论

§ 1-1 工程流体力学的任务及其发展简史

工程流体力学是研究流体宏观机械运动的规律及其在工程中的应用。它在环境保护、市政建设、土木建筑、交通运输、化工、机械、动力、航空、水利等工程中,得到广泛的应用。

工程流体力学亦是随着生产的发展而发展起来的。早在几千年前,由于农业、航运事业的发展,人们开始了解一些水流运动的规律。我国春秋战国和秦朝时代(公元前 256~210 年),为了满足灌溉等需要,修建了都江堰、郑国渠和灵渠,对水流运动已有一些认识。一般认为,公元前 250 年,希腊哲学家阿基米德(Archimedes)写的“论浮体”,是第一篇阐述流体运动规律的文献。

十七世纪,资本主义制度兴起,生产迅速发展,自然科学(如数学、力学)亦得到了质的飞跃。这些都为工程流体力学的发展提出了要求和创造了条件。十八、九世纪,在牛顿古典力学基础上,形成的古典流体力学得到了发展。它用严格的数学分析方法建立了流体的基本运动方程,为工程流体力学奠定了理论基础。由于古典流体力学在理论中的假设与实际不尽相符,或由于求解上的数学困难,所以尚难以运用来解决实际问题。

与此同时,生产的发展,要求迅速地解决实际问题。因此,依靠实验和实测资料形成的实验水力学亦有了发展。它为人们提供了许多计算明渠水流、有压管流等的经验公式和图表。由于缺乏理论指导,它的成果往往有局限性,难于解决复杂问题。这些经验

公式的大多数,在物理本质和公式之间没有明显的内在联系,且大多是有关系水的问题。

二十世纪以来,随着生产和科学技术的发展,特别是航空方面的理论和实验的迅速发展,导致了古典流体力学和实验水力学的结合,形成了现代流体力学(流体力学)。它是建立在古典流体力学的基础上,根据古典流体力学的基本理论,结合实验的数据以及经验公式,以获得在实际工程中所要求的精度范围内的近似结果。一般将侧重于理论方面的流体力学,称为理论流体力学;侧重于应用的,称为工程流体力学。若研究对象是水流,且又侧重于应用的,称为现代水力学或水力学。

当前科学技术的发展趋势是学科之间的相互渗透、综合。流体力学的研究范围亦越来越广,并且派生出许多新的学科,如空气动力学、计算流体力学、多相流流体力学、环境流体力学、生物流体力学等等。流体力学既是一门古老的,又是一门富有生机的学科,并将得到蓬勃的发展。

§ 1-2 连续介质假设·流体的主要物理性质

一、连续介质假设

流体是由大量的微小分子所组成,分子间具有一定的空隙,每个分子都在不断地作不规则运动。因此,流体的微观结构和运动,在空间或时间上都是不连续的。由于流体力学是研究流体的宏观运动,没有必要对流体进行以分子为单元的微观研究,因而假设流体为连续介质,即认为流体是由比分子大很多的,微观上充分大而宏观上充分小的,可以近似地看成是几何上没有维度的一个点的质点所组成,质点之间没有空隙,连续地充满流体所占有的空间。将流体的运动作为由无数个流体质点所组成的连续介质的运动,

它们的物理量在空间或时间上都是连续的。这样，就可以摆脱研究分子运动的复杂性；在方法上可以运用数学分析中的连续函数这一有力工具。根据连续介质假设所得的理论结果，在很多情况下与相当的实验结果很相符合，因此这个假设是被允许的。在某些特殊情况，例如高空的稀薄气体不能作为连续介质来处理。本书只讨论连续介质的流体。在这里需要说明的，虽然把流体视为连续介质，不研究流体微观的分子运动，但分子运动实际上是客观存在的，因此必须在流体的物理性质中加以考虑，例如流体的一个最重要的物理性质——粘性，就是由于流体内部分子运动所引起的。

在连续介质假设的基础上，一般还认为流体具有均匀等向性，即流体是均质的，各部分和各方向的物理性质是一样的。

二、流体的主要物理性质

流体运动的规律与作用于流体的外部因素及条件有关，但主要决定于流体本身的内在物理性质。因此，先讨论流体的主要物理性质。

1. 易流动性

固体在静止时，可以承受切应力。流体在静止时，不能承受切应力，只要在微小的切应力作用下，就发生流动而变形。流体在静止时不能承受切力、抵抗剪切变形的性质称易流动性。流体也被认为是不能抵抗拉力，而只能抵抗对它的压力。

