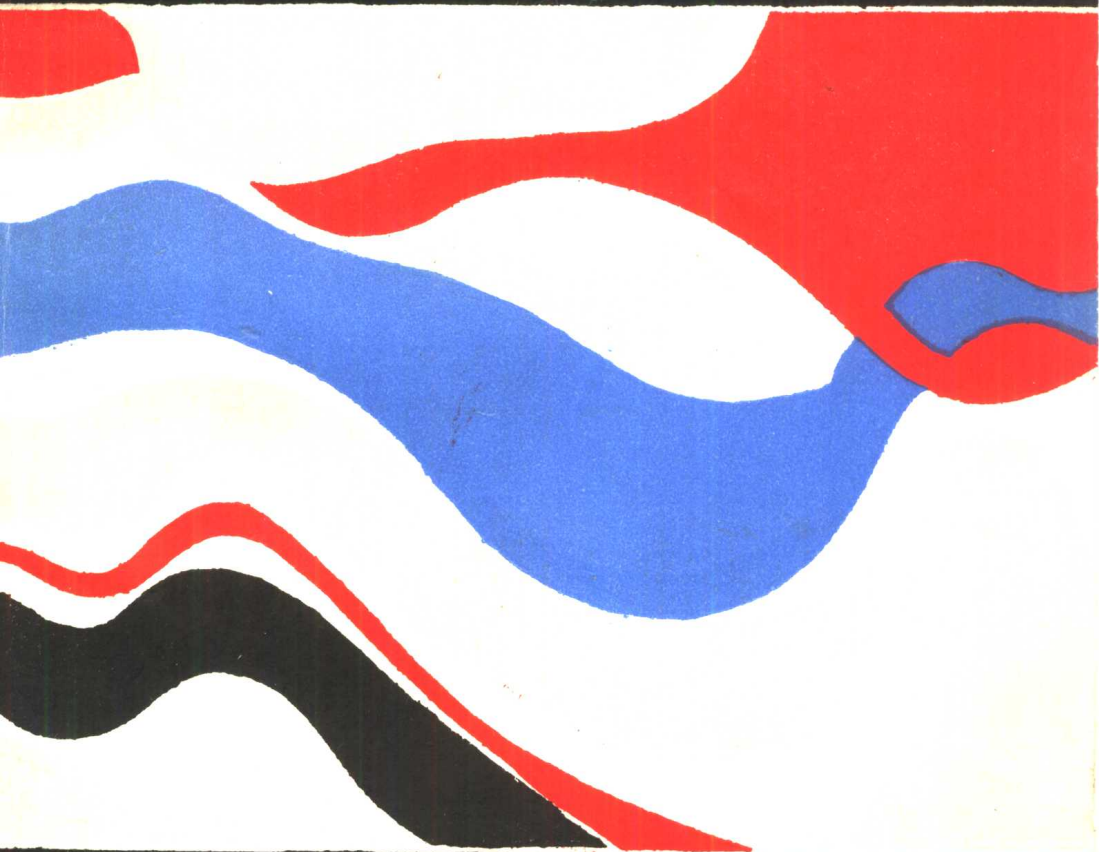


SHUILIXUE LILUN YU XITI

上海交通大学出版社

纪立智 主编

水力学理论与习题



水力学理论与习题

纪立智 主编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书是高等院校水利各类各专业水力学课程的教学参考书。全书共十三章，内容包括两大部分：一、通过每章前的小结方式阐述水力学基本原理和水力计算基本方法（列举108道例题）；二、为掌握和巩固所学的理论知识，加强计算技能的训练，围绕基本教学要求，选编363道习题（附奇数习题答案）。

