

359559

# 应用流体力学

郝中堂 周均长 编



浙江大学出版社

# 前 言

我们认为对土建和水利类某些专业，有必要在过去水力学的基础上，编写一本内容包括气体在内的简明应用流体力学，以适应不断变化着的人才市场需要，拓宽未来高等技术人才技术基础知识面。同时，教学改革要求单门课程教学时数有所压缩。本书编写之初，就是在这种背景下，几年前被提出来的。它的初稿和修改稿（工程流体力学讲义），曾先后在我校土木和水利几个专业试用过五年，包括学分分别为3~5的工业与民用建筑、城市建设、土建结构和水工结构等专业。实践结果表明，这种安排受到学生欢迎，效果是好的。

本教科书是基础性的。在内容上，以不可压缩流体为主，反映了道桥、给水排水工程和工民建等专业水力学课程教学基本要求；在应用方面，讨论了土建和水工建筑最常遇到的流体力学问题；计算方法，由数值方法取代传统的图解法，反映了当代电子计算机技术的应用。

鉴于流体力学教学实验，尤其是流动现象的可视化技术近几年有了创新和长足的发展（本室已获得了7项这方面的国家专利），以及不久我室将有相应的实验教材问世，本书对流动现象只给出了定义和扼要的说明，详细情形通过实验观察加深认识。

本书7~12章由周均长编写，其余由郝中堂编写。毛根海高级工程师对本书编写内容提出了不少宝贵意见，作者表示衷心感谢。

由于我们水平所限，书中错误和不足之处，恳请读者批评和指正。

编 者

1991年4月

于浙江大学建筑工程学院

水工结构与水环境研究室

# 目 录

<b>第一章 流体主要物理性质</b> .....	1
§ 1.1 流体及其模型化 .....	1
§ 1.2 密度、容重、比重和比容 .....	3
§ 1.3 压缩性 .....	5
§ 1.4 粘度 .....	7
§ 1.5 表面张力 .....	13
§ 1.6 液体汽化压强 .....	15
习题 1 .....	16
<b>第二章 流体静力学</b> .....	17
§ 2.1 作用于流体上的力 .....	17
§ 2.2 流体静压强特性 .....	18
§ 2.3 流体平衡微分方程 .....	20
§ 2.4 静止流体压强的分布 .....	22
§ 2.5 测压计 .....	28
§ 2.6 平面上的流体静压力 .....	31
§ 2.7 曲面上的流体静压力 .....	34
§ 2.8 浮力及浮潜体稳定 .....	37
习题 2 .....	41
<b>第三章 流体动力学基础</b> .....	46
§ 3.1 流体流动的基本概念 .....	46
§ 3.2 流体质点运动特点和有旋流 .....	54
§ 3.3 流体动力学基本方程式 .....	58
§ 3.4 欧拉运动微分方程的积分 .....	64
§ 3.5 恒定平面势流 .....	67
习题 3 .....	75

<b>第四章 恒定总流基本方程</b> .....	77
§ 4.1 总流分析法 .....	77
§ 4.2 连续性方程 .....	82
§ 4.3 恒定总流能量方程 .....	83
§ 4.4 恒定总流动量方程 .....	93
习题 4 .....	97
<b>第五章 相似原理与量纲分析</b> .....	102
§ 5.1 流动相似 .....	102
§ 5.2 相似准数 .....	104
§ 5.3 量纲分析 .....	107
习题 5 .....	113
<b>第六章 流动阻力及能量损失</b> .....	115
§ 6.1 流态判别 .....	115
§ 6.2 不可压缩流体恒定层流 .....	117
§ 6.3 紊流理论基础 .....	120
§ 6.4 恒定紊流能量损失 .....	129
§ 6.5 紊流扩散 .....	141
§ 6.6 边界层概念 .....	144
§ 6.7 潜体阻力 .....	148
习题 6 .....	151
<b>第七章 孔口及管嘴不可压缩流体恒定流</b> .....	154
§ 7.1 薄壁小孔口恒定出流 .....	155
§ 7.2 薄壁大孔口自由出流 .....	157
§ 7.3 管嘴出流 .....	159
习题 7 .....	160
<b>第八章 管道不可压缩流体恒定流</b> .....	162
§ 8.1 简单管道的水力计算 .....	162
§ 8.2 复杂管道的水力计算 .....	166
习题 8 .....	182

