

普通高等教育“十一五”国家级规划配套辅导教材

水力学学习指导 与习题解答

赵明登 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十一五”国家级规划配套辅导教材

水力学学习指导 与习题解答

赵明登 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为国家级精品课程水力学系列教材之一,内容包括水利水电类水力学各章节的学习指导、内容提要、例题分析解答、习题与答案,书中含有例题 165 个,思考题 221 个,作图题 36 个,计算题及证明题 173 个,共计 595 个题目,另外还有武汉大学近两年的水力学期末考试真题和研究生入学考试真题。

本书可供水利水电类、土木建筑类专业学生学习、复习与备考之用。

图书在版编目 (CIP) 数据

水力学学习指导与习题解答/赵明登编著. —北京:中国水利水电出版社, 2009

普通高等教育“十一五”国家级规划配套辅导教材

ISBN 978-7-5084-6343-8

I. 水… II. 赵… III. 水力学-高等学校-教学参考资料 IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 032677 号

书 名	普通高等教育“十一五”国家级规划配套辅导教材 水力学学习指导与习题解答
作 者	赵明登 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 15.5 印张 368 千字
版 次	2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书为国家级精品课程水力学系列教材之一，内容包括水利水电类水力学各章节的学习指导、内容提要、例题分析解答、习题与答案，可供水利水电类、土木建筑类专业学生学习、复习和备考之用。

学习指导部分根据教学大纲要求，介绍了各章节中哪些内容是需要重点掌握的，哪些内容是需要一般了解的，指导学生在学习中抓住重点，做到事半功倍。

内容提要部分简明扼要地列出了各章节的基本概念、基本公式、基本方程、基本理论和方法等。在某些方面给出了新的公式和计算方法，例如在明渠水面线计算中，给出了新的迭代公式和结构简单、思路清晰、使用方便的计算程序；在管网计算中，给出了便于书写和编程的级数形式的公式和方程。

例题分析解答部分对武汉大学水力学教材中的习题作了详细的分析解答，并增加了部分类题思考题，引导读者举一反三，掌握解题的方法和思路。

习题与答案部分给出了思考题、作图题和计算题三种类型的习题和简单解答。思考题可以增强学生对基本概念的理解，作图题、计算题可以提高学生分析问题和解决问题的综合能力。近两年的期末考试真题和研究生入学考试真题可以帮助学生了解考试范围、考题类型和难度，做好应试准备。

感谢武汉大学水力学国家级精品课程项目对本书出版的资助；感谢项目负责人李大美、槐文信教授对本书编写的大力支持；感谢童汉毅教授对本书内容的认真审阅和有益建言。

感谢槐文信、童汉毅、赵昕、张晓元、齐鄂容、杨小亭、扬中华、曾玉红等提供部分期末考试真题和研究生入学考试真题。

感谢在武汉大学水力学教研室工作过的所有教师，书中也凝结着他们的智慧和汗水。感谢兄弟院校的同仁，他们的成就对本书的编写有很大的启发和鞭策作用。

由于作者的水平和能力所限，书中难免出现错误或不妥之处，恳切希望读者提出宝贵意见，我们会尽力修正完善。

作者

2008年12月20日

于武汉大学

目 录

前言

第一章 绪论	1
一、学习指导	1
二、内容提要	1
三、例题分析解答	3
四、习题与答案	5
第二章 水静力学	7
一、学习指导	7
二、内容提要	7
三、例题分析解答	12
四、习题与答案	21
第三章 水动力学基础	30
一、学习指导	30
二、内容提要	30
三、例题分析解答	39
四、习题与答案	57
第四章 流动阻力与水头损失	75
一、学习指导	75
二、内容提要	75
三、例题分析解答	80
四、习题与答案	89
第五章 量纲分析与相似原理	97
一、学习指导	97
二、内容提要	97
三、例题分析解答	98
四、习题与答案	102
第六章 孔口出流、管嘴出流和有压管流	105
一、学习指导	105
二、内容提要	105