本书是为各级各类水利院校学生和水利工程技术人员的书面辅导读物，也可作为教师讲授习题课的教材，或作为水力学习题集使用。

水力学理论与习题
上海交通大学出版社出版
(淮海中路1984弄19号)
新华书店上海发行所发行
浙江清江印刷厂排印

开本850×1168毫米¹/32印张12.5 字数321000

1987年5月第1版 1987年8月第1次印刷

印 数 1—5300

统一书号：15324.220 科技书目：143—219

定价：2.35元

前 言

这是一本水力学教学参考书。编写本书的目的是帮助在校学生和工程技术人员深入掌握水力学的基本概念并能解决计算技能方面存在的疑难问题。

全书共十三章。包含两部分内容：一、以小结的方式系统地简述水力学基本原理和水力计算基本方法，为读者梳理头绪纷繁的内容，排除学习上的难点和疑点，提供解题的技巧与方法（共列举108道例题）；二、围绕每章的基本要求选编363道习题（附奇数习题答案），为读者掌握和巩固所学理论知识、加强计算技能的训练和自我检查时选做。亦可供教师布置作业时选择。

本书是按高等院校水利类专业现行水力学教材的体系编排的，具有一定的参考价值和实用性。书中例题、习题大多为有代表性的水力学传统题目和硕士研究生入学试题，系精选于国内外教材、参考书和习题集，部分题目是笔者结合教学实践自编的。丰富多采的例题、习题有助于激发读者的学习兴趣。

考虑到读者都有水力学教材，或具备检索水力计算手册的能力，因此水力学教材中的水力计算图表，一概不编入本书，以节省篇幅。

本书由纪立智、王惠民（第十章）和潘少华（第十二章）编写，纪立智主编。编写过程中，得到学校各级领导和教研室全体同志的支持，书稿经河海大学张长高教授认真审阅。编者对给予本书以鼓励和支持的同志们，对给予本书以启迪和滋养的同行们，在此一并致以衷心的感谢！

限于编者水平，初版无疑地会存在不少缺点，诚恳地欢迎广大教师 and 读者批评指正。

编者

南京河海大学 1986年

书中计算单位所引用的符号

- mm——毫米。
cm——厘米。
m——米。
km——公里。
l——升, $1\text{l} = 10^3\text{cm}^3$
g——克。
kg——千克。
s——秒。
min——分。
h——小时。
d——昼夜。
N——牛顿。
kN——千牛顿。
pa——帕, $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。
bar——巴, $1\text{bar} = 10^5\text{Pa} = 10^2\text{kN}/\text{m}^2$ 。
at——工程大气压, $1\text{at} = 98.06\text{kN}/\text{m}^2 = 10\text{m}$ (水柱)。
J——焦耳, $1\text{J} = 1\text{N}\cdot\text{m}$ 。
W——瓦, $1\text{W} = 1\text{N}\cdot\text{m}/\text{s} = 1\text{J}/\text{s}$ 。
kW——千瓦, $1\text{kW} = 1\text{kN}\cdot\text{m}/\text{s} = 1000\text{W} = 1.36\text{HP}$ 。
HP——马力, $1\text{HP} = 0.735\text{kW}$ 。
rev/min——转/分, $1\text{rev}/\text{min} = \pi/30\text{rad}/\text{s}$ 。
rad/s——弧度/秒, $1\text{rad}/\text{s} = 30/\pi\text{rev}/\text{min}$
K——开, 热力学温度, 即绝对温度。

目 录

第一章 绪论

§ 1—1 液体的主要物理性质	1)
§ 1—2 作用于液体的力	9)
习 题	10)

第二章 水静力学

§ 2—1 水压力和水压强、液体平衡微分方程	13)
§ 2—2 重力作用下静止液体的压强	16)
§ 2—3 重力作用下静止液体的总压力	21)
§ 2—4 重力与惯性力共同作用下的静止液体	29)
§ 2—5 浮力及浮体的稳定性问题	37)
习 题	40)

第三章 水动力学基础

§ 3—1 恒定流连续性方程	57)
§ 3—2 恒定液流能量方程	59)
〔特例 I〕 两断面间有能量输入或输出的能量方程	66)
〔特例 II〕 相对运动能量方程	69)
§ 3—3 恒定液流动量方程	74)
§ 3—4 恒定液流动量矩方程	79)
习 题	86)