2. 质量·密度

流体和其他物质一样，具有质量。流体单位体积内所具有的质量称密度，以 ρ 表示。对于均质流体，设体积为 V 的流体具有的质量为 m ，则密度 ρ 为

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

表 1-1 水的物理特性(在一个标准大气压下)

温度 (°C)	重量度 γ (kN/m ³)	密度 ρ (kg/m ³)	粘度 $\mu \times 10^3$ (N·s/m ²)	运动粘度 $\nu \times 10^6$ (m ² /s)	表面张力 σ (N/m)	汽化压强 p_v (kN/m ²), 绝对	体积模量 $K \times 10^{-6}$ (kN/m ²)
0	9.805	999.8	1.781	1.785	0.0756	0.61	2.02
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	0.0749	0.87	2.06
10	9.804	999.7	1.307	1.306	0.0742	1.23	2.10
15	9.798	999.1	1.139	1.139	0.0735	1.70	2.15
20	9.789	998.2	1.002	1.003	0.0728	2.34	2.18
25	9.777	997.0	0.890	0.893	0.0720	3.17	2.22
30	9.764	995.7	0.798	0.800	0.0712	4.24	2.25
40	9.730	992.2	0.653	0.658	0.0696	7.38	2.28
50	9.689	988.0	0.547	0.553	0.0679	12.33	2.29
60	9.642	983.2	0.466	0.474	0.0662	19.92	2.28
70	9.589	977.8	0.404	0.413	0.0644	31.16	2.25
80	9.530	971.8	0.354	0.364	0.0626	47.34	2.20
90	9.466	965.3	0.315	0.326	0.0608	70.10	2.14
100	9.399	958.4	0.282	0.294	0.0589	101.33	2.07

对于非均质流体,由连续介质假设可为

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

密度的单位为 kg/m^3 。

流体的密度随温度和压强的变化而变化。实验证明,液体的这些变化甚微,因此,在解决工程流体力学的绝大多数问题时,可认为液体的密度为一常数。在一个标准大气压下,不同温度的水和空气的密度值分别见表 1-1 和表 1-2。计算时,一般采用水的密度值为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$,干空气的密度值为 $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ (20°C)。

表 1-2 空气的物理特性(在一个标准大气压下)

温 度 ($^\circ\text{C}$)	密 度 ρ (kg/m^3)	重 度 γ (N/m^3)	粘 度 $\mu \times 10^6$ ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)	运动粘度 $\nu \times 10^5$ (m^2/s)
-40	1.515	14.86	1.49	0.98
-20	1.395	13.68	1.61	1.15
0	1.293	12.68	1.71	1.32
10	1.248	12.24	1.76	1.41
20	1.205	11.82	1.81	1.50
30	1.165	11.43	1.86	1.60
40	1.128	11.06	1.90	1.68
60	1.060	10.40	2.00	1.87
80	1.000	9.81	2.09	2.09
100	0.946	9.28	2.18	2.31
200	0.747	7.33	2.58	3.45

3. 重量·重度

地球对流体的引力,即为重力,用重量来表示。流体单位体积内所具有的重量称重度或容重或重率,以 γ 表示。对于均质流体,设体积为 V 的流体具有的重量为 G ,则重度 γ 为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-3)$$

对于非均质流体,由连续介质假设可为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1-4)$$

重度的单位为 N/m^3 。

由运动定律知, $G=mg$, g 为重力加速度(一般可视为常数, 并采用 $9.80 \text{ m}/\text{s}^2$ 的数值)。因此, 可得

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

或

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1-5a)$$

水和空气的重度值, 分别列于表 1-1 和表 1-2。计算时, 一般采用水的重度值为 $9.8 \times 10^3 \text{ N}/\text{m}^3$, 水银的重度值为 $133.28 \times 10^3 \text{ N}/\text{m}^3$ 。

4. 粘性

流体在运动时, 具有抵抗剪切变形能力的性质, 称粘性。它是由于流体内部分子运动的动量运输所引起。当某流层对其相邻层发生相对位移而引起体积变形时, 在流体中产生的切力(也称内摩擦力)就是这一性质的表现。由于内摩擦力, 流体的部分机械能转化为热能而消失。