<b>第九章 明渠恒定流</b> .....	186
§ 9.1 明渠均匀流的基本公式 .....	187
§ 9.2 水力最优断面 .....	189
§ 9.3 明渠均匀流水力计算的基本问题 .....	190
§ 9.4 圆形无压管道均匀流的水力计算 .....	192
§ 9.5 明渠恒定非均匀流 .....	198
§ 9.6 明渠恒定非均匀渐变流基本方程 .....	203
§ 9.7 棱柱形明渠渐变流水面曲线的形状 .....	205
§ 9.8 明渠渐变流水面曲线计算 .....	211
§ 9.9 水跃 .....	221
§ 9.10 底流型衔接与消能 .....	226
习题 9 .....	235
<b>第十章 堰流</b> .....	238
§ 10.1 堰流的基本公式 .....	239
§ 10.2 薄壁堰 .....	241
§ 10.3 实用堰 .....	244
§ 10.4 宽顶堰 .....	250
§ 10.5 小桥孔径计算 .....	254
习题 10 .....	261
<b>第十一章 非恒定流问题</b> .....	263
§ 11.1 有压管道非恒定流的基本方程 .....	264
§ 11.2 有压管路中的水击 .....	267
§ 11.3 水击基本微分方程 .....	276
§ 11.4 明渠非恒定流 .....	281
习题 11 .....	291
<b>第十二章 渗流</b> .....	293
§ 12.1 渗流的基本定律 .....	297
§ 12.2 渗流的基本方程式 .....	301
§ 12.3 地下水明槽渐变流 .....	304
§ 12.4 井的渗流 .....	312

§ 12.5	均质土坝渗流 .....	319
§ 12.6	水电比拟法 .....	327
	习题 12 .....	333
<b>第十三章</b>	<b>可压缩流体恒定流</b> .....	<b>336</b>
§ 13.1	有关热力学基础知识 .....	336
§ 13.2	可压缩流基本方程 .....	338
§ 13.3	滞止压强 .....	340
§ 13.4	等截面管等温流 .....	343
§ 13.5	等截面管绝热流 .....	345
	习题 13 .....	347
	主要参考书 .....	348

## 第一章 流体主要物理性质

应用流体力学讨论液体和气体机械运动规律及其工程应用。如同固体力学，把固体作连续介质处理一样，流体力学也把流体当作连续介质研究，即采用连续介质模型。本章先讨论流体的一般抽象处理，即模型化，然后介绍流体主要物理性质。

### § 1.1 流体及其模型化

众所周知，物质三态（固、液、气）性质迥异，是由于它们的分子结构不同。固体分子间很紧密，分子引力是如此之大，以致很难改变其形状和体积。反之，气体分子间隙则大得多，其分子引力很小。因此，气体既易压缩，又易膨胀，仅当完全封闭时才会平衡。液体性质介于气、固之间。相对气体而言，液体分子引力大得多，几乎是不可压缩的。当所有外压力被消除时，液体分子仍可保持聚集状态，因此液体可以有一个自由面。液体和气体的共同性，是在任一微小剪力的作用下，它们都会发生连续的变形，即具有易流动性，故二者统称为流体。

在流体的处理方法上，流体力学与物理学有所不同。物理学中所有物质都被视为分子和原子的集合体。的确，流体（无论是液体或气体）的真实结构是由大量不断运动的分子所组成，由于分子间有间隙存在，故严格地说流体是不连续的。因此描述它的物理量（包括密度、流速、压强等）在空间的分布也是不连续的。如同已知流体分子运动具有随机性，因此任一空间点的物理量对于时间也不连续。然而在流体力学中，为研究流体的运动规律，无需研究分子运动，而把流体视为没有间隙的充满它所占据

