

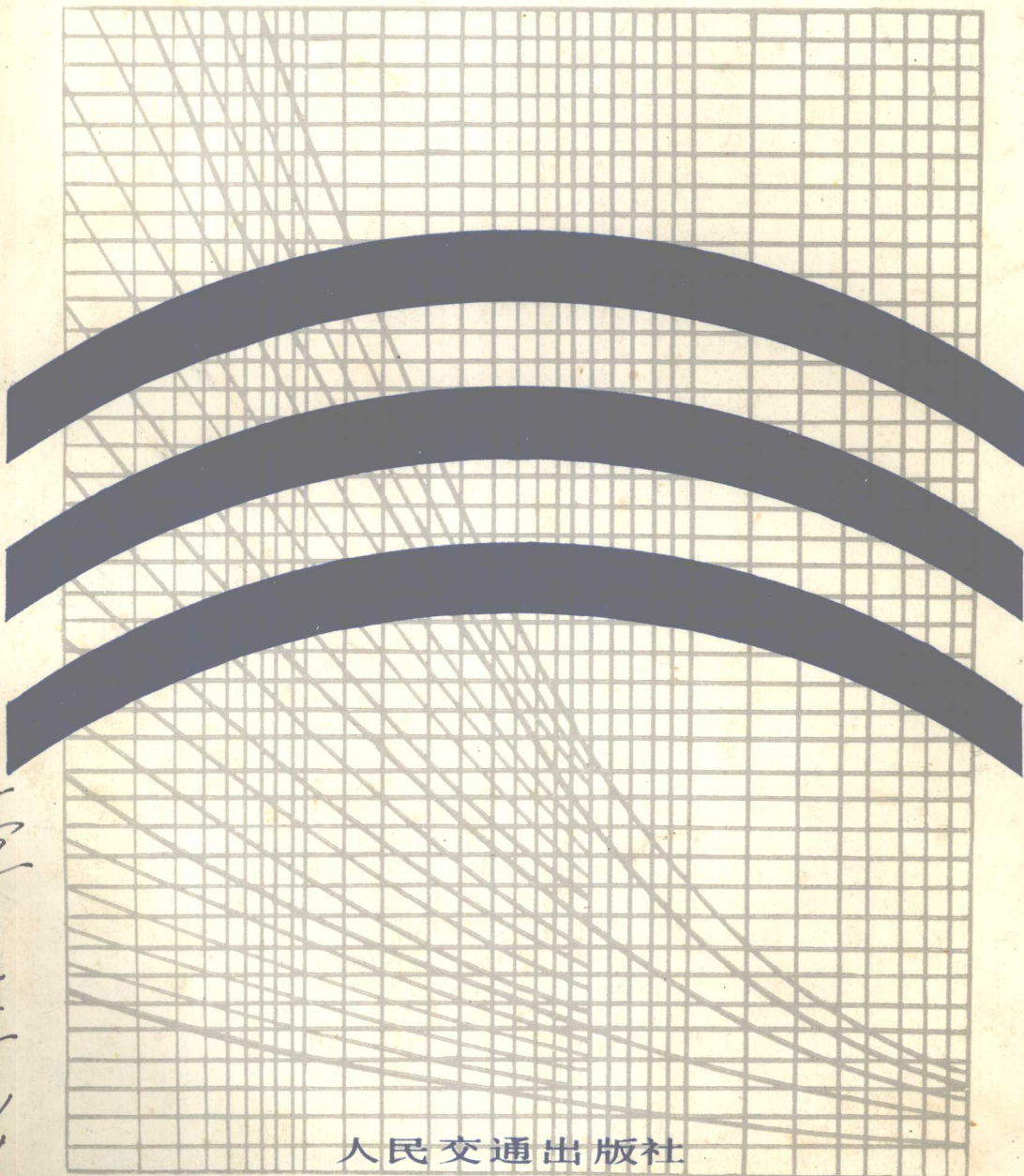
交通系统中等专业学校教材

桥涵水力水文

(公路与桥梁工程专业用)

980381

吴应辉 主编 邱天真 主审



人民交通出版社

赠送建工学院

1998年9月

李正光

81

3
1

交通系统中等专业学校教材

桥涵水力水文

Qiaohan Shuili Shuiwen

(公路与桥梁工程专业用)

吴 应 辉 主编
邱 天 真 主审

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

全书共分三篇：水力学基础、桥涵水文、桥位勘测设计与小桥涵孔径计算。主要叙述水静力学、水动力学基础知识，明渠均匀流、明渠非均匀流和山区过水建筑物的水力计算；河流概论、水文调查与形态勘测、水文统计的基础知识、大中桥设计流量推算、小桥涵水文勘测与设计流量推算；大中桥桥位勘测及孔径和桥面标高确定、桥下冲刷计算、河滩路堤标高和调治构造物、小桥涵孔径计算。并有复习思考题和习题。