第四章 液流型态与水头损失

§ 4—1 雷诺数——液流型态的判别数	99)
§ 4—2 液体层流运动	101)
§ 4—3 液体紊流运动	108)
§ 4—4 局部水头损失	115)

习题	(118)
----	-------

第五章 管流

§ 5—1 长管路水力计算	(126)
§ 5—2 短管路水力计算	(134)
§ 5—3 管网水力计算	(137)
§ 5—4 管流测压管水头线的绘制	(141)
§ 5—5 有压管道中的水击	(143)
§ 5—6 调压系统的水体震荡	(150)
习题	(153)

第六章 小孔口和管嘴出流

§ 6—1 恒定水头下薄壁圆形完善收缩小孔口出流	(168)
§ 6—2 恒定水头下圆柱形外管嘴出流	(173)
§ 6—3 非恒定水头下的孔、嘴和短管出流	(177)
习题	(179)

第七章 明渠水流

§ 7—1 明渠恒定均匀流	(187)
§ 7—2 明渠恒定非均匀流	(192)
习题	(212)

第八章 堰流与闸孔出流

§ 8—1 堰流水力计算	(224)
§ 8—2 闸孔出流水力计算	(238)
习题	(243)

第九章 泄水建筑物下游的水流衔接与消能

§ 9—1 底流式衔接的水力计算	(249)
§ 9—2 底流式消能的水力计算	(252)
习题	(269)

第十章 液流三元分析法

§ 10—1 液体运动的一般分析	(273)
------------------	-------

§ 10—2	基本方程.....	(285)
§ 10—3	简单旋涡运动.....	(294)
§ 10—4	恒定平面势流.....	(297)
习题		(303)

第十一章 渗流

§ 11—1	恒定均匀渗流.....	(314)
§ 11—2	恒定无压非均匀渐变渗流.....	(316)
§ 11—3	水平不透水地基上均质土坝的渗流.....	(323)
§ 11—4	平面渗流水力计算的流网法.....	(327)
习题		(331)

第十二章 波浪理论基础

§ 12—1	微小振幅波.....	(340)
§ 12—2	有限振幅波.....	(352)
习题		(364)

第十三章 量纲分析和相似原理

§ 13—1	量纲分析.....	(367)
§ 13—2	相似原理.....	(373)
习题		(381)
奇数习题答案		(385)

绪 论

水力学的研究对象是液体。由于人类在生产上和生活中接触最多的液体是水，所以，一般以水作为研究液体的代表，故名水力学。水力学的基本原理与水力计算的一般方法，不仅适用于水，而且普遍适用于各种（牛顿）液体；对于可忽略压缩性影响的气体，也是适用的。

水力学的任务是研究液体由于外部原因（如重力、压力差、切力等的作用）而引起的宏观机械运动。根据水力学的研究任务，可以避开液体的真实的分子结构，而提出连续介质的基本假设，即认为质点是液体组成的最小单位，液体质点的一切力学特性随空间和时间的变化是连续变化的。理论和实践证明，按照连续介质假设研究液体运动所得出的结论，是足够精确的。因为，液体质点虽然包含了大量的液体分子，但是，液体体质点与整个液体以及它的运动几何尺度比较，是微不足道的。

§ 1-1 液体的主要物理性质

液体的运动状态与液体的物理性质密切相关，液体的主要物理性质是影响液体运动的重要因素。以下所涉及的都是宏观的表现。

一、液体的密度和容重

液体具有质量。液体的质量在体积内均匀分布的称为均质液体；否则，称为非均质液体。

液体单位体积内所具有的质量定义为密度，以 ρ 表示。液体单位体积内所具有的重量定义为容重，以 γ 表示。

对于均质液体，设其体积为 V ，体积 V 内的质量为 M ，重量

为 G ，则液体的密度

$$\rho = M/V \quad (\text{kg/m}^3), \quad (1-1)$$

液体的容重

$$\gamma = G/V \quad (\text{N/m}^3)。 \quad (1-2)$$

据牛顿第二运动定律

$$G = Mg \quad (\text{N}), \quad (1-3)$$

求得液体密度与容重之间的关系为

$$\gamma = \rho g。 \quad (1-4)$$

在水力计算中，一般认为液体是均质的，且液体体积不随温度、压强而变，则液体的密度和容重是常数。

水 $\rho_{\text{水}} = 1000 \text{kg/m}^3$, $\gamma_{\text{水}} = 9.806 \text{kN/m}^3$ (4℃);