的空间，即将其模型化为连续介质。这不仅是由于研究简化的需要，而且在实际流动问题中，人们经常关心的只是流体的宏观特性，以及流体分子间隙远小于实际流动的特征尺度（例，20℃水的分子间距仅为 $3 \times 10^{-6}$ cm左右）之故。如此模型化使流体所有物理量都可作为时空的连续函数。如流速在三维空间可表示为 $u = u(t, x, y, z)$ 等，这点很重要。

根据流体受压体积缩小的性质，流体可分为可压缩流体与不可压缩流体。这是流体模型化的另一种处理。严格地说，不存在完全不可压缩的流体，但对于那些密度随压强变化很小，以致可视流体的密度为常数（例一般情况下的液体），这时流体被称为不可压缩流体。对于气体，当所受压强变化相对较小时，例通风系统中的气流，当其压力变化如此之小，以致密度变化不显著，这里的气体也可作为不可压缩流体处理。但对于通过长管道高速流动的空气或水蒸汽，此时压降如此之大，以致密度的改变不能不计，则空气必须作为可压缩流体处理。

此外，如后所述，流体抵抗变形的性质，即粘性，是流体极为重要的一个性质。所有实际流体都是有粘性的，粘性使流动问题变得复杂化，为了简化有时引用“理想流体”的概念。理想流体是既无粘性，又完全不可压缩的一种假想流体。理想流体是有重要实际意义的。

### 思考题

- 1.1.1 何谓流体连续介质模型？该模型对于含气泡的液体是否适用？
- 1.1.2 从力学观点分析流体与固体主要区别何在？液体与固体区别何在？
- 1.1.3 气体在什么情况下可视为不可压缩流体？
- 1.1.4 理想流体与实际流体有何不同？



## § 1.2 密度、容重、比重和比容

单位体积流体的质量称为密度，单位体积流体的重量，称为容重。分别用 $\rho$ 和 $\gamma$ 表示。密度单位为公斤/米<sup>3</sup>，容重单位为牛顿/米<sup>3</sup>。

密度和容重有如下关系：

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad \text{或} \quad \gamma = \rho g \quad (1.1)$$

因物理方程量纲的齐次性，密度的单位有下列关系：

$$\rho \text{ 的单位} = \frac{\gamma \text{ 的单位}}{g \text{ 的单位}} = \frac{\text{N/m}^3}{\text{m/s}^2} = \frac{\text{Ns}^2}{\text{m}^4} = \text{kg/m}^3$$

### 液体的容重

表1.1中给出了20℃标准大气压， $g=9.8\text{m/s}^2$ 情况下的几种常见液体的容重。液体的容重随压强略微改变，取决于液体的体积模量（见§1.3）；液体的容重也同温度有关，其变化可以相当大。因容重 $\gamma = \rho g$ ，所以流体的容重除了随温度和压力变化外，还取决于当地的重力加速度，在正常的情况下，水的容重随温度增高而减小。含气、含盐及含悬浮质的水，其容重有所差异。海水容重通常假定为 $10.1\text{kN/m}^3$ ，除非另有规定或给定某一温度的

表1.1 常见液体的容重

液体名称	容重 $\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	备注
水银	132.9	1. 温度20℃； 2. 标准大气压， 即 $p = 101.3\text{kPa}$ 3. $g = 9.8\text{m/s}^2$ 。
淡水	9.8	
海水	10.1	
汽油	6.6	
润滑油	8.5	

含义外，本书采用水的容重值 $\gamma = 9.8 \text{ kN/m}^3$ ，在特殊条件下，水的容重完全不同。例如，温度为 $260^\circ\text{C}$ 和在 $42 \text{ MPa}$ 压力作用下水容重是 $8.0 \text{ kN/m}^3$ 。

