

第一节 流体力学的概念与发展简史

一、流体力学概念

流体力学是力学的一个独立分支，是一门研究流体的平衡和流体机械运动规律及其实际应用的技术科学。

流体力学所研究的基本规律，有两大组成部分。一是关于流体平衡的规律，它研究流体处于静止（或相对平衡）状态时，作用于流体上的各种力之间的关系，这一部分称为流体静力学；二是关于流体运动的规律，它研究流体在运动状态时，作用于流体上的力与运动要素之间的关系，以及流体的运动特征与能量转换等，这一部分称为流体动力学。

流体力学在研究流体平衡和机械运动规律时，要应用物理学及理论力学中有关物理平衡及运动规律的原理，如力系平衡定理、动量定理、动能定理，等等。因为流体在平衡或运动状态下，也同样遵循这些普遍的原理。所以物理学和理论力学的知识是学习流体力学课程必要的基础。

目前，根据流体力学在各个工程领域的应用，流体力学可分为以下三类：

水利类流体力学：面向水工、水动、海洋等；

机械类流体力学：面向机械、冶金、化工、水机等；

土木类流体力学：面向市政、工民建、道桥、城市防洪等。

二、流体力学的发展历史

流体力学的萌芽，是自距今约 2500 年以前，西西里岛的希腊学者阿基米德写的“论浮体”一文开始的。他对静止时的液体力学性质作了第一次科学总结。

流体力学的主要发展是从牛顿时代开始的，1687 年牛顿在名著《自然哲学的数学原理》中讨论了流体的阻力、波浪运动，等内容，使流体力学开始成为力学中的一个独立分支。此后，流体力学的发展主要经历了三个阶段：

[伯努利](#)所提出的液体运动的能量估计及欧拉所提出的液体运动的解析方法，为研究液体运动的规律奠定了理论基础，从而在此基础上形成了一门属于数学的古典“水动力学”（或古典“流体力学”）。

在古典“水动力学”的基础上纳维和斯托克思提出了著名的实际粘性流体的基本运动方程——纳维-斯托克斯方程。从而为流体力学的长远发展奠定了理论基础。但由于其所用数学的复杂性和理想流体模型的局限性，不能满意地解决工程问题，故形成了以实验方法来制定经验公式的“实验流体力学”。但由于有些经验公式缺乏理论基础，使其应用范围狭窄，且无法继续发展。

从 19 世纪末起，人们将理论分析方法和实验分析方法相结合，以解决实际问题，同时古典流体力学和实验流体力学的内容也不断更新变化，如提出了相似理论和量纲分析，边界层理论和紊流理论等，在此基础上，最终形成了理论与实践并重的研究实际流体模型的现代流体力学。在 20 世纪 50 年代以后，由

于计算机的发展与普及，流体力学的应用更是日益广泛。

其他重要的科学家：[李冰](#)、[达·芬奇](#)

主要的[流体力学](#)事件有：

- 17世纪瑞士数学家：伯努利在名著《流体力学》中提出了[伯努利方程](#)。
- 1753年[欧拉](#)在名著《流体运动的一般原理》中提出[理想流体](#)概念，并建立了理想流体基本方程和连续方程，从而提出了流体运动的解析方法，同时提出了[速度势](#)的概念。
- 1782年拉格朗日首先引进了[流函数](#)的概念。
- 1826年法国工程师纳维，1845年英国数学家、物理学家斯托克斯提出了著名的[纳维-斯托克斯方程](#)。
- 1823年雷诺发现了流体流动两种流态：[层流和紊流](#)。
- 1893年亥姆霍兹指出了理想流体中旋涡的许多基本性质及旋涡运动理论，并于1895年提出了脱体绕流理论。
- 19世纪末，[相似理论](#)提出，实验和理论分析相结合。
- 1904年普朗特提出了[边界层理论](#)。
- 20世纪年代以后，计算流体力学得到了迅速的发展。流体力学内涵不断地得到了充实与提高。