水银 $\rho_{\text{汞}} = 13.6 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, $\gamma_{\text{汞}} = 133.4 \text{kN/m}^3$ (20℃);

空气 $\rho_{\text{气}} = 1.205 \text{kg/m}^3$, $\gamma_{\text{气}} = 11.82 \text{N/m}^3$ (20℃)。

上列数值均是在一个工程大气压(at)作用下的值。

密度是表征液体质量的指标。液体的密度愈大，表征液体的质量愈大，运动液体具有的惯性也就愈大，若欲改变其运动状态，则需施加较大的力。

液体的容重与液体的比重是两个完全不同的概念。液体的比重是指液体的重量与4℃时同体积的水重之比，它是个无量纲的纯数。液体的比重以 δ 表示，则

$$\delta = G/G_{\text{水}} = \gamma/\gamma_{\text{水}} = \rho/\rho_{\text{水}}。 \quad (1-5)$$

例1-1 体积 $V = 5.0 \text{m}^3$ 的液体重 $G = 3.92 \times 10^4 \text{N}$ ，求它的容重 γ 、密度 ρ 和比重 δ 。

解 据式(1-2)液体的容重

$$\gamma = G/V = 3.92 \times 10^4 / 5.0 = 7.84 \times 10^3 \text{N/m}^3,$$

据式(1-4)液体的密度

$$\rho = \gamma/g = 7.84 \times 10^3 / 9.806 = 800 \text{kg/m}^3,$$

据式(1-5)液体的比重

$$\delta = \gamma/\gamma_{\text{水}} = 7.84 \times 10^3 / 9.806 \times 10^3 = 0.8。$$

可见，液体的容重与比重是不同的。

二、体积压缩系数与温度膨胀系数

当温度不变时，压强变化所引起的液体体积的变化是以体积压缩系数 β_p 表示的。

$$\beta_p = -\frac{dV/V}{dp} \quad (\text{m}^2/\text{N})。 \quad (1-6a)$$

式中 V 为液体原体积， dV 为压强变化 dp 液体体积的改变量。

按质量一定的情况下体积与密度的关系，体积压缩系数也可表示为

$$\beta_p = \frac{d\rho/\rho}{dp}。 \quad (1-6b)$$

当压强不变时，温度变化所引起的液体体积的变化是以温度膨胀系数 β_t 表示的。

$$\beta_t = \frac{dV/V}{dt} \quad (1/^\circ\text{C})。 \quad (1-7)$$

式中 dV 为温度变化 dt 液体体积的改变量。

体积压缩系数 β_p 与温度膨胀系数 β_t 表征液体体积在压强与温度的改变下，可变性的程度。由于 β_p 与 β_t 的数值很微小，在水力学研究中可以忽略压缩性的液体称为不可压缩液体。

体积压缩系数 β_p 的倒数称为体积弹性系数，以 K 表示，即

$$K = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{dp}{dV/V} \quad (\text{N}/\text{m}^2)。 \quad (1-8)$$

显然， K 值愈大，液体愈不易压缩。 K 值随温度和压强的变化成正比，但是变化极微，在水力计算中可视为常数。

气体的体积随温度或压强的变化则非常明显。若容器内气体的质量不变，两个稳定状态之间的关系，由理想气体状态方程

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}， \quad (1-9)$$

可得

$$\left. \begin{aligned} \rho_2 &= \rho_1 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2}； \\ \gamma_2 &= \gamma_1 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2}。 \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

式中 V_1 、 ρ_1 、 γ_1 、 p_1 和 T_1 分别为气体状态变化前气体的体积、密度、容重、压强和热力学温度； V_2 、 ρ_2 、 γ_2 、 p_2 、和 T_2 、分别为气体状态变化后气体的体积、密度、容重、压强和热力学温度。