三、例题分析解答	109
四、习题与答案	120
第七章 明槽恒定流动	128
一、学习指导	128
二、内容提要	128
三、例题分析解答	140
四、习题与答案	152
第八章 堰流及闸孔出流	161
一、学习指导	161
二、内容提要	161
三、例题分析解答	166
四、习题与答案	174
第九章 泄水建筑物下游的水流衔接与消能	179
一、学习指导	179
二、内容提要	179
三、例题分析解答	181
四、习题与答案	185
第十章 有压管道和明槽中的非恒定流	188
一、学习指导	188
二、内容提要	188
三、例题分析解答	191
四、习题与答案	196
第十一章 渗流	199
一、学习指导	199
二、内容提要	199
三、例题分析解答	203
四、习题与答案	207
附录 武汉大学期末考试和研究生入学考试试题与答案	211
参考文献	241

第一章 绪 论

一、学习指导

水力学主要研究液体的受力平衡和机械运动规律及其在实际工程中的应用。液体的基本特性，特别是液体的受力特性是本章重点内容之一，它是液体平衡和运动的基础；液体的黏滞性也是本章重点内容，它是运动液体产生能量损失的根本原因。本章的难点是连续介质的概念，它是水力学研究对象的基本假设，要正确理解其意义。液体的黏滞性也是本章的难点，必须掌握黏滞性的概念、黏滞力的大小和黏性系数的变化规律。液体的其他力学性质及量度，如惯性、质量与重量、密度与重度、压缩性与膨胀性等，相对比较简单，易于理解和掌握。表面张力在水力学和水利工程计算中一般可以不予考虑，只是在实验室测量中有时需注意毛细现象的影响。

二、内容提要

1. 连续介质假定

液体都是由分子组成的，分子间有间隙，分子在不停地随机运动，因此，从微观角度讲，以分子作为研究对象，液体随着时间和空间都是不连续的。如果假定液体是由许多质点（微团）组成，这些质点之间没有间隙，也没有微观运动，连续分布在液体所占据的空间内，就可以认为液体是一种无间隙地充满所在空间的连续介质，从宏观来看，表征液体的所有物理量都可以看作是时间和空间的连续函数。

2. 水的受力特性

水（液体）可以承受压力、不能承受拉力。液体受到剪切力作用后，容易发生流动变形，因此，静止液体不能承受剪切力，液体运动时可以承受剪切力。

3. 惯性、质量和密度

(1) 惯性是物体具有保持原有运动或静止状态的物理性质，质量是惯性大小的量度，常用符号 m 表示，常用单位是克 (g)、千克 (kg) 等。

(2) 液体的密度是单位体积液体的质量，常用符号 ρ 表示，常用单位是克/米³ (g/m³)、千克/米³ (kg/m³) 等；水的密度随温度和压力变化，但这种变化很小，水力计算中常把水的密度视为常数， $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 。

4. 重力和重度

(1) 重力是物体受到地球引力作用的大小，常用符号 G 表示。重力的常用单位是牛顿 (N)、千牛 (kN) 等。

(2) 液体的重度是单位体积液体的重力，也称容重。常用符号 γ 表示，重度的常用单位是千牛/米³ (kN/m³) 等；水的重度也随温度变化，这种变化也很小，在水力计算中常



把水的重度视为常数, $\gamma = 9800 \text{ N/m}^3$ 。

(3) 液体的比重是液体的重度和水的重度之比, 常用符号 $S_{\text{液}}$ 表示。比重没有单位, 也没有量纲。例如, 水银的比重为

$$S_{\text{水银}} = \frac{\gamma_{\text{水银}}}{\gamma_{\text{水}}} = \frac{133230 \text{ N/m}^3}{9800 \text{ N/m}^3} = 13.6$$

(4) 重度和密度的关系为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-1)$$

5. 黏滞性

(1) 黏滞性是液体抵抗剪切变形(相对运动)的物理性质。当液体处在运动状态时, 若液体质点之间(或流层之间)存在相对运动, 则质点之间将产生一种内摩擦力来抗拒这种相对运动(图 1-1)。液体的这种物理性质, 称为黏滞性。它是运动液体产生能量损失的根本原因。

