

流体力学

Fluid Mechanics

主要内容

Content

第 1 章 绪论

1 Introduction

第 2 章 相似原理和量纲分析

**2 Similitude and Dimensional
Analysis**

第 3 章 水静力学

3 Hydrostatics

第 4 章 水动力学

4 Hydrodynamics

第 5 章 水头损失

5 Head Loss

第 6 章 有压管流

6 Pipe Flows

第 7 章 明渠流动

7 Open Channel Flows

第 8 章 孔口、管嘴流和堰流

8 Orifice, Nozzle and Weir Flows

第 9 章 渗流

9 Seepage Flows

第 10 章 液体微元运动分析

**10 Differential Analysis for Fluid
Flow**

第 1 章 绪 论 (Introduction)

1.1 流体力学的基本概念

流体动力学、流体静力学、水力学、连续介质模型、
理论分析/数值计算/实验研究三种研究方法

1.2 作用在液体上的力

表面力：压力、粘性摩擦力/正应力（压应力/压强）、切应力

质量力：重力、惯性力、电磁力等

单位质量力

1.3 流体的主要物理性质

粘性、动力/运动粘性系数，牛顿内摩擦定理，

流体的种类：牛顿/宾汉/膨胀/拟塑性流体

理想流体、压缩系数/体积弹性模量/膨胀系数、表面张力、汽蚀

第 1 章 绪 论 (Introduction)

1.1 流体力学 (fluid mechanics) 的基本概念

1.1.1 流体力学的定义与研究对象

流体力学研究处于运动状态的流体 (**fluid dynamics**) 或静止的流体 (**fluid statics**)。

液体 (**liquid**) 与气体 (**gas**) 统称为流体 (**fluid**)。

水力学 (Hydraulics) – 研究液体运动规律的科学。水力学为流体力学的一个分支。水力学的研究对象是液体，液体的基本特征就是其具有流动性。流动性 (**mobility**) 指任何微小切应力都会使液体流动的性质；或静止的液体不能承受任何微小切应力的作用。流动性还表现在液体不能承受拉力。

1.1.2 连续介质模型 (continuum)

液体是由大量的分子构成的。水力学的研究目的是液体的宏观机械运动规律，而这一规律恰恰是研究对象中所有分子微观运动的宏观表现。

1755年瑞士数学家、力学家欧拉 (**L. Euler**) 首先提出：“液体是一个不存在分子间隙的连续介质。”

连续介质模型—由密集质点构成的、内部无间隙的液体。
质点—含有大量分子的，与流动空间相比体积可忽略不计的具有一定质量的液体微团。

建立连续介质模型：

- (1) 排除了分子运动的复杂性；
- (2) 引入质点的概念，各质点物理量都可视为空间坐标和时间变量的连续函数，可用数学分析方法来研究液体运动。

1.1.3 流体力学的研究方法

理论分析

数值计算

实验研究

上述三种方法互相结合，可以解决许多复杂的工程技术问题。

1.1.4 流体力学的任务

作为独立学科，在理论上可独立应用解决工程实际问题。

作为专业基础，可在诸多的领域中得到应用：

航海—船的航行；

水利—引水、防洪；

动力—水力发电；

机械—液压传动、润滑；

石油—固井、采油、输油；

化工—分离、成型、输送；

海洋—海流、潮汐、海浪；

医疗—微循环、血液流变；

军事—飞机、潜艇、战舰、导弹、鱼雷；

体育—游泳、赛艇；

农业—灌溉；

交通—桥涵、港口；

土木—基坑排水、材料输送；

环境—水污染治理；

市政—水源取水、水净化、管网输水、废水收集、管渠输送、泵站提升以等。

1.2 作用在液体上的力

根据作用方式，可分为两类：表面力及质量力。

1.2.1 表面力 (surface force)