本书可作为中等专业学校路桥专业教材，也可供有关专业工程技术人员参考。

交通系统中等专业学校教材

桥涵水力水文

(公路与桥梁工程专业用)

吴应辉 主编 邱天真 主审

人民交通出版社出版
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售
人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/16 印张：17.75 插页：2 字数：437千

1988年6月 第1版

1988年6月 第1版 第1次印刷

印数：0001—17,800册 定价：2.65元

前 言

本书是根据1983年12月交通系统中等专业学校公路与桥梁工程专业教学计划和教学大纲编写的。对于招收初中毕业生四年制或招收高中毕业生两年制中专均适用。学时数为70左右学时，第一、二篇及第十五章可作为必修课，第三篇除第十五章外可另安排40学时左右作为选修课。

参加本书编写的有广东交通学校邱天真（绪论）、云南交通学校但钧石（第一篇）、广西交通学校吴应辉（第二、三篇）。吴应辉主编全书，全书插图由广西交通学校梁雄描绘。本书在编写期间，曾收到四川交通学校等兄弟学校同志对编写提纲的很多重要建议，贵州交通学校张闰虎同志对初稿第二篇第五章第一节进行了仔细的审阅。在此，谨表衷心感谢。

全书由广东交通学校邱天真主审，交通中等专业学校土建类专业教材编委会路桥专业编审组编委方宗展复审，同意作为交通中等专业学校路桥专业教材出版。

由于编者水平所限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者提出宝贵意见，以便再版时修改。

目 录

绪论

第一节 本课程在公路设计中的目的与任务	1
第二节 液体的主要物理性质	1

第一篇 水力学基础

第一章 水静力学	5
第一节 静水压强及其分布规律	5
第二节 静水压强测量	13
第三节 静水总压力计算	15
复习思考题	21
习题	21
第二章 水动力学基础	24
第一节 概述	24
第二节 恒定流的连续性方程	30
第三节 恒定流的伯诺里方程	33
第四节 水流阻力与水头损失	42
第五节 伯诺里方程式的应用	53
复习思考题	61
习题	62
第三章 明渠均匀流	65
第一节 概述	65
第二节 明渠均匀流的水力特性和基本公式	68
第三节 明渠均匀流水力计算基本类型	76
第四节 管中均匀流	79
复习思考题	82
习题	83
第四章 明渠非均匀流	84
第一节 概述	84
第二节 断面比能 (E_s)	85
第三节 明渠非均匀流方程 (水深沿流程方向的变化)	92
第四节 明渠非均匀渐变流水面曲线的定性分析	94
第五节 水面曲线定量计算和绘制	99
第六节 水跌和水跃	103
第七节 水跃衔接的基本计算式	111

复习思考题.....	116
习题.....	117
第五章 山区过水建筑物的水力计算	119
第一节 概述.....	119
第二节 消力池、消力槛.....	120
第三节 跌水.....	126
第四节 急流槽.....	129
复习思考题.....	133
习题.....	133

第二篇 桥涵水文

第六章 河流概论	134
第一节 河川径流.....	134
第二节 泥沙运动.....	137
第三节 河流特性.....	139
复习思考题.....	140
第七章 水文调查与形态勘测	142
第一节 河床断面测量.....	142
第二节 形态调查.....	144
第三节 水文观测.....	148
第四节 水位与流量关系.....	155
复习思考题.....	156
习题.....	156
第八章 水文统计的基本知识	158
第一节 基本概念.....	158
第二节 经验频率曲线.....	159
第三节 统计参数.....	164
第四节 理论频率曲线.....	167
第五节 相关分析.....	174
复习思考题.....	178
习题.....	179
第九章 大中桥设计流量推算	180
第一节 设计流量概念及资料准备.....	180
第二节 有观测资料的设计流量推算.....	181
第三节 缺乏观测资料时设计流量的推算.....	193
第四节 桥位断面设计水位和其他水文要素计算.....	194
复习思考题.....	194
习题.....	196
第十章 小桥涵水文勘测与设计流量计算	196
第一节 按暴雨推算洪峰流量.....	197

第二节 形态调查法	206
第三节 直接类比法	212
第四节 各种计算流量方法的讨论	216
复习思考题	216

第三篇 桥位勘测设计与小桥涵孔径计算

第十一章 大中桥桥位勘测	217
第一节 桥位选择	217
第二节 桥位测量与调查概述	218
第十二章 大中桥桥孔和桥面标高	219
第一节 桥位河段水流图式和桥孔布置原则	220
第二节 桥孔长度计算	222
第三节 桥面中心最低标高	229
复习思考题	234
习题	235
第十三章 桥下冲刷计算	235
第一节 桥下一般冲刷	235
第二节 桥下局部冲刷	240
第三节 墩台基底最小埋置深度确定	248
复习思考题	252
习题	253
第十四章 河滩路堤标高及调治构造物	253
第一节 河滩路堤最低标高	253
第二节 调治构造物	254
复习思考题	258
第十五章 小桥涵孔径计算	258
第一节 小桥孔径计算	258
第二节 涵洞孔径计算	266
第三节 涵洞标准孔径选择	270
复习思考题	274
习题	274
主要参考书目	275