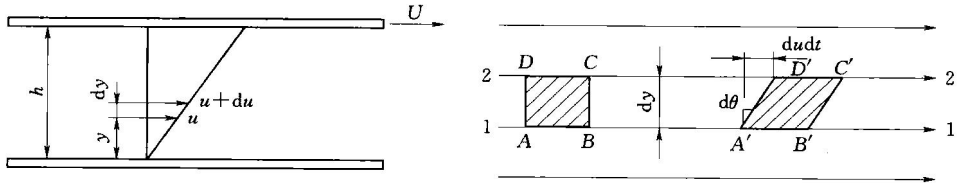


图 1-1

(2) 牛顿内摩擦定律。两层液体间的内摩擦力 F , 与接触面面积 A 成正比, 与液体相对运动的速度梯度 du/dy 成正比, 与液体的黏性大小有关。可以写成表达式

$$F = \mu A \frac{du}{dy} = \mu A \frac{d\theta}{dt} \quad (1-2)$$

或

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式中: τ 为单位面积上的内摩擦力; $\mu = \rho\nu$ 为反映液体黏滞性的动力黏性系数(动力黏度), μ 的常用单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ (牛顿·秒/米²) 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ν 为运动黏性系数(运动黏度), 常用单位为 m^2/s (米²/秒) 或 cm^2/s 。

(3) 黏性系数随压强变化较小, 一般可以忽略, 液体的黏性系数随温度的增大而减小, 气体的黏性系数随温度的增大而增大。水的运动黏性系数 ν 可用下列经验公式计算

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-4)$$

其中, t 为水温, 以 $^{\circ}\text{C}$ 计, ν 以 cm^2/s 计。

6. 压缩性

(1) 压强增大时, 分子间的距离减小, 宏观体积减小, 这种性质称为压缩性, 也称弹性。

(2) 液体的压缩性大小可用体积压缩系数 β 或体积弹性系数 $K = 1/\beta$ 来量度。体积压



缩系数是单位压强增量下体积的相对变化率，即

$$\beta = -\frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad (1-5)$$

式中： Δp 为压强增量； ΔV 为体积变化。

β 的常用单位为米²/牛顿 (m²/N)。 β 随温度和压强而变化，但变化不大。在一般水利工程设计计算中，可以忽略水的压缩性，相应地把水的密度和重度视为常数。但在研究管道水击问题时，则必须考虑水的压缩性。

7. 表面张力

(1) 表面张力是由于两种介质交界面两边分子引力不平衡而在交界面上产生的拉力。

(2) 表面张力的大小可用表面张力系数 σ 来量度。 σ 是液体表面单位长度所受的拉力，单位为牛顿/米 (N/m)。

(3) 水的表面张力很小，在水力计算中一般不考虑它的影响。在实验室使用细玻璃管作测压管时，应注意由于表面张力作用引起的毛细现象会影响测压管读数。

8. 作用在液体上的力

(1) 表面力作用在液体表面上，其大小与作用面面积成正比。与作用面正交的力称为压力；与作用面相切的力称为切力。单位面积上的表面力称为应力。

(2) 质量力作用在液体内每个质点上的力，其大小与液体的质量成正比。最常见的质量力有重力和惯性力等。单位质量水体所受的质量力称为单位质量力 ($f = F/m$)，单位质量力具有加速度的单位 (m/s²) 和量纲。

三、例题分析解答

【例 1-1】 20℃ 时水的重度为 $\gamma = 9.789 \text{ kN/m}^3$ ，动力黏度为 $\mu = 1.005 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ，求其运动黏度 ν 。20℃ 时空气的重度 $\gamma = 11.82 \text{ N/m}^3$ ，运动黏度 $\nu = 0.150 \text{ cm}^2/\text{s}$ ，求其动力黏度。

解：对于水

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{9789 \text{ N/m}^3}{9.8 \text{ m/s}^2} = 998.88 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1.005 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2}{998.88 \text{ kg/m}^3} = 1.006 \times 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

对于空气

$$\mu = \rho \nu = \frac{\gamma}{g} \nu = \frac{11.82 \times 0.15 \times 10^{-4}}{9.8} = 1.809 \times 10^{-5} \text{ (N} \cdot \text{s/m}^2\text{)}$$

(提示：注意单位换算)

【例 1-2】 如图 1-2 所示的黏度计，两筒间距 $\delta = 0.3 \text{ cm}$ ，内盛待测液体，悬挂着的内筒半径 $r = 20 \text{ cm}$ ，高度 $h = 40 \text{ cm}$ ，外筒以角速度 $\omega = 10 \text{ rad/s}$ 旋转，内圆筒不动，此时测得内筒所受力矩 $M = 4.905 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。试求该液体的动力黏度 μ 。(假设内筒与外筒之间液体速度呈线性变化，内筒底部与该液体的相互作用力可以忽略不计。)