表面力—通过直接接触，施加在隔离体接触表面上的力。

取隔离体如图，并在隔离体表面

取微元面积 ΔA ，若设

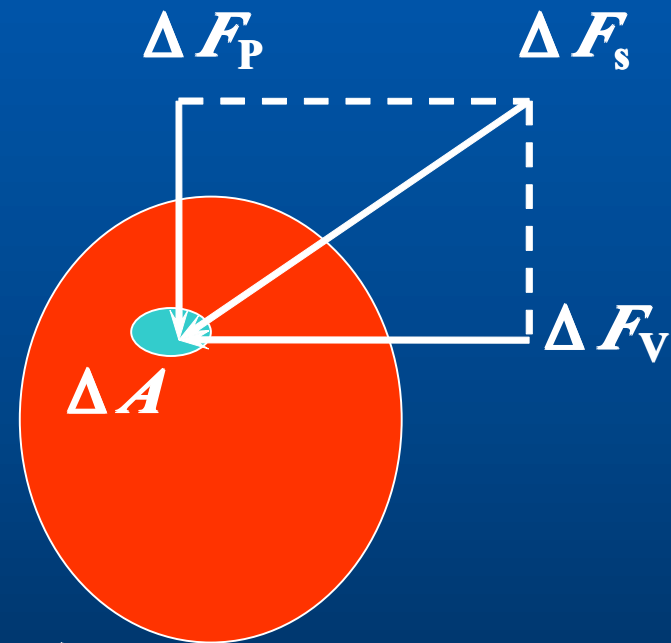
作用在 ΔA 上的表面力为 ΔF_s ，

根据力的分解原理则有：

ΔA 上 ΔF_s 的法向 (normal) 分力为

ΔF_p ；

ΔA 上 ΔF_s 的切向 (tangent) 分力则为 ΔF_v 。



水力学中，通常以单位面积表面力的大小——应力来表示表面力，即

$$\bar{p} = \frac{\Delta F_P}{\Delta A}$$

为 ΔA 上的平均压应力，取极限

$$p_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_P}{\Delta A} = \frac{dF_P}{dA}$$

为 A 点的压应力 (**normal stress**)，又称 A 点的压强 (**pressure**)；同理

$$\tau_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_V}{\Delta A} = \frac{dF_V}{dA}$$

为 A 点的切应力 (**shear stress/tangential stress**)。

应力的单位是帕斯卡 (**Pascal**)，以符号 **Pa** 表示。

1 Pa 相当于 **1 N/m²**。

1.2.2 质量力 (body force)

质量力—施加在隔离体每个质点上的力，如重力。

质量力与隔离体的质量成正比。

质量力的大小用单位质量力表示。

设一均质隔离体质量为 m ，所受质量力为 F_b ，则单位质量力为

$$\vec{f}_b = \frac{\vec{F}_b}{m}$$

在直角坐标系中有

$$\vec{F}_b = F_{bx} \vec{i} + F_{by} \vec{j} + F_{bz} \vec{k}$$

于是

$$\vec{f}_b = \frac{F_{bx}}{m} \vec{i} + \frac{F_{by}}{m} \vec{j} + \frac{F_{bz}}{m} \vec{k} = X \vec{i} + Y \vec{j} + Z \vec{k}$$