绪 论

第一节 本课程在公路设计中的目的与任务

公路上的桥涵，不仅是用来跨越河渠和承受车辆荷载的承重建筑物，同时又是在河渠上担负着渲泄洪水、排除水害、保护道路安全的泄水建筑物。因此，在公路桥涵设计中，除了按承受车辆荷载为主的承重建筑物进行结构设计外，还必须按泄水建筑物的要求进行总体设计。前者在《桥梁工程》课程中论述，后者则属本课程研讨的问题。

作为泄水建筑物来考虑公路桥涵总体设计时，桥涵的位置、孔径、基础埋置深度和桥面中心标高以及必要的导流、调治工程和山区过水建筑物等，都必须根据河床演变的发展趋势、洪水情势、设计洪水流量、设计洪水位和流速等水文资料，通过水力水文分析和计算才能确定。

综上所述，本课程的目的，是使同学们通过对水体的静止和运动规律的研究，以及对洪水流量、水位、流速等水文资料的观测、收集、整理、分析和计算等水力水文计算方法的学习，学会科学地为桥位设计和小桥涵孔径设计提供必要的资料和提出合理的设计数据的方法。

在河沟上建造桥涵时，除桥涵本身应具有安全渲泄设计洪水的能力外，还应保证桥涵上游不被洪水淹没，下游不被洪水冲毁并控制桥下冲刷深度，确保公路及其附近生活设施和农作物的安全。为此，必须对桥涵本身及其上下游进行一系列的水力计算。本书第一篇水力学基础，将研究水体平衡规律和水流运动规律，以及应用这些规律解决公路桥涵中水力计算的理论和方法问题。本书第二篇桥涵水文，将研究河川的水文现象和水文资料的观测、收集、整理、分析等方法，以及用数理统计知识研究水文资料的分布规律和公路桥涵中的水文计算问题。为桥涵水力计算提供设计洪水流量、水位、流速等重要数据。本书第三篇桥位勘测设计与小桥涵孔径计算，将介绍河流的泥沙运动、河床演变、河流特性和桥位选择的基本知识。研究桥涵孔径大小、桥下冲刷深度、基础埋置深度、波浪高度、桥面中心标高和路肩标高等计算方法，以及导流、调治构造物的布设等问题。

综上所述，本课程的任务，是研究水体平衡、水流运动和水文现象等规律，以及公路桥涵水力水文计算的基本理论和方法。探讨公路桥涵总体设计中有关桥涵位置、孔径、桥长、基础埋置深度、桥面中心标高、路肩标高的确定原则和计算方法，为公路桥涵总体设计提供科学依据和合理方案。

第二节 液体的主要物理性质

液体所呈现的静止和运动的各种不同形式，是由外部因素，例如几何的和动力的外部条件，通过液体本身的内在因素，首先是它的物理力学性质而起作用的结果。因此，在研究液体平衡和运动规律之前，须对液体的物理力学特性有所了解。液体的主要物理力学性质有惯

性、万有引力特性、易流动性、粘滞性、压缩性及表面张力等。兹分述如下：

一、惯性，质量与密度

任何物质都具有惯性，惯性就是物体具有反抗改变原有运动状态的特性。质量愈大的物体其惯性也愈大。因此，质量是惯性的度量。液体和其它物质一样也具有度量惯性大小的质量。单位体积液体的质量称为液体的密度，常用符号 ρ 表示。设均质液体的质量为 m ，体积为 V ，则有：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (0-1)$$

严格地说，液体的密度随液体的温度及其所受压力的变化而有微小的变化，但实用上一般可看作常数。对于水，常以一个大气压强下温度为 4°C 时的密度 $\rho = 1\text{ g/cm}^3 = 1000\text{ kg/m}^3$ 作为计算值。

二、万有引力特性，重力与容重

万有引力特性是指任何物体互相之间具有吸引力的性质，其吸引力被称为万有引力。地球对地球上的物体的吸引力称为物体的重力或重量。在研究液体所受的作用力时，重力常是一个很重要的方面。一质量为 m 的液体，其所受的重力 G 的大小为：

$$G = mg \quad (0-2)$$

式中： g ——重力加速度（ 9.8 m/s^2 ）。

单位体积液体的重力被称为液体的容重，用 γ 表示。对均质液体，若其重量为 G ，体积为 V ，则有：

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (0-3)$$

将式（0-2）代入式（0-3）得：

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (0-4)$$

或

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (0-5)$$

液体的容重和密度一样随液体温度和压力的变化而有微小的变化，实用上亦看作常数。对于水，常以一个大气压强下温度为 4°C 时的容重 $\gamma = 9800\text{ N/m}^3$ 作为计算值。