在我国，水利事业的历史十分悠久

- 2000多年前的“大禹治水”的故事——顺水之性，治水须引导和疏通。
- 秦朝在公元前246—公元前210年修建了我国历史上的三大水利工程（[都江堰](#)、郑国渠、灵渠）——明渠水流、堰流。
- 古代的计时工具“[铜壶滴漏](#)”——孔口出流。
- 清朝雍正年间，何梦瑶在《算迪》一书中提出流量等于过水断面面积乘以断面平均流速的计算方法。
- 隋朝（公元584—618年）完成的南北大运河。
- 隋朝工匠李春在冀中洹河修建（公元594—605年）的赵州石拱桥——拱背的13个小拱，既减压主拱的负载，又可宣泄洪水。

第二节 流体的主要物理性质

一、流体的基本特征

物质的三态

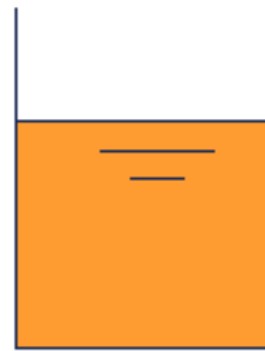
在地球上，物质存在的主要形式有：固体、液体和气体。

流体和固体的区别

从力学分析的意义上看，在于它们对外力抵抗的能力不同。



固体



流体

固体：既能承受压力，也能承受拉力与抵抗拉伸变形。

流体：只能承受压力，一般不能承受拉力与抵抗拉伸变形。

液体和气体的区别：

气体易于压缩；而液体难于压缩；

液体有一定的体积，存在一个自由液面；气体能充满任意形状的容器，无一定的体积，不存在自由液面。

液体和气体的共同点：

两者均具有易流动性，即在任何微小切应力作用下都会发生变形或流动，故二者统称为流体。

2. 流体的连续介质模型

微观：流体是由大量做无规则运动的分子组成的，分子之间存在空隙，但在标准状况下， 1 m^3 液体中含有 3.3×10^{22} 个左右的分子，相邻分子间的距离约为 3.1×10^{-10} 。 1 m^3 气体中含有 2.7×10^{25} 个左右的分子，相邻分子间的距离约为 3.2×10^{-7} 。 [观看录像》](#)

宏观：考虑宏观特性，在流动空间和时间上所采用的一切特征尺度和特征时间都比分子距离和分子碰撞时间大得多。

(1) 定义

连续介质（ ）：质点连续地充满所占空间的流体或固体。

连续介质模型（ ）：把流体视为没有间隙地充满它所占据的整个空间的一种连续介质，且其所有的物理量都是空间坐标和时间的连续函数的一种假设模型： 。

[点击这里练习一下](#)

(2) 优点

排除了分子运动的复杂性。

物理量作为时空连续函数，则可以利用连续函数这一数学工具来研究问题。

3. 流体的分类

(1) 根据流体受压体积缩小的性质，流体可分为：

可压缩流体（ ）：流体密度随压强变化不能忽略的流体 $\rho \neq \text{const}$ 。

[观看录像》](#)

不可压缩流体（ ）：流体密度随压强变化很小，流体的密度可视为常数的流体

$\rho = \text{const}$ 。

[观看录像》](#)

注：

严格地说，不存在完全不可压缩的流体。

一般情况下的液体都可视为不可压缩流体（发生水击时除外）。

对于气体，当所受压强变化相对较小时，可视为不可压缩流体。

管路中压降较大时，应作为可压缩流体。

(2) 根据流体是否具有粘性，可分为：

实际流体：指具有粘度的流体，在运动时具有抵抗剪切变形的能力，即存在摩擦力，粘度 $\mu \neq 0$ 。

理想流体：是指既无粘性（ $\mu = 0$ ）又完全不可压缩（ $\rho = \text{const}$ ）流体，在运动时也不能抵抗剪切变形。

二、惯性

一切物质都具有质量，流体也不例外。质量是物质的基本属性之一，是物体惯性大小的量度，质量越大，惯性也越大。单位体积流体的质量称为密度（density），以 ρ 表示，单位： kg/m^3 。对于均质流体，设其体积为 V ，质量 m ，则为密度

$$\rho = \frac{m}{V}$$

对于非均质流体，密度随点而异。若取包含某点在内的体积，其中质量，则该点密度需要用极限方式表示

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

三、压缩性

压缩性

流体的可压缩性（ κ ）：作用在流体上的压力变化可引起流体的体积变化或密度变化，这一现象称为流体的可压缩性。压缩性可用体积压缩率 κ 来量度。

体积压缩率 κ

体积压缩率 κ （ $\kappa = -\frac{dV/V}{dp}$ ）：流体体积的相对缩小值与压强增值之比，即当压强增大一个单位值时，流体体积的相对减小值：

$$\kappa = -\frac{dV/V}{dp} = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad ()$$