对于式(1-9)和式(1-10)，仅要求等式两边相同的物理量采用同一单位。两式中热力学温度 T 的单位为(K)，即摄氏温度应化为绝对温度

$$T = 273^\circ\text{C} + t. \quad (1-11)$$

式中 t 为气体温度，以摄氏($^\circ\text{C}$)计。

例1-2 输水管长 $l = 200\text{m}$ ，直径 $d = 400\text{mm}$ ，作水压试验。使管中压强达到55at后停止加压，经历1小时，管中压强降到50at。如不计管道变形，问在上述情况下，经管道漏缝流出的水量平均每秒是多少？水的体积压缩系数 $\beta_p = 4.83 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{N}$ 。

解 水经管道漏缝泄出后，管中压强下降，于是水体膨胀，按式(1-6)其膨胀的水体积

$$\begin{aligned} dV &= -\beta_p V dp = -4.83 \times 10^{-10} \left(\frac{\pi}{4} \times 0.4^2 \times 200 \right) (50 - 55) \\ &\times 9.806 \times 10^4 = 5.95 \times 10^{-3} \text{m}^3 = 5.95 \text{l}. \end{aligned}$$

水体的膨胀量5.95l即为经管道漏缝流出的水量，这是在1小时内流出的。设经管道漏缝平均每秒流出的水体积以 Q 表示，则

$$Q = \frac{5.95 \times 10^3}{3600} = 1.65 \text{cm}^3/\text{s}.$$

三、动力粘滞系数与运动粘滞系数

动力粘滞系数 μ 与运动粘滞系数 ν 是表征液体粘滞性强弱程度的一个指标。它们之间的关系是

$$\nu = \mu / \rho \quad (\text{m}^2/\text{s}). \quad (1-12)$$

μ 的单位是 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ，或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。 μ 与 ν 的数值愈大，表示液体的粘滞性愈强，液体愈不易变形。

一般，压强对粘滞性的影响甚微，可以忽略，而温度对粘滞的影响较巨。温度升高，液体的粘滞性降低，而气体的粘滞性升高。

粘滯性是液体固有的性质。但只有当液体内部两部分之间作相对运动时才会表现出来，表现在两部分之间的接触面上，以相互摩擦产生内摩擦力 T 的形式表现出来。摩擦生热，液流的机械能部分转化为热能而散逸于大气之中，所以运动液体的机械能总是沿程减少的。

内摩擦力 T 成对出现，作用在不同流层上，其方向永远沿接触面的切线方向，阻碍相对运动的发生，所以液流的内摩擦力为摩擦阻力，通称水流阻力，如图 1-1 (b) 所示。

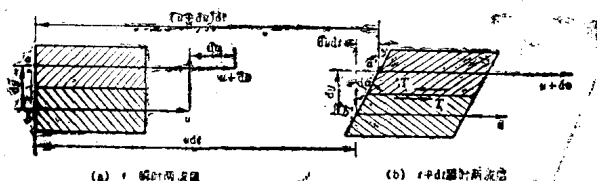


图1-1 液体的粘滯性与内摩擦力

牛顿提出液体流层间内摩擦力 T 的计算式

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (\text{N}). \quad (1-13)$$

式中 A 为两流层间接触面的面积； du/dy 为单位距离上的流速变化，称为流速梯度。

单位面积上的内摩擦力称为切应力，以 τ 表示，即

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{N/m}^2). \quad (1-14)$$

式(1-13)和式(1-14)是水力学中著名的牛顿内摩擦定律。它只适用于流层间液体质点不相互混杂的层流运动，对于液体质点相互混杂的紊流运动（见第四章）是不能直接应用的。

图 1-1 (b) 中， $d\alpha$ 为 dt 时段内的角变形，是切应力引起

的，故习惯上将 $d\alpha$ 称为切应变。 dt 为微分时段，可认为

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

那么
$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy} \quad / dt = \frac{du}{dy} \quad (1-15)$$

