水 力 学

湖南省电力技工学校 潘飞 主编

水　力　学

湖南省电力技工学校　潘飞　主编

（京）新登字115号

内 容 提 要

本书为一本简明的水力学读物，着重介绍水力学的基本原理及其主要应用。全书共分五章，主要内容包括水静力学、水动力学、水流流态和水头损失、管流、水锤等。

本书可作为技工学校水动及其相近专业的水力学教材，也可供从事水电厂机械运行、检修、安装的技术人员学习使用。

水 力 学

湖南省电力技工学校 潘飞 主编

*

水利电力出版社出版、发行

（北京三里河路6号）

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 9.25印张 205千字

1992年6月第一版 1992年6月北京第一次印刷

印数 0001— 5090 册

ISBN 7-120-01474-9/TV·535

定价4.90元

前　　言

本书是根据能源部中电联关于电力技工学校第三轮教材编写的指示精神，按原水利电力部1988年3月颁发的电厂水能动力设备运行与检修、电厂水能动力设备安装与检修专业中水力学课程的教学计划及教学大纲而编写的。

在编写过程中，我们力求做到符合技工教育的特点，注意讲透讲清基本概念，避免复杂烦琐的数学推导。教材内容尽量结合专业特点，每章均选择了一定的例题、思考题和练习题，并附有小结以便自学。

本书绪论、第二章、第三章由湖南省电力技工学校潘飞同志编写；第一章由福建省水利电力技工学校杨家松同志编写；第四章、第五章由吉林省丰满水电技术学校闵兆宏同志编写。全书由潘飞同志统稿，由水电部第三工程局技工学校姚胜达同志主审。在全书的编写过程中得到了中电联动力教研会水动课程组全体同志的大力支持和帮助，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中如有差错之处，诚恳希望读者批评指正。

编　　者

1991年5月

目　　录

前　言

绪　论 …… 1

第一节　水力学在水电厂中的应用及其研究方法 …… 1

第二节　液体的基本特征与连续介质的概念 …… 2

第三节　液体的主要物理力学性质 …… 2

第一章　水静力学 …… 7

第一节　静水压强及其基本方程 …… 7

第二节　静水压强的表示方法及其量测 …… 14

第三节　平面壁静水总压力的计算 …… 19

第四节　曲面壁静水总压力的计算 …… 28

第五节　旋转容器中液体的相对平衡 …… 33

小结 …… 34

第二章　水动力学 …… 41

第一节　水流运动的基本概念 …… 41

第二节　恒定总流的连续性方程 …… 47

第三节　恒定总流的能量方程 …… 49

第四节　恒定总流的动量方程 …… 64

小结 …… 71

第三章　水流流态与水头损失 …… 76

第一节　运动水流的两种基本流态 …… 76

第二节　紊流运动的基本特征 …… 79

第三节　水流水头损失及其分类 …… 81

第四节　沿程水头损失的分析与计算 …… 83

第五节　局部水头损失的分析与计算 …… 96

小结 …… 104

第四章　有压管道恒定流 …… 108

第一节　概述 …… 108

第二节　短管的水力计算 …… 109

第三节　长管的水力计算 …… 115

小结 …… 123

第五章　有压管道非恒定流——水锤 …… 126

第一节　水锤的形成及其发展过程 …… 126

第二节　简单管道的水锤压强计算 …… 131

第三节　减小水锤压强的措施 …… 138

小结 …… 139

参考文献 …… 141

绪　论

在改造大自然的长期斗争中，特别是在兴修水利的工程实践中，人们反复总结经验逐步认识了液体运动的各种规律，形成了水力学这门学科。水力学是研究液体处于平衡和运动状态下的力学规律并把这些规律应用于生产实践的一门技术学科。它是力学的一个分支，由于它研究的主要对象是以水为代表的液体，故通常称为水力学。但水力学的基本理论不仅适用于水，而且也广泛适用于各种液体和可忽略压缩性影响的气体。

水力学的基本内容由水静力学和水动力学两大部分组成。前者研究液体在静止状态下的平衡规律；后者探讨液体处于运动状态下的流速变化以及流速和压力、能量之间的关系。

第一节　水力学在水电厂中的应用及其研究方法

水力学在水利工程、城市建设、机械制造、船舶设计、石油开采、金属冶炼、化学工业等领域里有着广泛的应用。特别是在水电厂的勘测、设计、施工、管理中会遇到更多的水力学问题。