三、易流动性

从力学概念上说，液体的易流动性是由于液体分子之间的距离较大（水分子间距离约为 $3.07 \times 10^{-8}\text{ cm}$ ），分子之间的引力（表现为内聚力）很小，分子可以结群游动，不能维持一定的形状，所以液体比较容易移动，几乎没有抵抗拉伸或剪切变形的能力，一旦受到（哪怕是微小的）拉力或剪力，就会发生很大的变形——流动。例如河道坡降虽小，河流却日夜川流不息；又如静止液体不可能维持倾斜的自由表面等，都是液体易流动性的例证。

四、粘滞性与粘滞系数

液体的易流动性说明液体在静止状态下不能承受剪切作用。但当液体内部各部分发生相对运动时，相对运动的液层间便出现成对的切力（亦称内摩擦力），并阻碍着液体内部的相对运动（即变形）。就是说，液体具有在运动状态下抵抗剪切变形的能力。这就是液体的粘滞性或简称粘性。

当水流在重力作用下沿渠道流动时，测得水流横断面某垂线上各点流速 u 的分布如图0-1a)所示。从垂线上各点流速分布不均匀现象可知各水层间发生了相对运动，因而相邻水层接触面之间就出现了内摩擦力 T 。试验表明，液体质点在互不混杂的分层流动时，液体内部摩擦力 T 与层流间接触面面积 ω 和流速梯度 $\frac{du}{dn}$ （沿

n 轴方向单位距离的流速变化值）成正比，并与液体的粘滞性有关，而与接触面上的压力无关。这一结论称为牛顿（Newton）内摩擦定律，其表达式为：

$$T = \mu \omega \frac{du}{dn} \quad (0-6)$$

液体单位面积上的内摩擦力称为液体切应力，以 τ 表示，则有：

$$\tau = \mu \frac{du}{dn} \quad (0-7)$$

以上两式中的 μ 为反映液体粘滞性大小的系数，因其量纲中含有力的量纲，故称为动力粘滞系数。其单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

水力学中常用的是 μ 与密度 ρ 的比值，以 γ 表示，即

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} \quad (0-8)$$

γ 亦反映液体粘滞性的大小，因其量纲中仅含有运动量的量纲，故称为运动粘滞系数，其单位为 m^2/s 。

液体的 μ 和 γ 值与液体的种类和温度有关，例如加热后的柏油较易流动，其原因是液体的粘滞性主要由分子吸引力所引起，当温度升高时，液体分子间距离增大，分子吸引力减小，故粘滞性相应减小。

液体在流动过程中内摩擦力做功而不断消耗液流的机械能，这种液流机械能的消耗称为液流能量损失。因此粘滞性是引起液流能量损失的主要根源。液流能量损失是水力学中的一个重要问题，它和每一个水动力学问题都有密切关系，这个问题将在第二章中详细论述。

在分析水力学问题时，为了简化起见，有时不考虑液体粘滞性的影响。这种假想的无粘滞性的液体称为理想液体，而具有粘滞性的液体则称为实际液体。

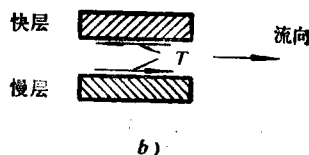
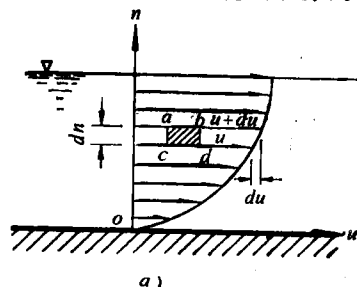


图 0-1

五、压缩性及压缩系数

液体的体积随所受压力的增大而减小的特性称为液体的压缩性。

液体压缩性的大小可用体积压缩系数 β 来表示。设液体原体积为 V ，当所受压强（单位

面积上的压力)的增值为 $d p$ 时, 体积压缩值为 $d V$, 则体积压缩系数为:

$$\beta = - \frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (0-9)$$

β 的物理意义是压强增值一个单位时的体积相对压缩值。 β 值愈大, 表示愈易压缩。因液体体积总是随压强增大而减小, 即 dV 为负值。为使 β 值为正, 故上式右端取负号。 β 的单位为 m^2/N 。

β 的倒数称为体积弹性系数, 用 K 表示, 即

$$K = - \frac{dp}{\frac{dV}{V}} \quad (0-10)$$

K 值愈大, 表示愈难压缩。 K 值的单位为 N/m^2 。

液体种类不同, 压缩性也不同。同一种液体的压缩性也随温度和压强而变化, 但变化甚微。例如在普通水温和压强在500个工程大气压强内, 水的平均 K 值约为 $2.06 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$, β 的平均值约为 $0.485 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{N}$, 即每增加一个工程大气压强, 水的体积只比原体积缩小约二万分之一。可见液体的压缩性是很小的。在实用中, 一般认为液体是不可压缩的, 即认为液体的体积和密度不随压力而变化。但对某些特殊水力学问题, 例如在解决压强变化非常迅速的管道非恒定流问题(管道水流的水击问题)时, 就必须考虑液体的压缩性, 否则将导致错误的结果。