单位时间内的切应变 $d\alpha/dt$ 称为切应变率，或称切变形速度。式（1—15）表明：流速梯度实为切应变率。由此可得液体区别于固体的一个重要特性：液体的切应力服从牛顿内摩擦定律——切应力与切应变率成正比；固体的切应力服从虎克定律——切应力与切应变成正比。

凡是服从牛顿内摩擦定律的液体称为牛顿液体；否则，称为非牛顿液体。水力学限于研究牛顿液体。

理想液体是指没有粘滞性或粘滞性很小可以忽略的液体，即理想液体 $\mu=0$ 。那么，据式（1—13）知：理想液体运动不产生内摩擦力。

按牛顿液体与理想液体的定义，它们的切应力与流速梯度之间的关系为通过坐标原点的直线，直线斜率即液体的粘滞系数，如图1-2所示：

$$\mu = \operatorname{tg} \theta = \tau / \frac{du}{dy}.$$

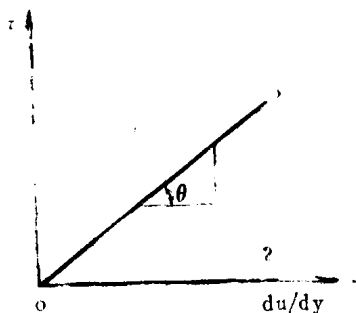
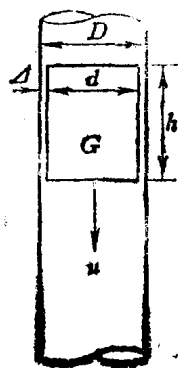


图1-2 $\tau \sim du/dy$ 关系
1—牛顿液体 2—理想液体



例1-3图 铅直圆管

例1-3 某圆柱体直径 $d = 119.6\text{mm}$ ，高 $h = 140\text{mm}$ ，自重 $G = 7.5\text{N}$ 。在内径 $D = 120\text{mm}$ 的铅直圆管中下滑。圆柱体与圆管间的隙缝 Δ 中注有润滑油，若均匀下滑的速度 $u = 35\text{mm/s}$ ，求该润滑油的动力粘滞系数值。

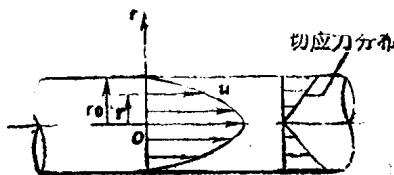
解 圆柱体自重 G 是圆柱体赖以下滑的力，主要用于克服隙缝中润滑油的粘滞阻力 T ，设 $G = T$ 。由于隙缝

$$\Delta = \frac{1}{2}(D - d) = \frac{1}{2}(120 - 119.6) = 0.2\text{mm},$$

甚小，油液的流速分布可视为直线分布，于是 $du/dy = u/\Delta$ 。按牛顿内摩擦定律得油液的动力粘滞系数

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{T}{A \frac{du}{dy}} = \frac{G}{(\pi d \times h)(u/\Delta)} \\ &= \frac{7.5}{(\pi \times 0.1196 \times 0.14)(0.035/0.0002)} \\ &= 0.815\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2.\end{aligned}$$

例1-4 管道半径 $r_0 = 25\text{mm}$ ，输送动力粘滞系数 $\mu = 0.02\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 的油。已知管中流速呈抛物线分布



例1-4图 输油管道

$$u = \frac{39.22}{\mu}(r_0^2 - r^2),$$

作层流运动。求 $r = 0, 0.010, 0.020, 0.025\text{m}$ 处的流速梯度及切应力的数值，并绘出切应力分布图。

$$\begin{aligned}\text{解 流速梯度 } \frac{du}{dr} &= \frac{d}{dr} \left[\frac{39.22}{\mu}(r_0^2 - r^2) \right] \\ &= \frac{d}{dr} \left[\frac{39.22}{0.02}(0.025^2 - r^2) \right] = -3922r \quad (\text{负号表}\end{aligned}$$