式中 X 、 Y 、 Z 为单位质量力在各坐标轴的分力。

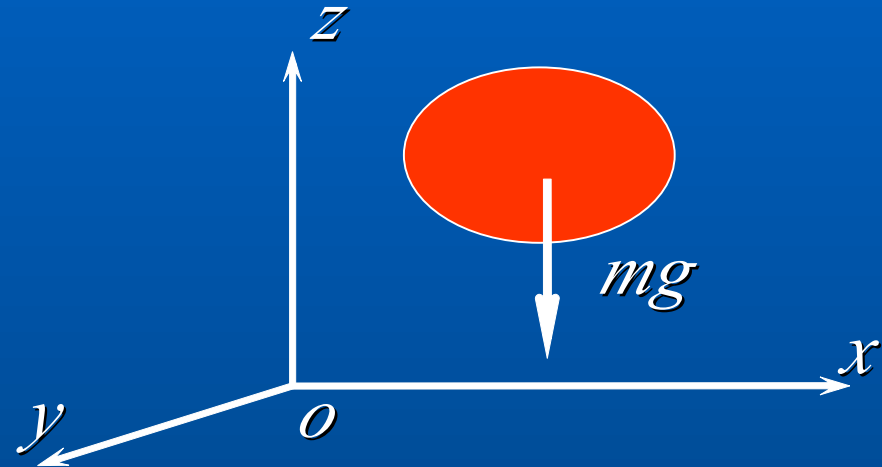
若作用在液体上的质量力只有重力，如图所示。

质量力的三个分力分别为：

$$F_{bx} = 0$$

$$F_{by} = 0$$

$$F_{bz} = -Mg$$



单位质量重力则分别为：

$$X = \frac{F_{bx}}{M} = 0$$

$$Y = \frac{F_{by}}{M} = 0$$

$$Z = \frac{F_{bz}}{M} = \frac{-Mg}{M} = -g$$

单位质量力的单位为米每二次方秒 (m/s^2)。

1.3 流体的主要物理性质

1.3.1 惯性

惯性（**inertia**）—物体维持原有运动状态的性质。
通常用质量（**mass**）来衡量惯性大小。

液体的惯性则用单位体积液体的质量—密度来衡量。

体积为 V 、质量为 M 、均质液体的密度（**density**）为

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

密度的单位为千克每立方米（**kg/m³**）。

常用液体的密度：

4°C时水的密度

$$\rho_{\text{水}} = \mathbf{1000\text{kg/m}^3};$$

常温水银的密度

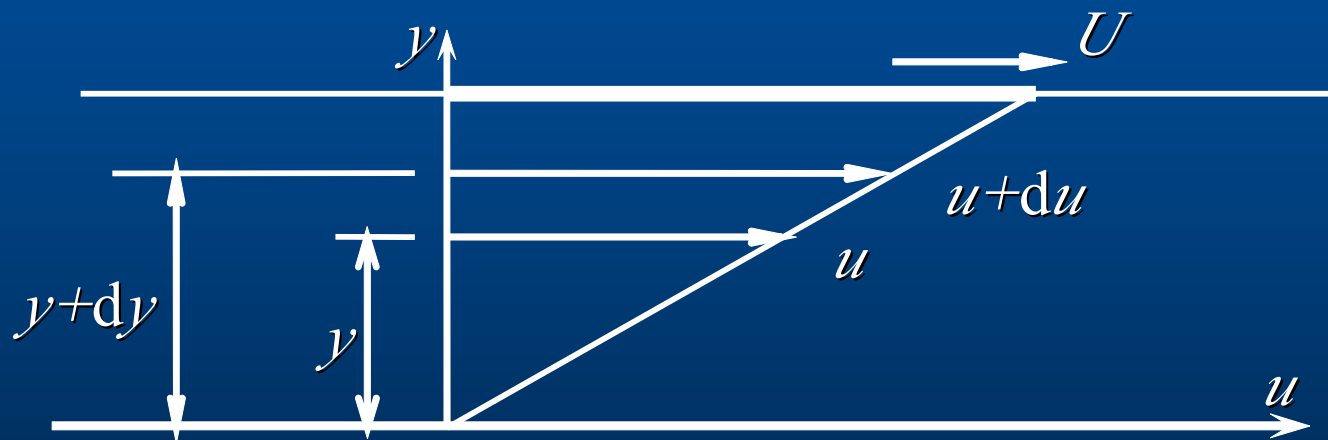
$$\rho_{\text{汞}} = \mathbf{13600\text{kg/m}^3}.$$

1.3.2 黏性 (viscosity)

黏性是液体特有的性质。

液体流动时，质点之间会产生相对运动，产生摩擦阻力，从而阻碍流动。液体的这种性质为黏性。

固体运动时摩擦发生在边界，液体运动时摩擦发生在内部。因此，液体运动的摩擦又称内摩擦。摩擦阻力又称内摩擦力或切力 (Shear force)。



牛顿内摩擦定律

根据大量实验，牛顿 (I. Newton) 在1686年提出：
内摩擦力 F_V 的大小与

- (1) 速度梯度 du/dy 成正比；
- (2) 液层的接触面积 A 成正比；
- (3) 液体的性质有关。

于是

$$F_V \propto A \frac{du}{dy}$$

或

$$F_V = \mu A \frac{du}{dy}$$

以切应力 (shear stress) 表示：

$$\tau = \frac{F_V}{A} = \mu \frac{du}{dy}$$

上式称为牛顿内摩擦定律。

流体的种类

依据切应力和应变的关系，流体可分为

(1) 牛顿流体 (**Newtonian fluid**): 切应力和速度梯度成正比;