因为质量不变， $\rho = \frac{m}{V}$ ， $\rho dV = -V d\rho$ ， $-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$

体积模量 K

流体的压缩性在工程上往往用体积模量来表示。

体积模量 K （ $K = \frac{dp}{-dV/V}$ ）是体积压缩率的倒数。

$$K = \frac{1}{\kappa} = -\frac{dp}{dV/V} = \frac{dp}{d\rho/\rho}$$

κ 与 K 随温度和压强而变化，但变化甚微。

说明： K 越大，越不易被压缩，当 $K \rightarrow \infty$ 时，表示该流体绝对不可压缩。

流体的种类不同，其 κ 和 K 值不同。

同一种流体的 κ 和 K 值随温度、压强的变化而变化。

在一定温度和中等压强下，水的体积模量变化不大

所以可近似用下式表示：

$$-\frac{v_1 - v_2}{v_1} = \frac{p_1 - p_2}{K}, \text{ 即 } \frac{\Delta V}{V_1} = \frac{-\Delta p}{K}$$

一般工程设计中，水的 $K \approx 2.0 \times 10^9 \text{ Pa}$ ，说明 $\Delta p = 1 \text{ atm}$ 时， $\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{20000}$ 。 Δp 不大的条件下，水的压缩

性可忽略，相应的水的密度可视为常数。

四、粘度

粘性

粘性：即在运动的状态下，流体所产生的抵抗剪切变形的性质。

[观看录像一](#)

[观看录像二](#)

粘度

() 定义

流体的粘度：粘性大小由粘度来量度。流体的粘度是由流动流体的内聚力和分子的动量交换所引起的。

() 分类

动力粘度 μ ：又称绝对粘度、动力粘性系数、粘度，是反映流体粘滞性大小的系数，单位： $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

运动粘度 ν ：又称相对粘度、运动粘性系数。

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

水的运动粘度 ν 通常可用经验公式计算：

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337 t + 0.000221 t^2}$$

式中， t 为水温，单位： $^{\circ}\text{C}$ 。

() 粘度的影响因素

流体粘度 μ 的数值随流体种类不同而不同，并随压强、温度变化而变化。

- 1) 流体种类。一般地，相同条件下，液体的粘度大于气体的粘度。
- 2) 压强。对常见的流体，如水、气体等， μ 值随压强的变化不大，一般可忽略不计。
- 3) 温度。是影响粘度的主要因素。当温度升高时，液体的粘度减小，气体的粘度增加。

液体：内聚力是产生粘度的主要因素，当温度升高，分子间距离增大，吸引力减小，因而使剪切变形速度所产生的切应力减小，所以 μ 值减小。

气体：气体分子间距离大，内聚力很小，所以粘度主要是由气体分子运动动量交换的结果所引起的。温度升高，分子运动加快，动量交换频繁，所以 μ 值增加。

牛顿内摩擦定律

牛顿内摩擦定律：液体运动时，相邻液层间所产生的切应力与剪切变形的速率成正比。即

$$\tau = \mu \frac{dw}{dy} = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (\quad , \quad) \quad (\quad)$$

τ —粘性切应力，是单位面积上的内摩擦力。

说明：1) 流体的切应力与剪切变形速率，或角变形率成正比。——区别于固体的重要特性 固体的切应力与角变形的大小成正比。

- 2) 流体的切应力与动力粘度 μ 成正比。
- 3) 对于平衡流体 $\tau = 0$ ，对于理想流体 $\mu = 0$ ，所以均不产生切应力，即 $\tau = 0$ 。