解：作用在侧壁上黏性切力产生的力矩为

$$\begin{aligned}
 M &= Fr = A\mu \frac{du}{dy}r = 2\pi r^2 h\mu\omega \left(\frac{r}{\delta} + 1\right) \\
 &= 2 \times 3.14 \times 0.2^2 \times 0.4 \times \mu \times 10 \times \left(\frac{0.2}{0.003} + 1\right) = 68.0\mu
 \end{aligned}$$

所以

$$\mu = \frac{M}{68.0} = \frac{4.905}{68.0} = 0.072 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$$

类题思考：如果内筒和外筒均为圆锥形，则内筒所受力矩为多少？（ $\omega, h, r, \delta, \mu$ 不变）

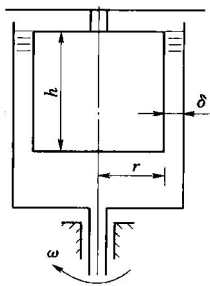


图 1-2

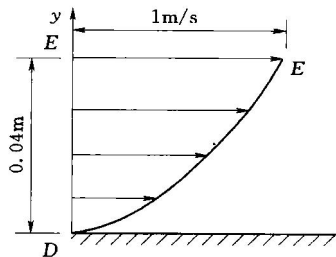
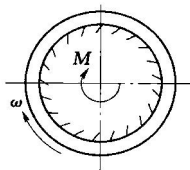


图 1-3

【例 1-3】 如图 1-3 所示水流在平板上运动，靠近板壁附近的流速呈抛物线形分布，E 点为抛物线端点，E 点处 $du/dy=1$ ，水的运动黏度 $\nu=1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，试求切应力沿断面的分布规律及 $y=0\text{cm}$ ， 2cm ， 4cm 处的切应力。

解：设流速分布 $u = Ay^2 + By + C$ ，利用给出的条件确定待定常数 A, B, C。

(1) 根据实际流体的无滑移现象，当 $y=0$ 时， $u=0$ ，因此 $C=0$ 。

(2) 当 $y=0.04\text{m}$ 时， $u=1\text{m/s}$ ，则有

$$1 = A \times 0.04^2 + B \times 0.04$$

(3) E 点有

$$\frac{du}{dy} = 2Ay + B = 1$$

联立上述方程求得： $A = -600$ ， $B = 49$ 。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \nu\rho(2Ay + B)$$

由此可见均匀流横断面上切应力沿断面是呈直线分布的。

当 $y=0$ 时，代入数据可得： $\tau=4.9 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ ；当 $y=0.02$ 时， $\tau=2.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ ；当 $y=0.04$ 时， $\tau=1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。

类题思考：如果靠近板壁附近的流速呈线性分布，切应力沿断面的分布规律如何。

【例 1-4】 已知活塞的直径 $d=0.14\text{m}$ ，长度 $l=0.16\text{m}$ 。活塞在汽缸内做往复运动，活塞与汽缸内壁的间隙 $\delta=0.4\text{mm}$ ，其间充满了 $\mu=0.1\text{Pa} \cdot \text{s}$ 的润滑油。活塞运动速度 $u=1.5\text{m/s}$ ，润滑油在间隙中的速度按线形分布，求活塞上所受到的摩擦阻力。

解：流速梯度 $\frac{du}{dy} = \frac{u}{\delta} = \frac{1.5}{0.4 \times 10^{-3}} = 3.75 \times 10^3 \text{ (1/s)}$

切应力 $\tau = \mu \frac{u}{\delta} = 0.1 \times 3.75 \times 10^3 = 3.75 \times 10^2 \text{ (Pa)}$



活塞所受的摩擦阻力

$$F = \tau A = \tau \pi d l = 3.75 \times 10^2 \times 3.14 \times 0.14 \times 0.16 = 26.38 \text{ N}$$

【例 1-5】 图 1-4 为一个底面积为 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 、质量为 5kg 的木块，沿着 5 : 12 的斜面向下以速度 $u = 0.25\text{m/s}$ 匀速运动。已知木块底面与斜面之间的油层厚度为 $\delta = 1\text{mm}$ ，润滑油的比重为 0.92，求油的动力黏度 μ 和运动黏度 ν 。