例如，修建水电厂以满足发电、防洪和灌溉等方面的要求，就会涉及到用以调节洪水、储蓄水量和抬高水位的坝、闸门等水工建筑物受到水压力的作用后保持稳定的问题；从水库中引水供水轮发电机组发电，就必须修建能够承受水压力且有足够过水能力的输水管道。又如，研究水流在水轮机中的运动状态，以掌握水轮机的运行特性；研究水轮机在运行过程中由于工作负荷的突然变化而在水电厂压力过水系统中产生的水锤现象；为保证水电厂正常工作所必须的技术供水、供油、供气管道和水力量测设备中的水力计算，这些工作都必须运用水力学的基本原理。所以，学习和研究水力学对从事水电厂工作的工程技术人员来说是十分重要的。

水力学在研究液体平衡和机械运动规律时，要应用物理学及理论力学中有关物体平衡及运动的规律和原理，如力系平衡定理、动量定理、能量守恒定理等。液体在平衡或运动状态下也同样遵循这些普遍原理，所以物理学和力学的知识是学习水力学课程的必要基础。

研究水力学有两种最基本的方法，即理论分析和科学实验。

任何物体的机械运动与作用在物体上的外力总是紧密相关的。对液体运动进行理论研究也应首先分析作用在液体上的力，然后引用力学的基本原理来建立水流运动的基本方程。但由于实际水流运动的多样性，对于某些复杂的运动完全用理论分析来解决还存在着一定的困难，所以必须借助科学实验的方法。当某些水力学问题在理论上暂时还不能得到解决时，通过实验可以找出一些经验性的规律以满足工程实际应用的需要。无论就当前水力学研究的实际情况来看，还是着眼于水力学未来的发展方向，科学实验仍是一个极其重

要的手段。

第二节 液体的基本特征与连续介质的概念

世界上的物质可分为固体、液体和气体三种形式，它们的性质有所不同，液体的性质介于固体和气体之间。液体和固体相比较来说，液体分子之间的距离较远，分子运动较剧烈，分子之间的相互吸引力也较小。因此液体不象固体那样具有固定的形状，其形状随容器而异。正由于液体内部分子的特性决定了液体几乎不能承受拉力，静止时不能承受切力。所以液体在微小的拉力和切力作用下，便会发生连续不断的变形，即具有易流动性。气体和液体一样也具有易流动性，故统称为流体。但液体和气体相比较来说，分子间的距离较近，相互吸引力也较大。所以液体不象气体那样能充满任何容器，而是保持一定的体积，具有自由表面。同时，液体内部分子的特性决定了液体和固体一样能够承受压力。实验证明在很大的压力作用下，液体的体积收缩甚小，液体具有不易压缩性。

众所周知，任何物体总是由运动的分子所组成的，分子之间存在着空隙。因此从微观角度来看，液体是不连续、不均匀的，分子之间存在着空隙。但水力学的任务是研究整个液体的宏观机械运动，分子之间的空隙与所研究问题之间的一般尺度相比较而言是微小的，可以忽略不计。因而可以认为液体是由无数液体质点所组成的连续介质，并且这种连续介质是均质的和各向同性的，即液体各部分和各方向上的物理性质是一样的。

综上所述，在水力学中研究的液体是一种易流动、不易压缩、均质等向的连续介质。

第三节 液体的主要物理力学性质

液体呈现出的静止或运动的各种不同形态，是由于外因通过液体本身内因——首先是它的物理力学性质而起作用的结果。在水力学中与液体运动有关的主要物理力学性质有以下几点。

一、惯性以及液体的质量和密度

惯性就是物体所具有的保持自身原有运动状态的物理性质。根据牛顿第二定理，物体惯性的大小是用质量来度量的。质量越大的物体惯性越大，反之亦然。当液体受到其他物体的作用力而改变原有的运动状态时，液体为保持自身原有的运动状态必然施加反作用力于其他物体上，这个反作用力称为惯性力。