牛顿平板实验与内摩擦定律

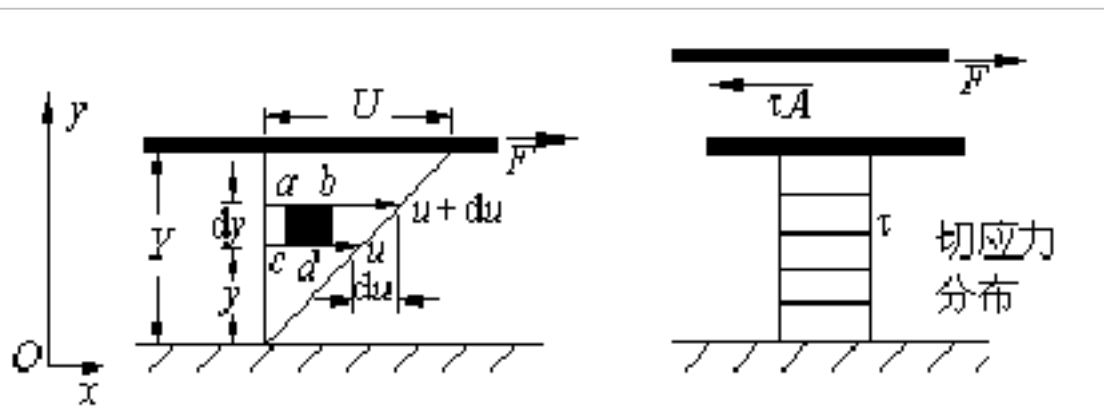


图 流体的绝对粘度

设板间的 向流速呈直线分布，即： $u(y) = \frac{U}{Y}y$

则： $\frac{du}{dy} = \frac{U}{Y}$

实验表明，对于大多数流体满足： $F \propto \frac{AU}{Y}$

引入动力粘度 μ ，则得牛顿内摩擦定律

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{Y} = \mu \frac{du}{dy} \quad ()$$

式中：流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 代表液体微团的剪切变形速率。线性变化时，即 $\frac{du}{dy} = \frac{U}{Y}$ ；非线性变化时， $\frac{du}{dy}$ 即是对 y 求导。

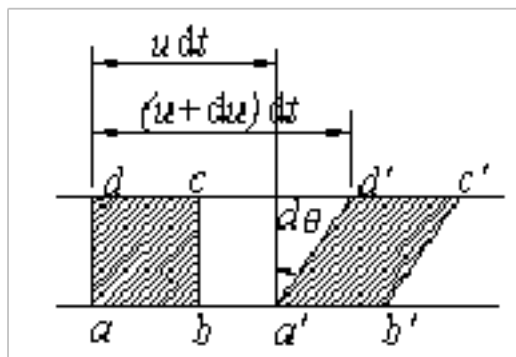
证明：在两平板间取一方形质点，高度为 y ， 时间后，质点微团从 $abcd$ 运动到 $a'b'c'd'$ 。

由图 得：

$$d\theta \approx \tan(d\theta) = \frac{du dt}{dy}$$

则： $\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{d\theta}{dt}$$



图

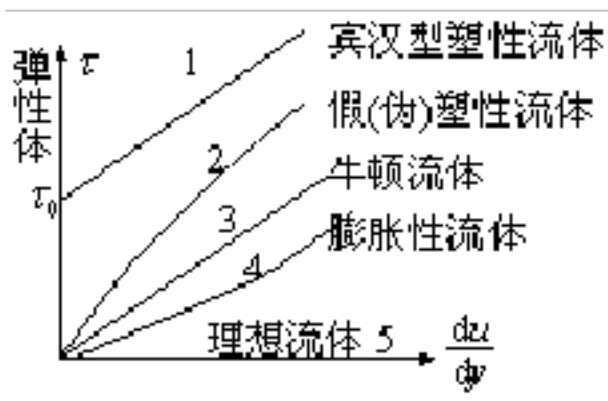
$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{d\theta}{dt}$$

说明：流体的切应力与剪切变形速率，或角变形率成正比。

牛顿流体、非牛顿流体

牛顿流体（ ）：是指任一点上的剪应力都同剪切变形速率呈线性函数关系的流体，即遵循牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。

非牛顿流体：不符合上述条件的均称为非牛顿流体



图

$$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

- 流体
- 1. 宾汉型流体: $\tau_0 \neq 0, n=1, \mu = \text{const}$
 - 2. 假(伪)塑性流体: $\tau_0 = 0, n < 1$
 - 3. 牛顿流体: $\tau_0 = 0, n=1, \mu = \text{const}$
 - 4. 膨胀流体: $\tau_0 = 0, n > 1$
 - 5. 理想流体: $\tau_0 = 0, \mu = 0$