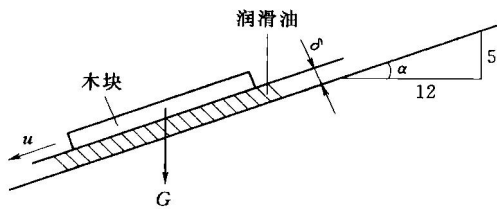


图 1-4

解：木块在运动方向上的重力分量与润滑油的摩擦力相平衡，即

$$mg \sin \alpha = \mu A \frac{du}{dy}$$

由于油层很薄，可以近似取润滑油中的速度为线性分布，即

$$\frac{du}{dy} = \frac{u}{\delta}$$

则

$$\mu = \frac{mg \sin \alpha \delta}{Au} = \frac{5 \times 9.8 \times 0.001 \times 5}{0.5^2 \times 0.25 \times \sqrt{12^2 + 5^2}} = 0.3015 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0.3015}{0.92 \times 1000} = 3.278 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/s)}$$

四、习题与答案

1. 概念题（判断、填空）

- 1-1 液体不能承受切力。 ()
- 1-2 液体的内摩擦力与正压力成正比，与作用面面积无关。 ()
- 1-3 速度越大，液体的内摩擦力越大。 ()
- 1-4 液体的黏性系数随温度的增加而____，气体的黏性系数随温度的____而增加。
- 1-5 单位质量力、运动黏度和动力黏度的常用单位分别为____、____、____。
- 1-6 水力学中连续介质的基本假定是_____。
- 1-7 已知二元明渠断面的流速分布为抛物线，如图 1-5 所示，则其切应力分布 $\tau - y$ 为_____分布，切应力最大值在_____处。

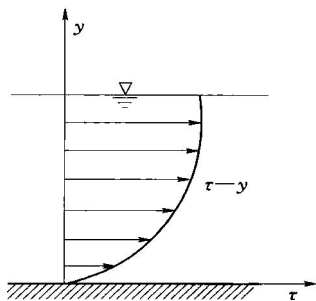


图 1-5

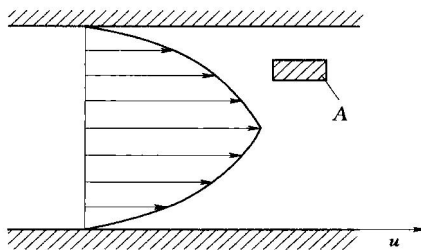


图 1-6



1-8 图 1-6 为管道过水断面水流流速分布图, 从其对应部位取出水体 A, 则水体顶部所受切应力的方向与流向_____, 底面所受切应力的方向与流向_____。

2. 计算题

1-9 已知 20°C 时海水的密度 $\rho = 1.03 \text{g/cm}^3$, 试求其比重和重度。

1-10 设水的体积弹性模量 $K = 2.19 \times 10^9 \text{Pa}$, 试问压强改变多少时, 其体积才可以相对压缩 1%?

1-11 如图 1-7 所示, 平板面积为 $40 \text{cm} \times 45 \text{cm}$, 厚度为 1.0cm , 质量 $m = 5 \text{kg}$, 沿着涂有厚度 $\delta = 1.0 \text{mm}$ 油的斜面向下做等速运动, 其速度 $u = 1.0 \text{m/s}$, 带动油层的运动速度呈直线分布, 求油的动力黏度 μ 和运动黏度 ν 。 ($\rho_{\text{油}} = 950 \text{kg/m}^3$)

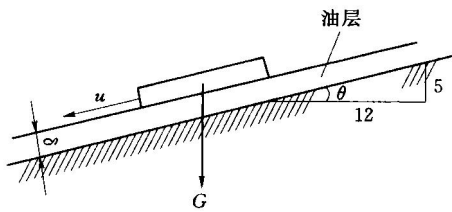


图 1-7

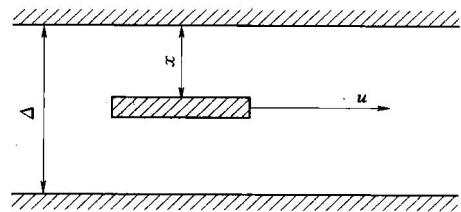


图 1-8

1-12 如图 1-8 所示, 两平行边界的缝隙 Δ 内充满动力黏度为 μ 的液体, 其中有一面积为 A 的极薄的平板在距上边界的距离 x 处以速度 u 平行移动。求平板所受的拖力 T (缝隙内的流速按直线分布), 平板在什么位置运动时所受的拖力最小。

1-13 如图 1-9 所示的盛水容器, 该容器以等角速度 ω 绕中心轴 (z 坐标轴) 旋转。试写出位于 $A(x, y, z)$ 处单位质量所受的质量力分量的表达式。