如果液体的质量为m，加速度为a，则惯性力的大小为

$$F=-ma \tag{0-1}$$

式中，负号表示惯性力的方向与加速度的方向相反。

液体单位体积所具有的质量称为密度，用符号ρ表示。若体积为V的液体具有质量为m，则其密度可以表示为

$$\rho=m/V \tag{0-2}$$

在法定单位制中，质量采用千克（kg）作单位，长度采用米（m）作单位，则密度

的单位为千克/米³（kg/m³）。

二、万有引力特性与液体的重力

万有引力特性是指任何物体之间具有相互吸引力的物理性质。地球对物体的吸引力称为重力。质量为m的液体，所受到的重力G的大小为

$$G = mg \tag{0-3}$$

式中　g——重力加速度，数值为9.8m/s²。

单位体积液体所受到的重力称容重，用符号γ表示。若体积为V的液体具有重力为G，则其容重可表示为

$$\gamma = \frac{G}{V} \tag{0-4}$$

在法定单位制中，重力采用牛顿（N）作单位，则容重的单位为牛顿/米³（N/m³）。

将公式（0-3）代入式（0-4）中，得

$$\gamma = \rho g \tag{0-5}$$

不同液体的密度或容重是不相同的，几种常见液体的密度和容重如表0-1。即使相同的液体其密度和容重随着温度和所受压力的不同也有所变化。纯净的水在一个标准大气压条件下，其密度和容重随温度的变化如表0-2。由于数值变化较小，在工程上一般将水的密度和容重当作常数来对待。通常以一个标准大气压下温度为4℃时的密度$\rho = 1000kg/m^3$和容重$\gamma = 9800N/m^3$作为计算值。

表 0-1　　几种常见液体的容重

液体种类	水银	油	汽油	酒精	空气
容重(N/m³)	133280	8820	7350	7750	12.66

表 0-2　　标准大气压下，不同温度时水的密度和容重

温度（℃）	0	4	10	20	40	60	80	100
容重(N/m³)	9798.73	9800.00	9797.54	9782.95	9725.03	9637.12	9525.01	9394.77
密度(kg/m³)	999.87	1000	999.75	998.26	992.35	983.38	971.94	958.65

三、液体的粘滞性与粘滞系数

如图0-1所示，当液体沿固体平面边壁作平行直线运动时，紧靠着固体边壁的一层极薄的液体层由于液体和固体间的附着力作用，将粘附在边壁上静止不动。这样边壁以上液体层的运动便受到这个静止不动的液体层的影响，而且，离边壁层越远，影响就越小。若假想将液体分割成几个液体层时，从下到上每个液体层的流动速度逐渐增大。其流速分布如图所示。

任意取两层相邻的液体进行分析。如图0-1(b)所示，由于这两层液体的流速不同，它们之间便有了相对运动。快层的液体要使慢层的液体流得快些，而慢层的液体要使快层的

液体流得慢些，于是在两层液体之间便产生了内摩擦力用以阻滞相对运动。

液体运动时质点之间存在着相对运动，则质点之间就会产生内摩擦力来阻滞其相对运动，这种性质即为液体的粘滞性。粘滞性是液体固有的物理性质。需要说明的是，一旦液体停止运动，液体之间便不再有相对运动，因此，粘滞性在液体静止时不显示作用。

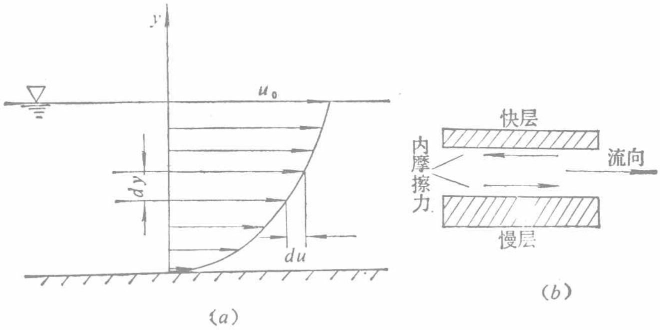

图 0-1

由于运动液体的内部存在着摩擦力，所以液体在运动过程中为克服内摩擦力就必须消耗自身的能量。可以说粘滞性是产生液流阻力和液体能量损失的根源，它在分析和研究液体运动时占有重要的地位。实验证明，液体流层间单位面积上的内摩擦力与液体的性质以及流层间的速度变化有关，与接触面上的正压力无关。假设在流动的液体中任取两层相隔Δy的液体，其速度差为Δu，则单位面积上的内摩擦力可以表示为