六、表面张力和毛细管现象

在液体与气体相接触的自由面上, 由于两侧分子引力的不平衡, 该面上的液体分子受引力的作用而被拉向液体内部, 使液体表面有拉紧收缩的趋势。这种存在于液体表面的拉力称为液体的表面张力。表面张力仅存在于液体的自由面, 它是一种局部受力现象。由于表面张力很小, 仅在液体表面形成曲率极大的曲面时, 表面张力才产生极大的影响。一般说来它对液体的宏观运动不起作用, 可以忽略不计。但在实验室中设置测压管时就会发现用一根细玻璃管插入静水中的水面将高于静水面, 这便是受了表面张力的影响而引起的毛细管现象。为了避免因毛细管作用而引起测量的误差, 测压管内径不宜过小。

第一篇 水力学基础

第一章 水静力学

水静力学的任务是研究液体静止或相对静止状态下的力学规律及其在工程实际中的应用。所谓静止或相对静止是指液体质点之间以及液体与固体壁面之间没有相对运动。

从实用观点来看,研究水静力学的一个重要目的,就是要确定静止液体对边界的作用力。许多建筑物(如坝、闸门、桥梁墩台)的表面都是受液体作用的边界,要进行这些建筑物的设计,计算作用于这些边界上的水压力是必不可少的。为了计算作用于某一边界上的静水压力,首先要知道该边界上的静水压强分布规律。所以水静力学的关键问题是根据平衡条件来求解静止水体中的压强分布。

液体在静止状态下,无内摩擦力出现。因此,在研究水静力学问题时,理想液体和实际液体都是一样的,均可以应用严格的数学分析方法。

第一节 静水压强及其分布规律

一、静水压力及静水压强的定义

人们在实践中易知:木桶没上好箍,盛水就会散开;没有钉结实的桶底,盛水后就会脱掉;游泳时水淹过胸部,人就会感到胸部受压;把一根管子从水箱侧壁水平地伸入水的内部,用手堵住管子另一端,也会感到手心受压。通过这些现象,人们形成一个概念:处于静止状态的液体,不仅对与之相接触的固体边界(侧壁和底面)作用有压力,就是液体自身内部,一部分液体对相邻另一部分液体也作用有压力。静止液体对与之相邻的接触面(受压面)所作用的全部压力称为静水总压力或简称静水压力。静水压力 and 任何力一样,有大小、方向、作用点三个要素。

静止液体作用在受压面的单位面积上的静水压力称为静水压强。设作用于面积 ω 上的静水总压力为 P ,则静水压强 $\bar{p}$ 的数学表达式为:

$$\bar{p} = \frac{P}{\omega} \quad (1-1)$$

显然,式中 $\bar{p}$ 表示的是某受压面单位面积上的平均值即平均静水压强。因此,它只有在均匀受力情况下,才真实地反映了受压面各处的受压状况。对于实际工程中常遇到的非均匀受压面它就不能代表受压面上各处的受力状况,因而还必须建立点静水压强的概念。

在静止液体中,任取一点 A ,围绕 A 点取一微小面积 $\Delta\omega$,作用在该面积上的静水压力为 ΔP ,如图1-1所示。面积 $\Delta\omega$ 上的平均压强为:

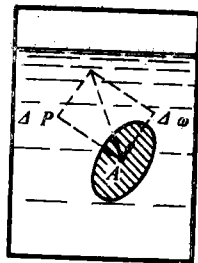


图 1-1

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta \omega}$$

如将面积 $\Delta \omega$ 围绕A点无限缩小, 当 $\Delta \omega$ 趋近于零时, 比值 $\frac{\Delta P}{\Delta \omega}$ 的极限称为A点的静水压强, 即

$$p_A = \lim_{\Delta \omega \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta \omega} \quad (1-2)$$

静水总压力和静水压强都可表征静水产生的压力, 但它们是两个不同的概念, 因此它们的单位也是各不相同的, 常用的静水总压力的单位为N或kN, 静水压强的单位为Pa或kPa。其中 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。

二、静水压强的特性

静水压强具有两个极其重要的特性:

- 1) 静水压强的方向必然是垂直于作用面, 并指向作用面的内部。
- 2) 静止液体中任一点处各方向的静水压强大小均相等。即静水压强的大小与其作用面的方向无关。

下面分别论证静水压强这两个极其重要的特性。

第一特性的证明比较容易。如图 1-1 所示, 如果静水压力 ΔP 不垂直作用于面积 $\Delta \omega$, 则可将 ΔP 分解为两个分力, 一个力垂直于作用面, 另一个力与作用面平行, 这个与作用面平行的力即为切力。由于静止液体不能承受切力, 所以平行于作用面的切力应等于零, 即静水压强应垂直于作用面。如果垂直分力的方向是向外的, 那么这个垂直分力即为拉力。因液体不能承受拉力, 所以静水压强不仅垂直于作用面, 而且其方向是指向作用面的。