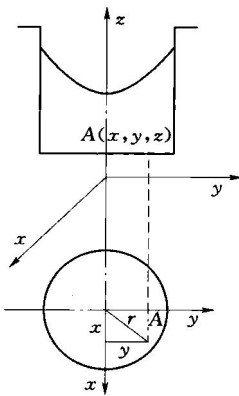


图 1-9

3. 答案

1-1 (错)。1-2 (错)。1-3 (错)。1-4 (减小、增加)。

1-5 (m/s^2 、 m^2/s 、 Ns/m^2)。

1-6 (略)。1-7 (线性、渠底 $y=0$)。1-8 (相反、相同)。

1-9 $\rho = 1030 \text{kg/m}^3$, 比重 $s = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} = 1.03$, 重度 $\gamma = \rho g = 10.094 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ 。

1-10 $dp = -K \frac{dv}{v} = -2.19 \times 10^9 \times (-1\%) = 2.19 \times 10^7 \text{ (Pa)}$ 。

1-11 $mg \sin \theta = \tau A, \tau = \mu \frac{du}{dy}, \mu = \frac{mg \sin \theta}{A \frac{u}{\delta}} = 0.1047 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$; $\nu = \frac{\mu}{\rho} = 1.102 \times 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)}$ 。

1-12 $\tau = \tau_{\text{上}} + \tau_{\text{下}} = \mu \frac{u}{x} + \mu \frac{u}{\Delta - x}, T = \tau A = \mu \left(\frac{u}{x} + \frac{u}{\Delta - x} \right) A$, 管中心: $\frac{dT}{dx} = 0, x = \Delta/2$ 。

1-13 离心力 $F = m \frac{u^2}{r} = m \omega^2 r$, 重力 $G = mg$, 单位质量力: $f_x = \omega^2 x, f_y = \omega^2 y,$

$f_z = -g$ 。

第二章 水 静 力 学

一、学习指导

水静力学是研究液体处于静止状态时的力学规律及其在实际工程中的应用。这一章是理论力学中的静力学理论和高等数学中的微积分方法相结合然后在静止液体中的应用。首先要理解“静止”是一个相对的概念，这里所谓“静止状态”是指液体质点之间不存在相对运动，因此，液体的黏滞性不起作用，没有黏性切应力。本章主要内容是研究静水压强和静水总压力。对于静水压强部分要掌握静水压强的特性、静水压强的变化规律、静水压强的测量和计算；静水总压力的计算实际上是理论力学的分布力求合力问题，重点是掌握平面上静水压强分布图的绘制和曲面上压力体图的分析绘制。本章的难点有：①复杂情况下，特别是出现负压时压力体图的绘制；②液体平衡微分方程的推导和应用条件。由于学时限制，对于几种质量力同时作用的液体平衡和浮体与潜体的稳定性适当了解即可。

二、内容提要

(一) 静水压强及其特性

1. 静水压强的特性

单位面积上的静水压力称为静水压强，通常用符号 p 表示，常用单位为 N/m^2 或 Pa 。静水压强具有两个重要的特性：

(1) 静水压强的方向与作用面的内法线方向重合，即垂直指向作用面（不能受拉，没有切力）。

(2) 静水压强的大小与其作用面的方位无关，即同一点处各方向上的静水压强大小相等。

2. 等压面及其特性

由压强相等的各点所组成的面称为等压面。在静止的或相对平衡的连通液体中，等压面的重要特性是：等压面即是等势面、等压面与质量力正交。

3. 量度压强的基准

(1) 绝对压强 p_{ab} 。以设想的没有气体存在的完全真空作为零点起算的压强称为绝对压强。

(2) 相对压强 p 。以当地大气压强作为零点起算的压强称为相对压强，也称计示压强或表压强。

(3) 真空及真空压强 p_v 。绝对压强值总是正的，而相对压强值则可正可负。当液体某处绝对压强小于当地大气压强时，该处相对压强为负值，称为负压，或者说该处存在着



真空。用绝对压强比当地大气压强小多少来表示。

真空压强、相对压强与绝对压强之间的关系为

$$p = p_{ab} - p_a \quad (p_a \text{ 为当地大气压强}) \quad (2-1)$$

$$p_v = p_a - p_{ab} = |p| \quad (p_{ab} < p_a) \quad (2-2)$$

(4) 汽化压强 p_{vp} 。当液体某处的绝对压强低于某一数值时，液体就会迅速蒸发、汽化，该处压强便不会再下降，此时液体的压强称为饱和蒸汽压强，或汽化压强。水的汽化压强随着温度增高而增高。