$$\tau=\mu\cdot\frac{\Delta u}{\Delta y} \qquad (0\text{-}6)$$

式中 τ——单位面积上的内摩擦力，Pa；

$\frac{\Delta u}{\Delta y}$——流速梯度，沿垂直流动方向上各流层间流速的相对改变率；

μ——动力粘滞系数，Pa·s。

可以看出，当$\Delta u/\Delta y=0$时，即液体处于静止状态时，$\tau=0$，不呈现出内摩擦力。

液体的动力粘滞系数与液体的种类有关，其数值越大，表明液体的粘滞性越强。工程实践上将液体的动力粘滞系数与密度的比值称为液体的运动粘滞系数，用符号ν表示。即

$$\nu=\frac{\mu}{\rho} \qquad (0\text{-}7)$$

可以推导出运动粘滞系数的单位是m^2/s或cm^2/s。对于不同种类的液体，其粘滞系数不相同，同一种液体的粘滞系数随温度的升高而减小。表0-3给出了不同温度下水的运动粘滞系数。

液体的粘滞性使液体运动变得比较复杂，为了简化问题便于分析，人们假想出一种没有粘滞性的液体，叫做理想液体。在分析问题时先以理想液体为研究对象，然后将所得到的结论对没有考虑粘滞性而引起的偏差进行修正，以满足工程精度的需要。当然，实际上并不存在理想液体，它仅仅是人们为了便于研究液体的运动而引入的一个重要概念。

四、液体的压缩性

液体受到压力作用后产生压缩变形（体积缩小），除去压力后变形消失，这种性质称为液体的压缩性。

表 0-3 **水的粘滞性系数值**

温　度 (℃)	粘滞性系数 μ (10^{-3}Pa·s)	粘滞性系数 ν ($10^{-6}m^2/s$)	温　度 (℃)	粘滞性系数 μ (10^{-3}Pa·s)	粘滞性系数 ν ($10^{-6}m^2/s$)
0	1.781	1.785	40	0.653	0.658
5	1.518	1.519	50	0.547	0.553
10	1.307	1.306	60	0.466	0.474
15	1.139	1.139	70	0.404	0.413
20	1.002	1.003	80	0.354	0.364
25	0.890	0.893	90	0.315	0.326
30	0.798	0.800	100	0.282	0.294

若液体在原有压强p的作用下，体积为V；当压强增加了Δp后，体积缩小了ΔV。将液体体积相对缩小值$\frac{\Delta V}{V}$与压强增值Δp之比定义为液体的体积压缩系数，用符号β表示。即

$$\beta=-\left(\frac{\Delta V}{V}\right)\Big/\Delta p \tag{0-8}$$

式中负号表示当压强增大时，液体的体积缩小。$\Delta V/V$是一个无单位的比值，因而β的单位正好与压强的单位相反，为m^2/N。液体体积压缩系数的倒数就是液体体积弹性系数，用符号K表示。即

$$K=1/\beta=-\left(\frac{V}{\Delta V}\right)\Delta p \tag{0-9}$$

液体的种类不同，其压缩系数或弹性系数是不相同的。同一种液体的压缩系数和弹性系数也随温度和压强变化而变化，但变化不大，在一般情况下可以看作是常数。例如，水的弹性系数一般采用2.0×10^9Pa，由此可见水的压缩系数是很小的。说明水是不易压缩的，可以近似地认为水是不可压缩的。但对某些特殊情况，例如水电厂压力引水管道中的水流，由于阀门的突然关闭使管道中压力急剧升高，水体受到压缩，此时液体的压缩性对液体运动的影响便不可忽略。

思考与练习

0-1　液体与固体、气体有何区别？

0-2　为什么说，在水力学中研究的液体是一种容易流动，不易压缩，均质等向的连续介质？

0-3　何谓液体的粘滞性？何谓理想液体？

0-4　为什么说液体的粘滞性是引起液体能量损失的根源？

0-5　1000L的水在一个标准大气压下，温度为4℃时质量和重力各为多少？

0-6　设想在间距为0.8mm的两块平板间充满油，上平板的运动速度为1.5m/s，下平板静止不动，且由平板所带动油的流速呈直线分布，如图0-2所示。若油的动力粘滞系数

$\mu=0.18\text{Pa}\cdot\text{s}$，求作用在平板单位面积上的内摩擦力。

0-7　试计算使水体体积减少1％需要增加多大的压力？已知水的压缩系数 $\beta=0.5\times10^{-9}\text{m}^2/\text{N}$。

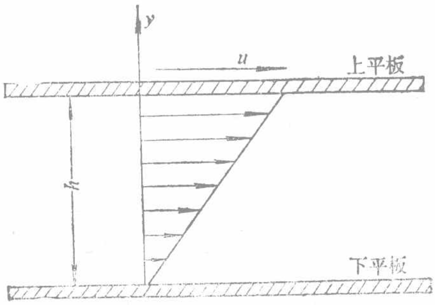

图 0-2

第一章 水 静 力 学

水静力学是研究以水为代表的液体在静止或相对静止状态下的力学规律。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。在工程实践中，特别是在水力发电厂的生产运行中许多地方都要利用到水静力学的知识。例如，挡水闸门所受的静水总压力及其启闭力的确定；压力油罐中油压力的计算等。