第二个特征可简单地用单元体的平衡条件从理论上来说明它。

如图 1-2 所示, 用一水平截面与一铅垂截面和一斜截面切割出一单元分离体, 用 dx 表示这分离体顶面水平宽度, α 表示斜面 and 铅垂面夹角, p_y 表示水平面的铅垂水压压强, p_x 表示铅垂面上的水压压强, p_n 表示斜切面上的水压压强。单元体的厚度(垂直于图面方向)按 1 计。这样, 单元体在水平面上所受的铅垂压力是 $p_y \cdot dx$, 铅垂面的长度是 $dx/\tan \alpha$, 斜截面的长度是 $dx/\sin \alpha$, 面积与长度相同, 则铅垂面所受的垂直于它的压力是 $p_x \cdot dx/\tan \alpha$, 斜截面所受的垂直于它的压力是 $p_n \cdot dx/\sin \alpha$, 因为单元体尺寸小, 其自重可略去不计。按照平衡条件有 $\sum F_x = 0$ 与 $\sum F_y = 0$, 即

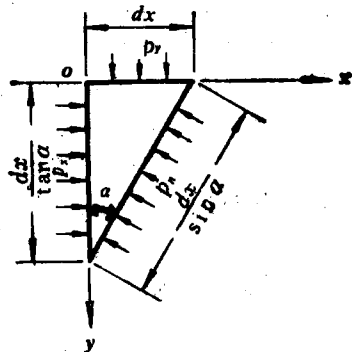


图 1-2

$$\sum F_x = \frac{p_x \cdot dx}{\tan \alpha} - \frac{p_n \cdot dx}{\sin \alpha} \cdot \cos \alpha = 0,$$

可得 $p_x = p_n$

$$\sum F_y = p_y \cdot dx - \frac{p_n \cdot dx}{\sin \alpha} \cdot \sin \alpha = 0,$$

可得 $p_y = p_n$

所以 $p_x = p_y = p_n$

这就对上述特性作了证明。

三、静水力学基本方程

静水中，任意一个定点上的静水压强的_{大小}，可由静水力学基本方程式计算而得。

在静止液体中任取一点 M ，该点在液面以下的深度为 h ，求 M 点的静水压强 p_M 。围绕 M 点取一水平微小面积 $d\omega$ ，以 $d\omega$ 为底面积，深度 h 为高，取一铅垂液柱如图 1-3 所示。作用于液柱上的力有：

- 1) 液面上的压力 $p_0 = p_0 d\omega$ (p_0 为液面压强)，方向铅垂向下；
- 2) 液柱底面上的压力 $p = p d\omega$ ，方向铅垂向上；
- 3) 液柱侧面上的压力 P_1 、 P_2 ...等，它们都是水平方向的，且方向对称，互相抵消；
- 4) 液柱的自重 $dG = \gamma h d\omega$ ，方向铅垂向下。

列出液柱沿铅垂方向的平衡方程，可得：

$$p_0 d\omega - p d\omega + \gamma h d\omega = 0$$

上式除以 $d\omega$ ，整理得：

$$p = p_0 + \gamma h \quad (1-3)$$

上式称为重力作用下的水静力学基本方程。它可说明如下几个问题：

1) 在重力作用下的静止液体中任一点的静水压强 p 是液面压强 p_0 （边界条件）和重力（质量力）产生的压强 γh 两者之和。

2) 如液面压强 p_0 增大 Δp_0 ，静止液体内部各点的压强将同时增大同样的 Δp_0 值，即液面压强的增大量会等值地传递到其它各点。这就是著名的帕斯卡原理。水压机就是利用这一规律制成的水力机械。

3) 当容重 γ 一定时，压强 p 随水深 h 呈线性规律变化。

4) 在连通的同一种类静止液体中，水深相等的水平面内各点的静水压强相等。

水静力学的基本方程还可表达为另一种形式，如图 1-4 所示为封闭的容器内盛有静止液体，其容重为 γ 。表面压强为 $p_0 > p_a$ （大气压强）。在液体内部任取两点 1 与 2，它们在液面以下的深度分别为 h_1 与 h_2 ，与基准面 0-0 的铅垂距离分别为 z_1 与 z_2 。对 1、2 两点写出水静力学基本方程得：