4. 量度压强的单位

压强的大小可以用应力单位、大气压强的倍数、液柱高等表示，相互换算关系见表 2-1，例如，一个工程大气压用水柱高可以表示为

$$h = \frac{p_a}{\gamma} = \frac{98000}{9800} = 10 \text{ (mH}_2\text{O)}$$

如用水银柱表示，则因水银的重度取为 $\gamma_H = 133230 \text{ N/m}^3$ ，故有

$$h = \frac{p_a}{\gamma_H} = \frac{98000}{133230} = 0.7356 \text{ (mmHg)}$$

表 2-1 压强单位换算表

用应力单位 表示	千牛/米 ² (kPa)	1	0.001	101.325	98.00	9.800	0.1332
	牛/米 ² (Pa)	1000	1	101325	98000	9800	133.23
用大气压 表示	标准大气压 (atm)	0.00987	9.87×10^{-6}	1	0.9672	0.09672	0.00131
	工程大气压 (at)	0.0102	1.02×10^{-5}	1.034	1	0.1	0.00136
用液柱高 表示	米水柱 (mH ₂ O)	0.102	1.02×10^{-4}	10.34	10	1	0.0136
	毫米汞柱 (mmHg)	7.50	0.0075	760.6	735.6	73.56	1

(二) 液体平衡微分方程式

1. 微分方程式

$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0, Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0, Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2-3)$$

或

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz) \quad (2-4)$$

液体平衡微分方程式表明了处于平衡状态的液体中表面力压强的变化率和单位质量力 (X, Y, Z) 之间的关系，哪个方向有质量力的作用，哪个方向就有压强的变化；哪个方向不存在质量力的作用，哪个方向就没有压强的变化。

2. 积分方程式

$$p = p_0 + \rho(W - W_0) \quad (2-5)$$

方程的适用条件是不可压缩均质液体， ρ 为常数，质量力是有势力， W 为力势函数。

(三) 重力作用下的静水压强

1. 基本方程式

在质量力只有重力的静止液体中，不可压缩均质液体 (ρ 为常数) 所满足的基本方程式为

$$z + \frac{p}{\gamma} = C \quad (2-6)$$



式中： C 为积分常数； z 代表某点到基准面的位置高度，称为位置水头（图2-1），它表示单位重量液体从某一基准面算起所具有的位置势能（简称单位位能）； $\frac{p}{\gamma}$ 代表该点到自由液面间的铅直距离，称为压强水头，它表示单位重量液体所具有的压强势能（简称单位压能）； $z + \frac{p}{\gamma}$ 称为测压管水头，表示单位重量液体所具有的势能。

因此，水静力学基本方程表明：静止液体内各点单位重量液体所具有的势能相等。对其中的任意两点1及2，式（2-6）可写成

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \quad (2-7)$$

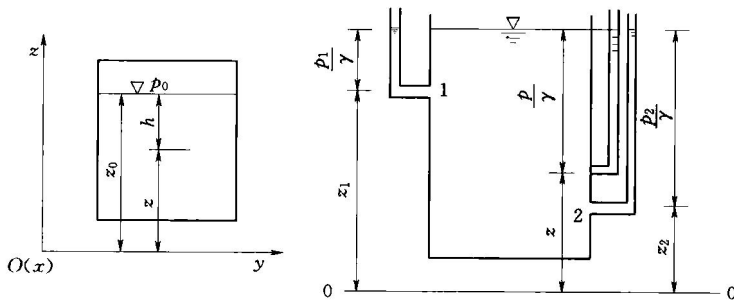


图 2-1

2. 计算公式

计算静水压强的基本公式为

$$p = p_0 + \gamma h \quad (2-8)$$

式中： $h = z_0 - z$ 表示该点在自由液面以下的淹没深度。

静止液体内任意一点的静水压强由两部分组成：一部分是表面压强 p_0 ，它遵从帕斯卡定律等值地传递到液体内部各点；另一部分是液重压强 γh ，也就是从该点到液体自由表面的单位面积上的液柱重量。

由式（2-8）可以看出，淹没深度相等的各点静水压强相等，因此，等水深面、水平面即为等压面，它与质量力（即重力）的方向垂直。如图2-2（a）所示的连通容器中过1、2、3、4各点的水平面即等压面。对于不连通或不不同的液体，如液体被阀门隔开，