本章先讨论静水压强的特性及其分布规律，然后研究受压平面和曲面上静水总压力的计算，最后介绍绕定轴匀速旋转容器中的液体运动。当液体处于静止状态时不呈现出粘滞作用，因而本章所讨论的力学规律对理想液体和实际液体都适用。

第一节 静水压强及其基本方程

一、静水压强的基本概念

在日常生活中人们会有这样的感知，游泳时水淹过胸部便会感到胸部受压；木桶无箍盛水时就会散开。这些现象说明处于静止状态的液体对与其接触的壁面以及自己内部质点之间都有压力作用。在水力学的研究中将此压力叫做静水压力；作用在单位受压面积上的静水压力称为平均静水压强，以符号$\overline{p}$表示。即

$$\overline{p}=\frac{P}{A} \tag{1-1}$$

式中 P——静止液体作用在受压面上的静水压力，单位为牛顿（N）或千牛（kN）；

A——受压面积，单位为平方米（m^2）；

$\overline{p}$——平均静水压强，单位为牛顿/平方米(N/m^2)，又称帕斯卡或简称帕(Pa)；千牛/平方米（kN/m^2），又称千帕（kPa）。

一般来说受压面上的受力状况通常是不均匀的，上述公式计算出的平均静水压强不能反映出受压面上各点的实际受压状况，因此有必要进一步建立点静水压强的概念。

在静止的液体中任取一点m，在m点的周围取一微小面积ΔA，假设作用在微小面积ΔA上的静水压力为ΔP，如图1-1所示。因为ΔA取得很小，可近似地认为ΔP在面积ΔA上是均匀作用的，所以ΔA面积上作用的静水压强

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

当受压面积ΔA无限缩小趋近于零时，$\Delta P/\Delta A$的极限值称为点m的静水压强。其数学表达式

$$p=\lim_{\Delta A\to 0}\frac{\Delta P}{\Delta A}=\frac{dP}{dA} \tag{1-2}$$

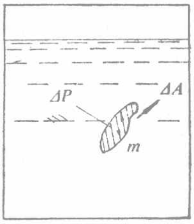

图 1-1

今后若无特殊说明，所说的静水压强都是指点的静水压强这一概念。

静水压强和静水压力都是用来表示静止液体中压力的状况，但它们是两个不同的概念。前者表达了受压面上某点的压强，后者则表达了某受压面上的静水总压力。由于静水总压力是矢量，因此静水压强也是一个具有大小和方向的矢量。

二、静水压强的基本特性

静水压强具有两个重要的基本特性。

（1）静水压强的方向垂直并指向受压面。对于这个特性，可以作这样的反证。如图1-2所示，平板AB在静止液体的作用下，某点受到的静水压强为p。假设p不垂直于AB作用面而与其成任意角度，则p可分解成两个分量。一为垂直于作用面AB的分量p_z，一为平行于AB的分量p_x。由于液体是静止的，所以p_x必为零。否则水流在与受压面相切的分量p_x的作用下必然产生连续不断的变形，即流动，与假设的静止液体相矛盾，因此静水压强只能垂直于受压面AB。