由实验得知, 在流体的二维平行直线运动中, 如图 1-1 所示, 流层间的切力(内摩擦力) T 的大小与流体的粘性有关, 并与速度

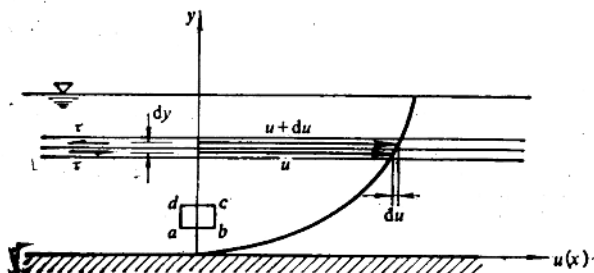


图 1-1

梯度 $\frac{du}{dy}$ 和接触面积 A 成正比, 而与接触面上的压力无关, 即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

单位面积上的切力, 即切应力 τ 为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式中 μ 为与流体粘性有关的系数, 称粘度, 单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。流体的粘度是粘性的度量, 它的值愈大, 粘性的作用愈大。 μ 的数值随流体的种类而不同, 且随流体的压强和温度而发生变化。它随压强的变化不大, 一般可忽略; 但随温度的改变而变化则较大。对于液体来说, 随着温度的升高, 粘度值则减少; 对于气体来说, 则反之。这不难从流体的分子结构和运动学来说明, 例如, 气体的分子间距较大, 吸引力影响很小, 根据分子运动理论, 分子的动量交换率因温度升高而加剧, 因而使切应力亦随之而增大。水和空气的粘度值, 分别列于表 1-1 和表 1-2。式中 $\frac{du}{dy}$ 为速度梯度, 它表示速度沿垂直于速度方向 y 轴的变化率。实际上是流体微团的剪切变形(角)速度, 这可阐明如下。

设在运动流体中取一小方块流体(微团) $abcd$ (参阅图 1-1), 放大后如图 1-2 所示。由于小方块下表面的速度 u 小于上表面的速度 $u+du$ 。经过 dt 时间后, 该块流体成为如图 1-2 中所示的 $a'b'c'd'$ 的形状和位置。这时小方块的剪切变形为 $d\alpha$, 由于 dt 很小, $d\alpha$ 亦很小, 所以

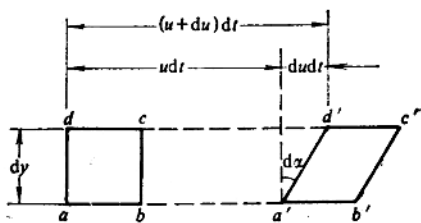


图 1-2

$$d\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{du}{dy} dt$$

即

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\alpha}{dt} \quad (1-8)$$

由上可知, $\frac{du}{dy}$ 速度梯度就是直角变形速度。因为它是在切应力的作用下发生的, 所以亦称剪切变形角速度。

关于 T 与 τ 的方向, 因为它们都是成对出现的, 数值相等, 方向相反, 所以运动较慢的流层作用于运动较快流层上的切力, 其方向与运动方向相反, 并使运动减慢; 运动较快的流层作用于运动较慢流层上的切力, 其方向则与运动方向相同, 并使运动加快, 如图 1-1 所示。

在以后还会遇到粘度 μ 与流体密度 ρ 的比值, 以 ν 表示, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

ν 的单位为 m^2/s 。因为它没有力的量纲, 是一个运动学要素, 为了区别起见, ν 称运动粘度, μ 则称动力粘度。

式(1-7)是由牛顿(Newton)提出的假设, 后被人证实, 称牛顿内摩擦定律。它可以理解为切应力与剪切变形角速度成正比。显然, 流体静止时, 没有切应力。牛顿内摩擦定律只适用于流体的层流运动, 而且对某些特殊流体亦不适用。凡符合牛顿内摩擦定律的流体, 称牛顿流体, 如水、空气、汽油、煤油、乙醇等; 凡不符合的流体, 称非牛顿流体, 如聚合物液体、泥浆、血浆等。牛顿流体和非牛顿流体的区别, 可用图 1-3 表示, τ_0 为初始(屈服)切应力。本书只讨论牛顿流体。

在研究流体运动时, 常引进理想流体的概念。理想流体和实际流体的区别是没有粘性。进行理想流体研究的目的是, 一方面是为了简化分析研究工作, 使较易得出一些主要结论, 然后再对粘性