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

(2) 宾汉流体 (**Bingham fluid**): 存在一屈服应力

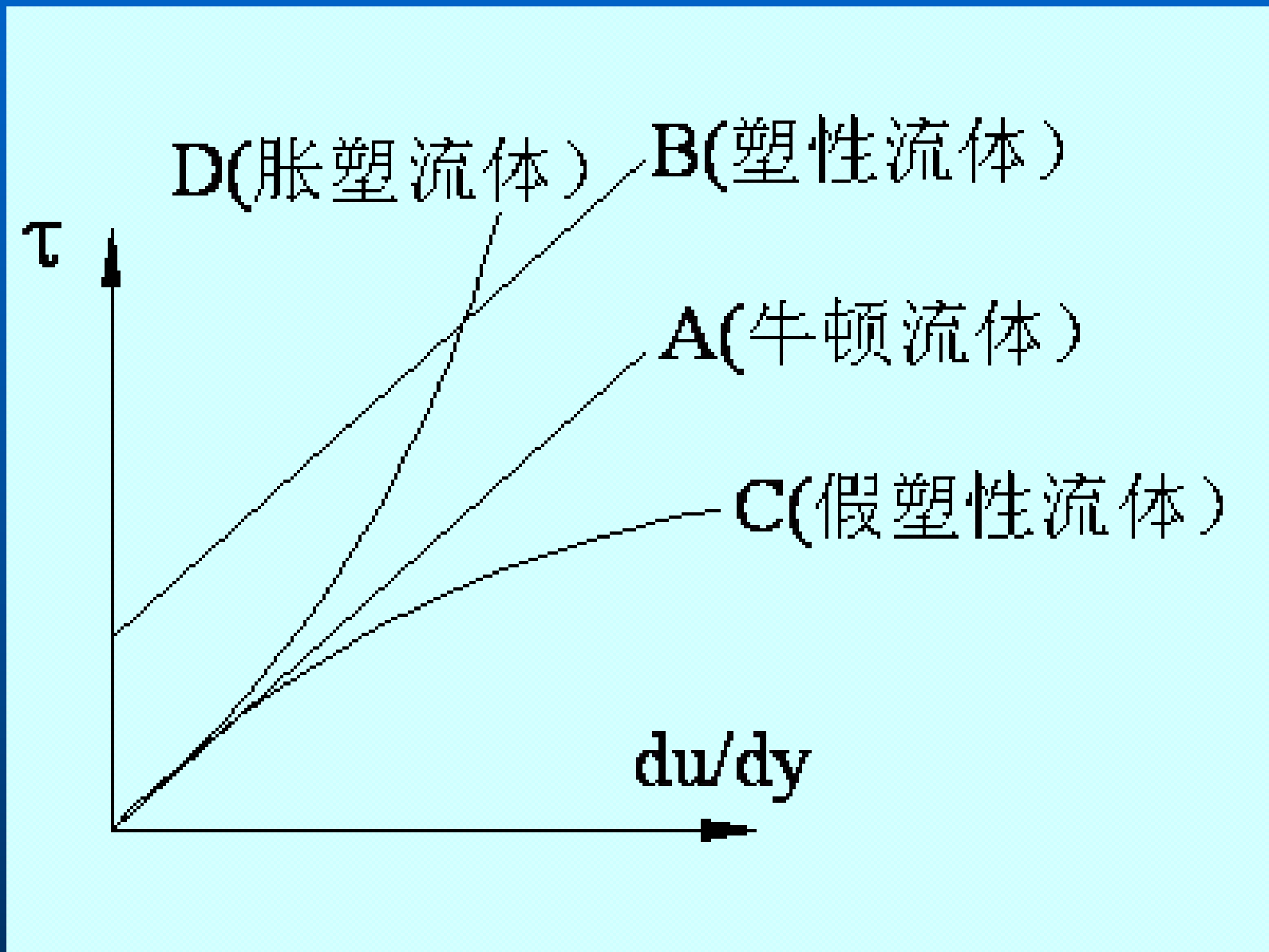
$$\tau = \tau_B + \mu \frac{du}{dy}$$

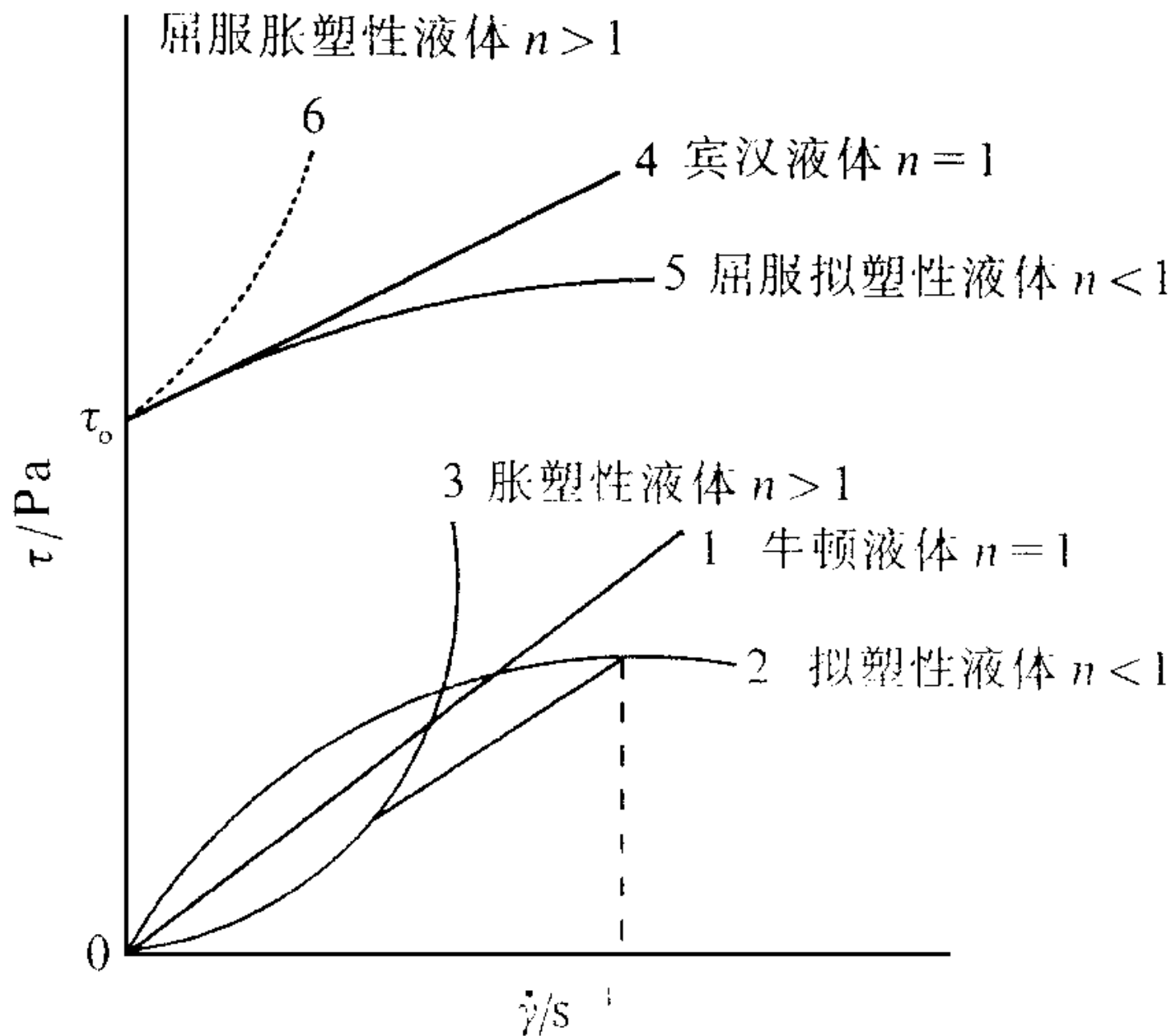
(3) 膨胀流体 (**Dilatant fluid**):

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

(4) 拟塑性流体 (**Pseudoplastic fluid**)

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^{1/n}$$





黏度

在牛顿内摩擦定律中，比例系数 μ 又称为动力黏度 (**dynamic viscosity**)，单位是帕秒 (**Pa s, kg/m/s**)。

动力黏度是液体黏性的度量， μ 值越大，液体黏性越大，液体的流动性越差。

有时，动力黏度 μ 和密度 ρ 经常以比的形式出现，也可用来描述液体的黏性，即

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

定义 ν 为运动黏度 (**kinematic viscosity**)，单位为二次方米每秒 (**m²/s**)。

液体的黏度与温度有关，温度越高，黏度越小。

理想液体 (**ideal liquid or ideal fluid**)