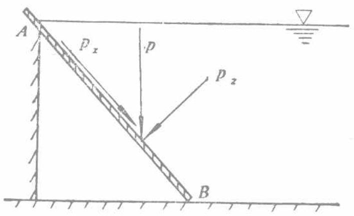

图 1-2

同理，如果静水压强p不是指向变压面，而是背离受压面AB，则液体承受拉力，会导致液体变形引起流动。这同样也与静止的假设相矛盾，所以静水压强是垂直且指向受压面的。

（2）同一点各方向上的静水压强大小相等，与作用面方位无关。静水压强的这一特性可利用图1-3所示的装置进行实验证明。

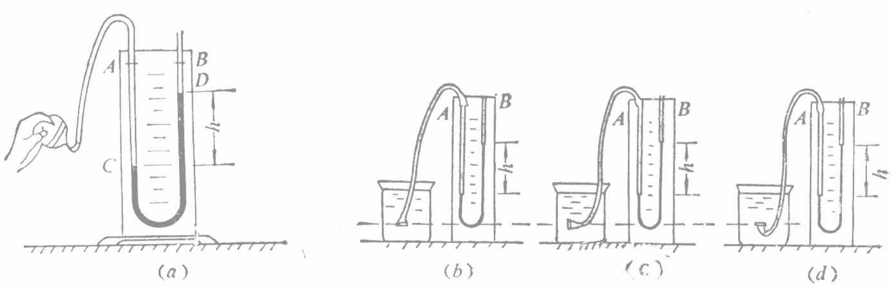

图 1-3

将一个两端开口的U形玻璃管固定在有刻度的木板上，并在玻璃管内注入适量的有色液体。U形管的一端通过橡皮管与另一个蒙有橡皮膜的金属盒相联结，当橡皮膜不受力时U形管内两边的液面相平。用手压橡皮膜，即对橡皮膜产生压力，此时玻璃管内两液面出现了液面差h。在橡皮膜上加的力越大，U形管内的液面差h的数值也越大。这说明橡皮膜上所受到压力的大小可通过两管的液面差来反映。

实验时将蒙有橡皮膜的金属盒放入静止的水中，可以很清楚地看到U形玻璃管内液面形成了高度差h，说明静止液体中存在着静水压力或静水压强。当金属盒入水的位置越深，U形管内液面差h的数值就越大，说明静止液体中压强的大小随水深的增加而增大。当金属盒从水中取出，则U形管内两边的液面又恢复到同一平面。

如果将金属盒放入水中某一深度处固定不变，此时将金属盒口的方向无论向上、向下、向左、向右或转动任意方位，U形管内两边的液面差 h 都不变化。这说明水中对应点的静水压强无论在哪个方向上大小均是不变的，即该点的静水压强的大小与作用面方位无关。

值得注意的是，如图1-4所示边壁转折处的 B 点，对于不同方位的受压面来讲，其静水压强的作用方向是不同的，各自垂直于它的受压面，但 B 点的静水压强数值仍是相同的。

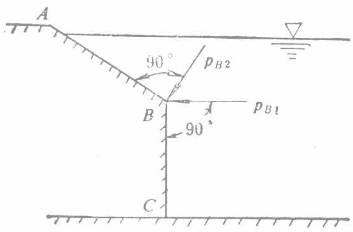

图 1-4

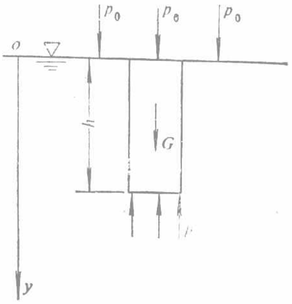

图 1-5

三、静水压强的基本方程

通过前述的实验演示得知静水压强的大小随水深的增加而增大，但它究竟按什么规律变化？其大小又如何计算呢？下面讨论仅在重力作用下静止液体的平衡问题，从而导出任意点的静水压强的分布规律及计算方法。

如图1-5所示，在容重为 γ 的静止水体中任取一点 m，设 m 点在自由水面以下的深度为 h。围绕 m 点取一水平微小面积 ΔA，以 ΔA 为底面积，深度 h 为高做一铅垂液柱，分析该液柱的受力状态。

（1）作用在液柱顶面上的压力 $P_0=p_0\cdot\Delta A$。方向铅垂向下，其中 p_0 为液柱的表面压强。

（2）液柱底面积 ΔA 是微小的，近似地认为各点的压强均为 m 点的压强 p，则作用在底面积上的压力 $P=p\cdot\Delta A$。方向铅直向上。

（3）液柱四周侧面上的静水压力大小相等，方向相反，互相抵消。

（4）液柱的自身重量 $G=\gamma\cdot V=\gamma\cdot\Delta A\cdot h$，方向铅直向下。

由于所研究的液柱是取自静止液体内，故其必然也保持静止。列出铅直方向上的力平衡方程，可得

$$p_0\cdot\Delta A-p\cdot\Delta A+\gamma\cdot h\cdot\Delta A=0$$

化简整理得

$$p=p_0+\gamma h \tag{1-3}$$

式中　p_0——液体表面压强，Pa；

p——液体中深度为 h 点的静水压强，Pa；

γ——液体的容重，N/m^3；

h——该点在液面以下的深度，m。

公式（1-3）便是静水压强的基本方程。它表明在重力作用下，静止液体中任一点的静水压强p等于液体表面压强p_0加上该点在液面以下的深度h与液体的容重γ的乘积。可以看出，如果表面压强不变，水深h越大，静水压强p就越大，呈线性变化规律。在工程实际中，例如水库的挡水坝，离水面越深，坝的断面越大，这样有利于承受逐渐增大的静水压强。