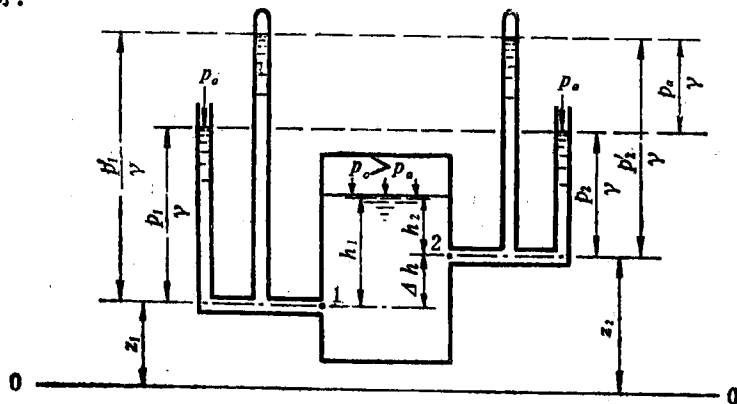


图 1-4

$$p_1 = p_0 + \gamma h_1$$

$$p_2 = p_0 + \gamma h_2$$

两式相减得

$$p_1 - p_2 = \gamma(h_1 - h_2)$$

或

$$p_1 = p_2 + \gamma(h_1 - h_2) = p_2 + \gamma \cdot \Delta h \quad (1-4)$$

上式表明：静止液体内任一点的静水压强 p_1 可以表示为另一点的静水压强 p_2 与两点间铅垂液柱所产生的压强之和。但应注意，如点1位于点2之上，则上式右端第二项为负。

又由图1-4可知： $h_1 - h_2 = z_2 - z_1$ ，则有：

$$p_1 - p_2 = \gamma(z_2 - z_1)$$

上式除以 γ ，整理得

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$$

或

$$z + \frac{p}{\gamma} = C = \text{常数} \quad (1-5)$$

式(1-5)就是水静力学基本方程的另一种表达形式。该方程式表明：在静止液体中，任一点的 $\left(z + \frac{p}{\gamma}\right)$ 总是一个常数。

四、等压面及静水压强的计算

(一)等压面

在同一种连续的静止液体内，凡是静水压强相等的那些点所构成的几何面，称为等压面。

由基本方程式(1-3)可见，淹没深度相同的各点，其静水压强是相等的。因而在重力作用下的静止液体中，其等压面必然是水平面，各高程不同的水平面，分别代表压强数值不同的一簇等压面。

在静止液体的自由面上，各点压强均等于气体压强，自由面就是一个等压面的特例。所以静止液体的自由面，也必然是一个水平面。

需要强调指出，静止液体
内等压面是水平面这一结论，
只能适用于互相连通的同一种
液体，对于互不连通（如被闸
门隔断）的液体（见图1-5b），
或者一个水平面穿过了两种不
同的液体时（见图1-5c），则
位于同一水平面上的各点，其
静水压强也不一定相等。在图

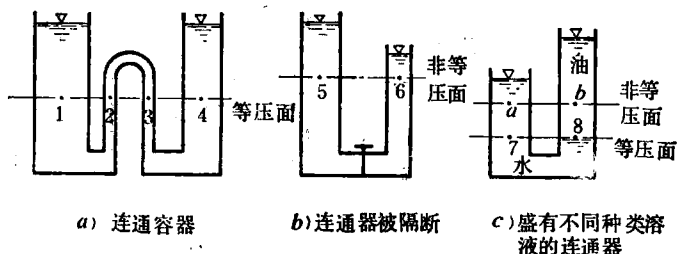


图 1-5

1-5a) 中，位于同一高程的水平面上的1、2、3、4各点压强均相等，通过该四点的水平面为等压面。图1-5b) 中，因液体的连续性受到破坏，故同一水平面上的5、6两点静水压强

并不相等，因而过 5、6 两点的水平面不是等压面。对于图 1-5c) 中盛有两种不同液体的连通器，通过油和水的分界面的水平面为等压面，在该水平面上的 7、8 两点压强相等。而穿过两种不同液体的水平面不是等压面，该水平面上 a、b 两点压强则不等。

等压面的概念非常重要，利用等压面的特性，对分析静水压强的变化规律有很大的帮助。

(二) 静水压强的计算

1. 绝对压强与相对压强

工程实践中的静水压强计算，可采用两种不同的起算基准（即计算起点）来计算，因而有两种表示压强的方法，即绝对压强与相对压强。

绝对压强 以绝对真空压强为零为计算起点所计算的压强叫绝对压强（如用式 (1-3) 计算的包括液体表面压强一并考虑在内的压强 p ），常以 p' 表示。

相对压强 以一个工程大气压作为零为计算起点而计算的压强叫做相对压强，常以 p 表示。地球表面海拔高程不同的地方，其大气压力也有差异，在工程上为计算方便，一般取大气压强为 9.8 N/cm^2 ，称为一个工程大气压。常以 p_a 表示。如果以一个压力表放在大气中，指针读数为零，那么用此压力表所测读的压强则为相对压强。