液体黏性的存在，往往给运动规律的研究带来极大困难，为简化理论分析，特引入理想液体的概念。

理想液体—不存在黏性，或黏度为零的液体。

1.3.3 压缩性 (*compressibility*)

压缩性指液体因压强增大，分子间距减小，体积缩小，密度增大的性质。

液体的压缩性用压缩系数 κ 表示。一定温度下，液体体积为 V ，压强增加 dp 后，体积减小 dV ，则压缩系数表示为

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

压缩系数的倒数又称弹性模量。

不可压缩液体 (*incompressible liquid*) —— 密度等常数的液体。

对气体常数为 $R[m^2S^{-2}K^{-1}]$ 的气体：

$$p = \rho RT$$

1.3.4 表面张力 (*surface tension*)

由于液体表面分子间的引力而使其表面可承受的张力（沿表面方向的拉力）。其大小用液体表面单位长度所受的拉力来表示，即表面张力系数（**coefficient of surface tension**） σ

(N/m)。随温度升高而减小。

水-空气：**0.073 N/m**

水银-空气：**0.48 N/m**

毛细现象（**capillarity**），测压管管径**>10mm**

1.3.5 汽化压强 (vapor pressure)

液体沸腾并和其气体处于平衡状态。其时的压强即为汽化压强。升温或减压均可实现汽化。液体压强大于汽化压强，只有表面的蒸发evaporation。液体压强小于汽化压强时，内部会产生气泡，当气泡运移到高压区时，会爆炸消失，产生大的破坏力。我们称之为**气蚀/空蚀 (cavitation)**。



叶型汽蚀