从公式（1-3）还可以知道，若应用某种方法使液体表面压强增减，则静止液体中所有各点的压强也随着p_0的变化而发生同样大小的改变。即作用在静止液体表面上的压强能均匀地传到液体内部所有各点而不改变其大小，这就是静水压强的传递规律，称为帕斯卡原理。

油压千斤顶、水压机等许多机械便是利用了静止液体的压强传递特性而制成的。图1-6所示为一简单的水压机，它由大小两个圆筒组成，筒内盛着液体，并用管子将两圆筒连通。圆筒内还分别装有B和C两个活塞，小活塞C和大活塞B的断面面积分别为A_1和A_2。工作时，在小活塞C上加一压力P_1，则在该活塞的底部液体表面上形成了表面压强$p_0=P_1/A_1$。根据帕斯卡原理，这个表面压强能够均匀地不变大小地传到液体内部的各个部分，因此在大活塞B底部的液体表面压强也必然为p_0，则作用于大活塞B上的力

$$P_2=p_0\cdot A_2=\frac{P_1}{A_1}A_2=\frac{A_2}{A_1}P_1$$

显然，通过液压传递到大活塞B上所产生的作用力P_2比原来作用力增大了，是原来作用力P_1的A_2/A_1倍。

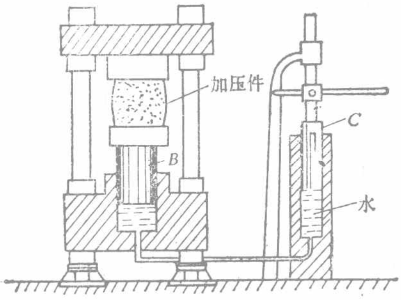

图 1-6

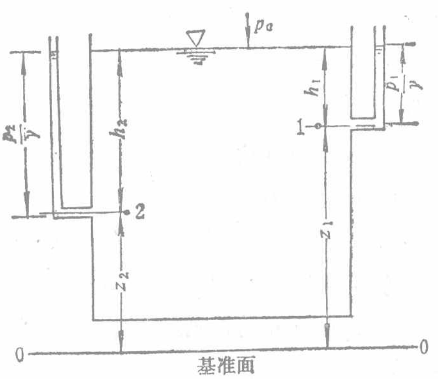

图 1-7

静水中深度不同的两点的压强有什么关系呢？如图1-7所示，在盛有静止液体的容器中任取1、2两点，它们在水中的深度分别为h_1和h_2，其差值$\Delta h=h_2-h_1$。利用公式（1-3）可求出这两点的压强差

$$p_2-p_1=(p_0+\gamma h_2)-(p_0+\gamma h_1)=\gamma(h_2-h_1)=\gamma\Delta h$$

即
$$p_2=p_1+\gamma\Delta h \tag{1-4}$$

或
$$p_1=p_2-\gamma\Delta h \tag{1-5}$$

公式（1-4）、公式（1-5）说明静水中深度较深的点的压强为深度较浅点的压强加上液体容重与深度差之乘积；反之，深度较浅点的压强为深度较深点的压强减去液体容重与深度差之乘积。有了这样的概念，便可利用已知点的压强来推算其它点的静水压强了。

公式（1-3）、公式（1-4）、公式（1-5）中 h 都是从水面往下计算的，如果在图1-7中任意取水平面0-0作为量测液体中各点位置高度的共同起算平面，则点 1 距基准面的位置高度为z_1，点 2 的位置高度为z_2。从图中的几何关系可得

$$Z_1+h_1=Z_2+h_2$$

即
$$Z_1-Z_2=h_2-h_1=\Delta h$$

将其代入公式（1-4）或（1-5）可得

$$p_2=p_1+\gamma(Z_1-Z_2)$$

或
$$p_1=p_2-\gamma(Z_1-Z_2)$$

两边同除以 γ 并移项得

$$Z_1+\frac{p_1}{\gamma}=Z_2+\frac{p_2}{\gamma} \tag{1-6}$$

公式（1-6）是静水压强基本方程的另一种表达形式。从中可以得出以下几点结论：

（1）因为点 1 和点 2 是任选的，所以在同一种静止液体中各点的 $Z+\frac{p}{\gamma}$ 均相等，即静止液体中的各点相对于同一基准面来说 $Z+\frac{p}{\gamma}=$常数。