示 $dr > 0$ 时， $du < 0$)；

作层流运动的液体服从牛顿内摩擦定律, 其切应力 $\tau = -\mu \frac{du}{dr} = -0.02$

$(-3922r) = 78.44r$ (为使 τ 取正值, 故式中等号右端加负号)。

据上面两式算得不同点处的流速梯度和切应力列于下:

$$r = 0, \quad du/dr = 0, \quad \tau = 0;$$

$$r = 0.010\text{m}, \quad du/dr = -39.22\text{m/sm}, \quad \tau = 0.7844\text{N/m}^2;$$

$$r = 0.020\text{m}, \quad du/dr = -78.44\text{m/sm}, \quad \tau = 1.569\text{N/m}^2;$$

$$r = 0.025\text{m}, \quad du/dr = -98.95\text{m/sm}, \quad \tau = 1.961\text{N/m}^2;$$

切应力呈三角形分布, 绘于图中。

四、表面张力系数

液体表面(包括液体与气体、固体及它种液体相接触的表面)存在一种使液体表面积收缩为最小的力, 称为表面张力。表面张力只存在于液体的表面, 是一种局部受力现象。

在液体的表面上, 沿力图使表面积收缩为最小的方向, 其单位长度上所受的张力定义为表面张力系数, 以 σ 表示。表面张力系数 σ 值是表征液体表面张力大小的指标。表面张力由内聚力引起, 所以 σ 值与温度成反比。另一方面, 液体表面的曲率愈大, 表面张力愈大, σ 值也就愈大。水利工程中, 液体的自由表面足够大, 曲率很小, 液体的表面张力同作用于液体的其它一些力相比, 完全可以忽略不计。

实际工作中, 要消除因液体表面张力的作用发生毛细管现象所造成的误差。能湿润管壁的液体(如水)其误差是正的; 不能湿润管壁的液体(如水银), 其误差是负的。

如图 1-3 所示。

20℃时, 水在细玻璃

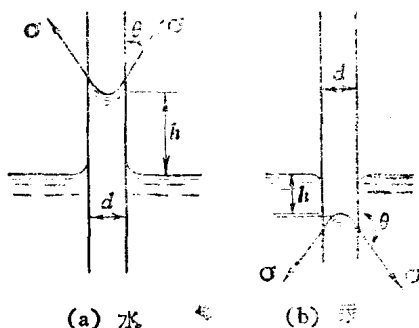


图1-3 毛细管现象

管中的上升高度

$$h = 29.8/d \quad (\text{mm}), \quad (1-16)$$

水银在细玻璃中的下降高度

$$h = 10.15/d \quad (\text{mm}). \quad (1-17)$$

式中 d 为细玻璃管的内径(mm)。

§ 1-2 作用于液体的力

一、质量力 指作用在每个液体质点上的力，其大小与液体质量成正比。质量力并不要求施力物体与受力液体相接触，是超距力。常见的质量力有重力和各种惯性力（达朗贝尔惯性力、牵连惯性力和哥里奥利斯惯性力）。是否受有惯性力，或受何种惯性力，则视所研究的问题系应用什么方法解决来确定。

对于均质液体，液体的形心与重心相重合，质量力作用在液体的形心上，诸质量力的合力 $\vec{F}$ 为空间任意方向。设质量力的合力 $\vec{F}$ 在三个坐标轴上的投影为 F_x 、 F_y 和 F_z ，若液体的质量为 M ，单位质量的质量力 $\vec{F}/M$ 在三个坐标轴上的投影为 X 、 Y 和 Z ，则有

$$\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j} + F_z \vec{k}, \quad \vec{F} = M(X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}),$$

得 $X = F_x/M$, $Y = F_y/M$, $Z = F_z/M$. (1-18)

单位质量力 X 、 Y 和 Z 实质上为液体的合加速度在三个坐标轴上的投影，单位为 m/s^2 。在水力学研究中，通常用单位质量力 X 、 Y 和 Z 表达液体静止和运动规律。

二、表面力 指作用在液体表面上的力，其大小与受力表面的面积成正比。表面力为接触力，即施力物体必须与受力液体相接触。受力液体的表面不外与液体、气体以及固体相接触，故表