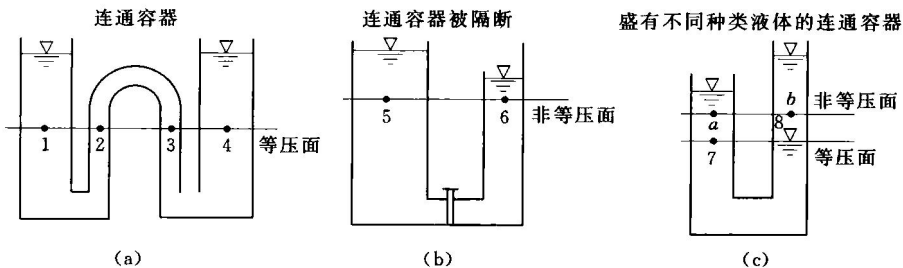


图 2-2



如图 2-2 (b) 所示, 或者一个水平面穿过两种及以上不同介质, 如图 2-2 (c) 所示, 则位于同一水平面上的各点压强并不一定相等, 水平面不一定是等压面。

3. 点压强的计算

压强的计算实际上是根据已知点压强计算未知点压强, 计算的基本公式为式 (2-8), 它表明在连通的静止液体中, 下面一点的压强等于上面一点的压强加上两点间的铅直距离乘以液体重度; 在气体中各点压强相同 (因为气体重度很小); 等压面上各点压强相等。实际计算中, 可以从已知点压强开始, 若向下经过重度为 γ , 高度为 h 的液体, 压强增加 γh ; 向上经过重度为 γ 、高度为 h 的液体, 压强减小 γh ; 若经过一段气体压强不变, 最后可以得出未知点压强的大小。例如, 对于图 2-3 中的测压装置, 已知 A 点相对压强为 $p_A = 0$, 从 A 点开始, 按照上述原则, 可得出 B 点的压强为

$$p_A + \gamma_H h_1 - \gamma h_2 + \gamma h_3 + \gamma h_4 = p_B \quad (2-9)$$

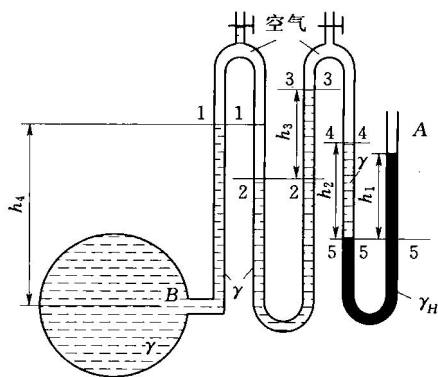


图 2-3

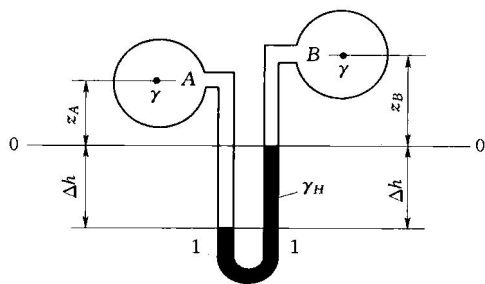


图 2-4

4. 压强的量测

量测压强的仪器一般分为液柱式测压计、金属测压计 (如压力表、真空表等)。金属测压计根据使用说明书, 可以直接读出压强数值, 要注意的是, 压力表一般给出的是相对压强, 真空表一般给出的是真空压强。液柱式测压计是利用水静力学原理而制作的, 测压管、比压计的测压实质上是压强的计算, 可以根据已知点的压强 (通常为大气压), 推导计算出待测点的压强。例如, 对图 2-4 所示的水银比压计, A、B 两点的压强关系、测管水头差分别为

$$p_A = p_B + \gamma z_B + \gamma_H \Delta h - \gamma \Delta h - \gamma z_A \quad (2-10)$$

$$\left(z_A + \frac{p_A}{\gamma}\right) - \left(z_B + \frac{p_B}{\gamma}\right) = \frac{\gamma_H - \gamma}{\gamma} \Delta h = 12.6 \Delta h \quad (2-11)$$

(四) 平面上的静水总压力

1. 静水压强分布图

静水压强分布图可以直观地用几何图形表示静水压强分布规律, 即以线段长度表示点压强的大小, 以箭头表示点压强的作用方向。