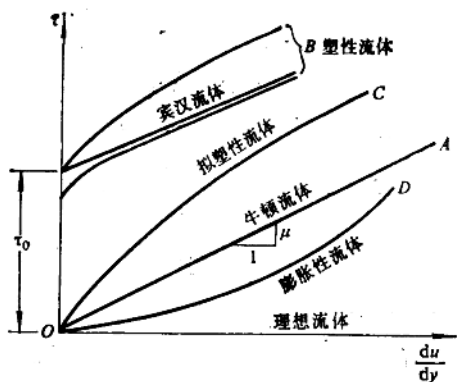


图 1-3

的作用进行专门研究后加以修正、补充，这种修正、补充多半是以实验资料为依据的；另一方面，亦有一些问题，如粘性的影响不是很大，通过对理想流体的研究，可以得出实际可用的结果。理想流体只是实际流体在某种条件下的一种近似（简化）模型。

例 1-1 设有一液体粘性测定仪，如图 1-4 所示。测定仪的内、外两圆筒具有同一轴线，两筒间的间隙甚小，其间充满待测定的液体。测定仪的内圆筒被一扭丝悬挂着，所受力矩可由扭丝的转角测定；外圆筒可按各种速度旋转。通过实验得知：当外圆筒以一定的速度旋转时，转动力矩通过液体内部的传递而至内筒，使扭丝扭转一角度，达到平衡。紧邻外圆筒内壁的液体，其运动速度和外圆筒的周速相等；而紧邻内圆筒外壁的液体，则和内圆筒一样，其运动速度为零。两筒间隙中的液体速度，按直线变化，由零增至外圆筒周速。现已知内、外圆筒半径分别为 r_1 和 r_2 ，两圆筒侧壁之间、底壁之间的间隙分别为 δ 和 Δ ，液体高度为 h ，外圆筒转速为 n (rpm)，转动力矩为 M 。试求液体动力粘度 μ 的计

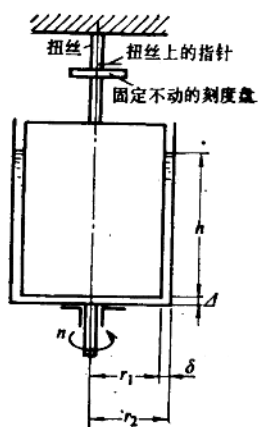


图 1-4

算式。

解：圆筒侧壁上所受的切应力 τ_1 为

$$\tau_1 = \mu \frac{du}{dr} = \mu \frac{2\pi n r_2}{60\delta}$$

相应产生的力矩 M_1 为

$$M_1 = (2\pi r_1 h) \tau_1 \cdot r_1 = \frac{\sigma^2 r_1^2 r_2 h n}{15\delta} \mu$$

圆筒底壁上所受的切应力 τ_2 为

$$\tau_2 = \mu \frac{2\pi n}{60\Delta} r$$

相应产生的力矩 M_2 为

$$M_2 = \int_0^{r_1} \tau_2 (2\pi r dr) r = \mu \frac{\sigma^2 n}{15\Delta} \int_0^{r_1} r^3 dr = \frac{\sigma^2 n r_1^4}{60\Delta} \mu$$

转动力矩

$$M = M_1 + M_2 = \mu \left(\frac{\sigma^2 r_1^2 r_2 h n}{15\delta} + \frac{\sigma^2 n r_1^4}{60\Delta} \right)$$
$$\mu = \frac{15M / \sigma^2 r_1^2 n}{(r_2 h / \delta) + (r_1^2 / 4\Delta)}$$

5. 压缩性和膨胀性

当作用在流体上的压力增大时，体积减少；压力减小时，体积增大的性质称流体的压缩性，实际上也可称流体的弹性。当流体所受的温度升高时，体积膨胀；温度降低时，体积收缩的性质称流体的膨胀性。

流体的压缩性，一般以压缩系数 β 和体积模量 K 来度量。设流体体积为 V ，压强增加 dp 后，体积减小 dV ，则压缩系数 β 为

$$\beta = - \frac{dV}{V dp} \quad (1-10)$$

式中负号表示压强增大，体积减小，使 β 为正值。 β 的单位为 m^3/N 。

因为质量为密度与体积的乘积，流体压强增大，密度亦增大，所以 β 也可视为密度的相对增大值与压强增大值之比，即