绝对压强和相对压强是两种计算零点不同的度量标准，它们之间相差一个常数（1 个大气压强），二者之间的关系式为：

$$p = p' - p_a \quad (1-6)$$

在实际工程中，一般自由表面都是开敞于大气之中，自由面上的气体压强都等于大气压强，即 $p_0 = p_a$ ，因而静止液体内任意点的相对静水压强为：

$$p = (p_a + \gamma h) - p_a = \gamma h \quad (1-7)$$

所以，当自由面上为大气时，相对静水压强即为不包括液面大气压力在内的，仅仅由于液体自重而产生的那部分压强应力。

2. 真空现象及其真空度

当液体（无论静止的和运动的液体）中某点的绝对压强小于大气压强 p_a 时（如抽水机的吸水管内），则该点存在着真空。其相对压强必为负值，所以习惯上常常说有真空必有负压，真空和负压成为同义语。

这里需要指出的是，有些物理书中，常把绝对压强为零的状态称为真空。这一点和水力学的习惯不同。水力学的规定是，凡绝对压强小于大气压强者均认为存在真空，当绝对压强为零时，称为绝对真空。

真空的大小程度常用真空度 p_v （或称真空值）来表示。真空度是指大气压强与某一（有真空存在的）点的绝对压强的差值，即

$$p_v = p_a - p' \quad (1-8)$$

从上式不难看出，真空度 p_v 始终是一个正值，因为 p_v 实际上是某一点的相对压强的绝对值。若液体内某点的绝对压强 p' 越小，则该点的真空度 p_v 越大。当 $p' = 0$ 时， $p_v = p_a$ ，这说明真空度理论上的最大值只能达到一个大气压。但在生产实践中，对于水，真空度只能达到 $0.6 \sim 0.7$ 工程大气压，再大了，水就汽化。因此各种水力装置允许的真空度都有一定的限度。决不允许也不可能达到理论上的最大值。

绝对压强、相对压强和真空度三者之间的关系，亦可用图 1-6 来表示。如点 1 的压强大于大气压，而点 2 的压强小于大气压。由于相对压强与绝对压强的起算点（或基准）相差一个大气压，故依据不同的起算点对点 1 或点 2 的压强在图上有不同的表达方式，对点 1 而

言, 其绝对压强为 p'_1 , 相对压强为 p_1 。又如点 2, 其绝对压强为 p'_2 , 而相对压强 p_2 为负值。其绝对值即为真空度 p_{v-2} 。

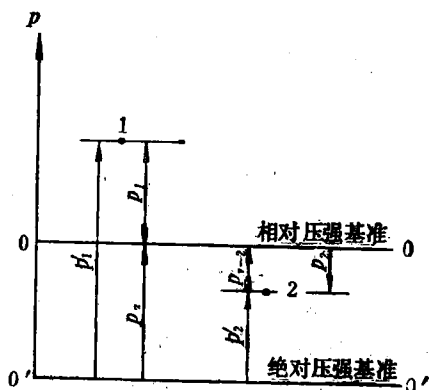


图 1-6

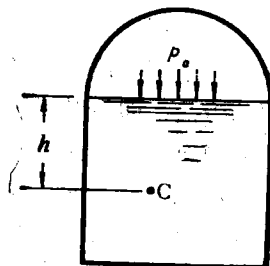


图 1-7

例1-1 一封闭水箱 (见图1-7), 自由面上的气体压强 p_0 为 8.5 N/cm^2 , 求液面下淹没深度 h 为 1 m 处的点 C 的绝对静水压强、相对静水压强和真空度。

解: 由式 (1-6), C 点的绝对压强为

$$p'_c = p_0 + \gamma h = 8.5 + 0.0098 \times 100 = 8.5 + 0.98 = 9.48 \text{ N/cm}^2$$

C 点的相对静水压强 $p_c = p'_c - p_a = 9.48 - 9.8 = -0.32 \text{ N/cm}^2$ 。

相对压强为负值, 说明 C 点有真空。根据式 (1-8), 得

真空度 $p_{v-c} = p_a - p'_c = 9.8 - 9.48 = 0.32 \text{ N/cm}^2$ 。

例1-2 情况同上例, 试问当 C 点的相对压强 p 为 0.98 N/cm^2 时, C 点应在自由面下的淹没深度 h 为多少?

解: 相对静水压强 $p = p' - p_a = p_0 + \gamma h - p_a$ 将已知值代入则得

$$0.98 = 8.5 + 0.0098h - 9.8$$

故

$$h = \frac{2.28}{0.0098} = 232.65 \approx 233 \text{ cm}$$

五、静水压强的分布规律

1. 静水力学基本方程式的意义 (测压管水头和单位势能)

由前所述可知, 液体压强的计量单位如用液柱高表示, 则有:

绝对压强
$$h' = \frac{p'}{\gamma} = \frac{p_a + p}{\gamma}$$

相对压强
$$h = \frac{p}{\gamma} = \frac{p' - p_a}{\gamma}$$

现对上两式中 $\frac{p'}{\gamma}$ 和 $\frac{p}{\gamma}$ 的含义分别加以说明。

$\frac{p'}{\gamma}$ 常被称为绝对静水压强高度, 或压强水头 (对绝对压强而言)。它是以绝对真空作为基准而量得的压强高度。如图1-4所示, 若在静止液体中任意两点 1、2 的旁侧各接一根