想一想 切应力与剪切变形速率成线性关系的流体是牛顿流体，对吗？ 您的回答是：

对 错

流 体 分 类

流体类别		定义	$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n$	实例
理想流体		无粘性及完全不可压缩的一种假想流体	$\mu = 0, \tau_0 = 0, \tau$	
实际流体	牛顿流体	有粘性、可压缩的流体 $\mu \neq 0$	满足牛顿内摩擦定律 $\tau_0 = 0, \mu \neq 0, n = 1$	水、空气、汽油、煤油、甲苯、乙醇等
	非牛顿流体	宾汉型塑性流体	$\tau_0 \neq 0, \mu = \text{Const}, n = 1$	牙膏、泥浆、血浆等
		假塑性流体	$\tau_0 = 0, \mu \neq 0, n < 1$	橡胶、油漆、尼龙等
		膨胀性流体	$\tau_0 = 0, \mu \neq 0, n > 1$	生面团、浓淀粉糊

第三节 流体力学的概述与应用

一、课程的性质与目的

性质：流体力学是研究流体机械运动规律及其应用的学科，是土木、水利类专业的一门必修的专业基础课程。研究对象以水为主体，旁及气体与可压缩流体；研究内容：机械运动规律和工程应用。

目的：通过各教学环节，使学生掌握流体运动的基本概念，基本理论，基本计算方法与实验技能，培养分析问题的能力和创新能力，为学习专业课程，并为将来在土木工程各个领域从事专业技术工作打下基础。

地位：为水文学、土力学、工程地质、土木工程施工、建筑设备等多门基础课和专业课程阐释所涉及的流体力学原理，帮助学生进一步认识土木工程与大气和水环境的关系。

其他： 素质教育——“力学文化”、“水文化”。

注册工程师考试：“一九九七年度一级注册结构工程师考试说明”摘录：基础考试题量、分数分配表

时间	课程	题量	课程	题量
上午段	数学	题	理论力学	题
	物理（光、声、热）	题	材料力学	题
	化学	题	流体力学	题
	建筑材料	题	电工学	题
	工程经济	题		
合计 题（每题 分） 小时				
下午段	分（略）			

统计结果：流体力学占基础课考分的 ，占总考分（含专业科目考试）的 ；学分占总学分（ 分 分）的 ，超过学分比例。

研究生入学考试 工程流体力学(水力学)往往成为研究生入学考试中的专业基础课之一。

二、流体力学的应用

流体是人类生活和生产中经常遇到的物质形式，因此许多科学技术部门都和流体力学有关。例如水利工程、土木建筑、交通运输、机械制造、石油开采、化学工业、生物工程等都有大量的流体问题需要应用流体力学的知识来解决，事实上，目前很难找到与流体力学无关的专业和学科。

在流体力学已广泛用于土木工程各个领域，如建筑工程和土木工程中的应用。如基坑排水、路基排水、地下水渗透、地基坑渗稳定处理、围堰修建、海洋平台在水中的浮性和抵抗外界扰动的稳定性等。

在市政工程中的应用。如桥涵孔径设计、给水排水、管网计算、泵站和水塔的设计、隧洞通风等，特别是给水排水工程中，无论取水、水处理、输配水都是在水流动过程中实现的。流体力学理论是给水排水系统设计和运行控制的理论基础。

[观看录像](#)

城市防洪工程中的应用。如堤、坝的作用力与渗流问题、防洪闸坝的过流能力等。

在建筑环境与设备工程中的应用。如供热、通风与空调设计，以及设备的选用等。

例 例 例

三、本课程基本要求

通过本课程学习应达到的基本要求是：

具有较为完整的理论基础，包括：

() 掌握流体力学的基本概念；

() 熟练掌握分析流体力学的总流分析方法，熟悉量纲分析与实验相结合的方法，了解求解简单平面势流的方法；

() 掌握流体运动能量转化和水头损失的规律，对传统阻力有一定了解。

具有对一般流动问题的分析和讨论能力，包括：

() 水力荷载的计算；

() 管道、渠道和堰过流能力的计算，井的渗流计算；

() 水头损失的分析 and 计算。

掌握测量水位、压强、流速、流量的常规方法。具有观察水流现象，分析实验数据和编写报告的能力。

重点掌握：基础流体力学的基本概念、基本方程、基本应用。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/795001042142011131>