应当指出密度是绝对的，因它决定于质量，而质量与位置无关；另一方面，容重不是绝对的，因它取决于重力加速度 $g$ ，而 $g$ 值随地理纬度及海拔高程而变化。

单位流体质量所具有的体积，称为比容，记以 $v$ ，即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.2)$$

单位为 $\text{米}^3/\text{公斤}$ 。它通常用于气体。

### 气体的比容

气体的比容或密度，与气体的工况或过程密切相关。具体由状态方程确定。

完全气体，即完全由弹性的、不占据体积，且相互之间没有作用力的分子所组成的假想气体，其状态方程是

$$pv = \frac{p}{\rho} = RT \quad (1.3)$$

式中， $p$ 为气体的绝对压强； $R$ 为气体常数，空气的 $R$ 值是 $287 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ； $T$ 为绝对温度（ $\text{K}$ ）。

虽然真正完全气体是不存在的，但对于空气和那些远离液相的实际气体，可近似作为完全气体加以研究，两者性质非常接近。

当气体进行等温变化（即等温过程）时， $T = \text{const}$ ，式（1.3）变成

$$pv = \text{const} \quad (1.4)$$

若气体变化不与外部交换热量，即绝热过程，则其状态变化可由下式表示

$$pv^n = \text{const} \quad (1.5)$$

式中,  $n$  为定压比热与定容比热之比, 对于干燥空气  $n = 1.4$ , 等温过程  $n = 1.0$ 。

### 液体的比重

液体密度与标准纯水的密度之比 (记以  $s$ ), 称为液体的比重。物理学中以  $4\text{ }^\circ\text{C}$  为标准 (此时水的密度是  $1.00\text{g/cm}^3$ ), 而在工程中通常以  $20\text{ }^\circ\text{C}$  的蒸馏水为标准 (此时水的密度为  $1000\text{kg/m}^3$ )。比重是无量纲数。

**例 1.1** 普通大气压和常温下水的容重  $\gamma_W = 9.8\text{kN/m}^3$ , 水银的比重  $s_m = 13.55$ , 求水的密度  $\rho_W$  和水银的容重  $\gamma_m$  及密度  $\rho_m$ 。

$$\rho_W = \frac{\gamma_W}{g} = \frac{9.8\text{kN/m}^3}{9.8\text{m/s}^2} = 1000\text{kg/m}^3 = 1.00\text{g/cm}^3$$

$$\gamma_m = s_m \cdot \gamma_W = 13.55 \times 9.8 = 133\text{kN/m}^3$$

$$\rho_m = s_m \rho_W = 13.55 \times 1000 = 13550\text{kg/m}^3$$

## § 1.3 压缩性

流体体积随其所受压力变化的性质, 称为压缩性。它用体积压缩系数度量。压强增大一个单位值时, 流体体积的相对减小值 ( $-dV/V$ ), 称为体积压缩系数, 记以  $\beta$ , 即

$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1.6)$$

因流体随压力增大, 体积缩小, 但质量未变, 即  $dm = 0$ , 故密度增大。其相对增量, 可由  $dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$  表示, 或

$$-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$$

代入式(1.6)得

$$\beta = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad (1.7)$$

$\beta$ 愈小愈不易压缩。

工程上常用  $\beta$  的倒数  $E_v$  表示流体的压缩性

$$E_v = \frac{1}{\beta} = - \frac{dp}{dV/V} \quad (1.8)$$

$E_v$  称为体积弹性模量，单位为 Pa，即与压应力单位相同， $\beta$  的单位为  $\text{m}^2/\text{N}$ 。

如前节所述，液体的压缩性与气体差别很大。

在一般工程问题中，相应于大气压强的弹性模量是一个重要的系数。

表 1.2 给出了水的几个体积弹性模量。应注意的是在某一压强下，液体有一最大  $E_v$  值，例如水在  $50^\circ\text{C}$  时的压缩性最小。

表 1.2 水的体积弹性模量  $E_v$  (MPa)

压 强 (MPa)	温 度 (°C)			
	0	20	49	93
0.1	2012.6	2205.6	2288.3	2122.9
10.3	2067.7	2274.5	2357.2	2198.7
31.0	2184.9	2398.6	2495.1	2329.6
103.4	2619.1	2825.9	2936.2	2791.4

低碳钢的体积弹模大约是  $170\,000\text{MPa}$ 。淡水体积弹模的代表值为  $2\,200\text{MPa}$ ，由此可见水的可压缩性大约是钢的 80 倍。不同液体的可压缩性范围很宽，例如水银的压缩性大约是水的 8%，而硝酸的压缩性比水大 6 倍左右。

表 1.2 表明，在一定温度与中等压强下水的体积弹模变化不很大，这样一来，作为近似，其弹模可用下式表示：

$$\frac{V_2 - V_1}{V_1} = - \frac{p_2 - p_1}{E_v}$$

$$\text{或 } \frac{\Delta V}{V_1} = - \frac{\Delta p}{E_v} \quad (1.9)$$

式中,  $E_v$  为压强变幅内体积弹模的平均值。取水  $E_v = 2210 \text{MPa}$ , 压强增量  $6.9 \text{MPa}$ , 由式 (1.9) 可知, 其体积仅比原来体积缩小  $1/320$ , 或  $0.3\%$ 。由此可见, 通常可把水视为不可压缩流体。

### 思考题

1.3.1 体积弹性模量与温度和压强有何关系?

1.3.2 在土木工程中一般取流体  $\gamma = \text{const}$ ,  $\rho = \text{const}$ , 合理吗? 为什么?

1.3.3 水的压强增加20个大气压, 其密度增大百分之几?

## § 1.4 粘 度

流体抵抗剪切变形的性质, 称为粘性, 其大小由粘度量度。从根本上说, 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。图1.1和图1.2表示了典型流体的粘度随温度变化的情况。由图可知, 随温度升高, 所有液体粘度都减小, 而气体粘度增大。这是由于液体分子间距比气体小得多, 而内聚力大得多。可认为内聚力是液体产生粘度的主要原因。因内聚力随温度升高而减小, 故液体粘度随之减小。另一方面, 气体具有很小的内聚力。气体对于切应力的阻抗, 主要是由气体分子动量传递的结果。快速层运动的分子传输到较慢的流层, 后者趋向加快。而任一慢层分子进入快层, 则使快层分子趋于减慢。分子交换引起两邻层间产生一个摩阻力。温度增高, 气体分子活性增强, 粘度随之增大。

现在讨论粘度定义。考虑两块平行板, 间隔  $Y$  (图1.3), 板面足

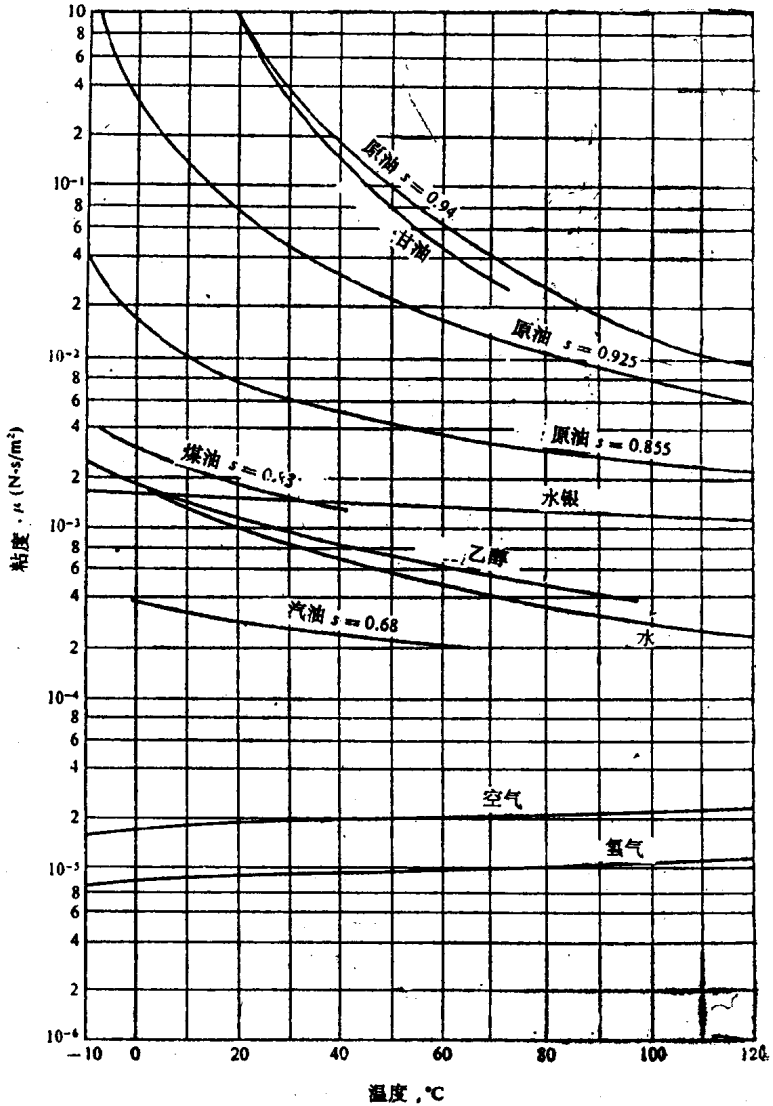


图1.1 流体的绝对粘度

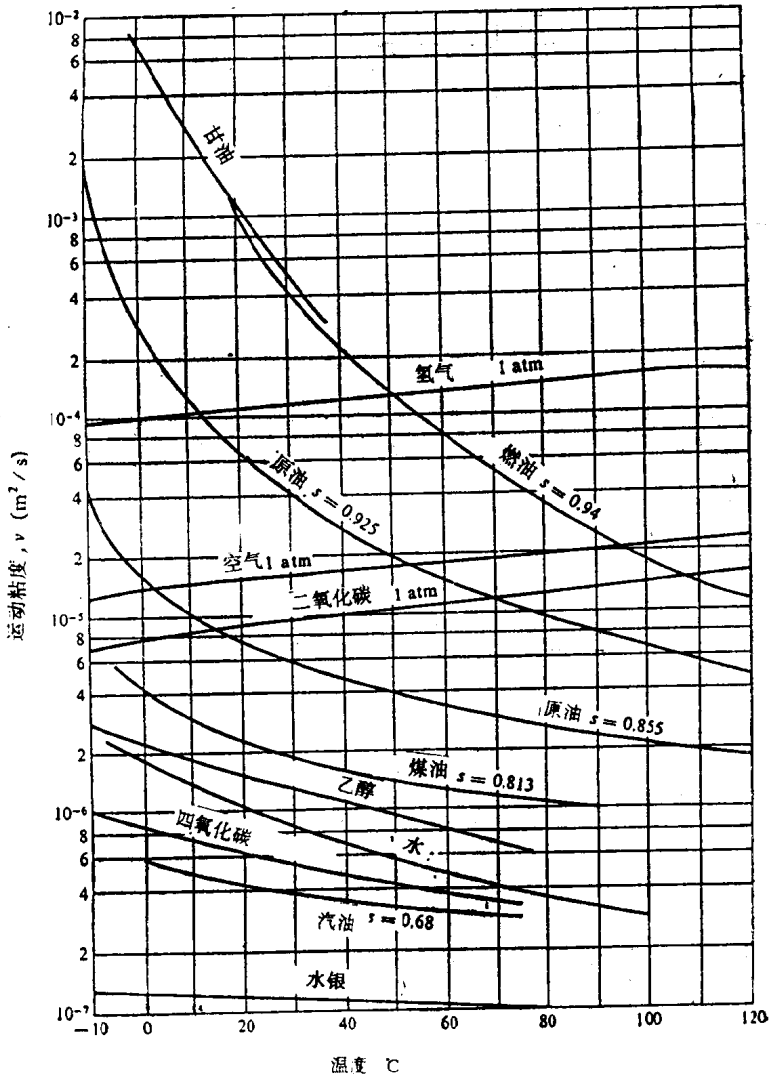


图1.2 流体运动粘度

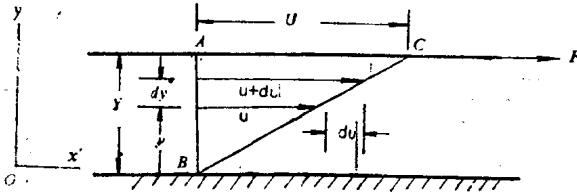


图1.3

够大，以致边缘条件可以不计，中间充满着流体。设下板固定，而上板在外力 $F$ 的作用下，作与下板平行移动，速度为 $U$ ，设动板面积为 $A$ 。

与板接触的流体质点将粘附于板上，若间距 $Y$ 不大，或速度 $U$ 不太高，则速度梯度将是直线变化。其作用好象流动是由一系列薄层组成，每一层相对其下层有一小的滑动。实验表明对于大多数流体有下列关系：

$$F \propto \frac{AU}{Y}$$

由速度分布相似三角形（图1.3）可知， $U/Y$ 可用 $du/dy$ 代替， $U/Y$ 或 $du/dy$ 是 $AB$ 线的角速度，或称流体的角变形率。若现在引用一个比例常数 $\mu$ ，则任意两薄层间流体的剪应力 $\tau$ ，可用下式表示

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{Y} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.10)$$

这被称为牛顿内摩擦定律。由此定义比例常数

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad (1.11)$$

常数 $\mu$ 称动力粘度，简称粘度。

式(1.10)表明，流体的切应力与角变形率成正比。这是流体区别于固体的一个极重要的特性。固体切应力是与角变形的大小成正比，与变形速率无关。同时可知在平衡流体( $du/dy =$



0) 或理想流体 ( $\mu = 0$ ) 中, 不产生切应力。流体可分为牛顿流体与非牛顿流体。粘度不随角变形率而变化的流体称为牛顿流体, 否则, 称为非牛顿流体。如图1.4中斜直线所示为牛顿流体, 该线斜率便由粘度决定。理想流体 (不具有粘性), 如水平轴所示。竖轴表示纯粹的弹性体。以后本书将只讨论牛顿流体。普通的空气和水都属于这种流体。

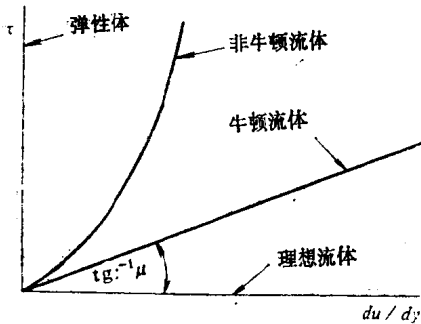


图1.4

粘度的量纲是单位面积上的力除以速度梯度, 其单位如下:

$$\mu \text{ 的单位} = \frac{\tau \text{ 的单位}}{du/dy \text{ 的单位}} = \frac{\text{N/m}^2}{\text{s}^{-1}} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

在粘性流体的许多问题中, 常出现粘度除以密度的值。该值被定义为运动粘度  $\nu$ , 如此称呼是因为它不含有力, 仅有长度和时间 (如同运动学那样) 的量纲。于是

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.12)$$

$\nu$  的单位是  $\text{m}^2/\text{s}$  (以前常用  $\text{cm}^2/\text{s}$ , 记为 St)。

一般实用范围内, 所有流体的绝对粘度与压强实际上无关。但随温度变化较大, 水与空气粘度变化如表1.3, 表1.4所列。因气体的密度随压强变化, 故其运动粘度随温度同步变化。