（2）在公式（1-6）中，Z 是表示某点离开基准面的高度，称位置高度；$\frac{p}{\gamma}$ 是用长度单位表示的某点的静水压强。公式（1-6）说明静止液体中位置高度越大的点，其静水压强越小；反之位置高度越小的点，其静水压强越大。

（3）压强相同的点组成的面叫做等压面。从公式（1-6）中可以看出，在同一种均质（容重 $\gamma=$常量）连通的静止液体中，任一水平面（位置高度 $z=$常量）上，各点的压强必然相等。可见，静止液体中均质、连通的水平面必然为等压面。

等压面的概念十分重要，在静水压强的计算中往往要正确地掌握和应用这一概念，方可进一步计算和解决实际问题。如图 1-8 所示的敞口容器中盛有水和油两种液体，容器壁面安装着一根细玻璃管。对于1-2-3这个水平面来讲，1-2是等压面，它满足同一种液体和连通这两个条件；而 2-3 就不是等压面了，因为它通过的是两种不同的液体。对于 4-5-6 这个水平面来讲，它满足同一种液体和连通的条件，所以是等压面，该水平面上各点的压强均相等。

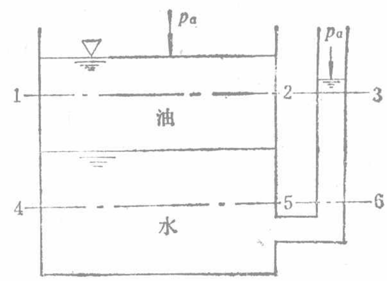

图 1-8

水力学的研究对象是以水为代表的液体，静水压强的基本方程同样适用于其它容重不同的液体，只不过在具体计算时应代入不同的容重数值。

例 1-1 已知水库的表面压强为大气压强，即$p_0 = p_a = 98\text{kPa}$，试求水库中深度为15m和20m处的静水压强。

解 水深15m处的静水压强：

$$p_1 = p_0 + \gamma h_1 = 98 + 9.8 \times 15 = 245\text{kPa}$$

水深20m处的静水压强：

$$p_2 = p_0 + \gamma h_2 = 98 + 9.8 \times 20 = 294\text{kPa}$$

或

$$p_2 = p_1 + \gamma \Delta h = 245 + 9.8 \times (20 - 15) = 294\text{kPa}$$

$$p_1 = p_2 - \gamma \Delta h = 294 - 9.8 \times (20 - 15) = 245\text{kPa}$$

例 1-2 如图1-9所示，压力油罐的表面压强为$p_0 = 200\text{kPa}$，求深度为2m的m点的压强。已知油的容重为$\gamma = 8.8\text{kN/m}^3$。

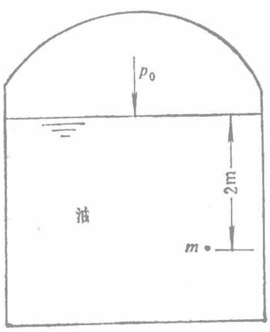

图 1-9

解 $p_m = p_0 + \gamma h = 200 + 8.8 \times 2 = 217.6\text{kPa}$

四、静水压强基本方程的意义

在推导公式（1-6）时，由于是任意取的两点，因此可将其改写成

$$H = z + \frac{p}{\gamma} = \text{常数} \tag{1-7}$$

其中，z为静止液体中某点距基准面的位置高度，可用几何线段来表示；而$\frac{p}{\gamma}$的单位也是长度$\left(\frac{N/m^2}{N/m^3} = m\right)$，同样可用几何线段来表示。

如图1-10所示，在与点1同高程的容器壁上开一小孔，孔口处连接一垂直向上的开口玻璃管，称测压管。在点1处的静水压强作用下，液体将在玻璃管内上升某一高度$h_1 = p_1/\gamma$，通常将此液柱高度称为压强高度。在水力学中习惯用“水头”来称呼高度，所以z又称位置水头；$\frac{p}{\gamma}$又称压强水头；而从基准面0-0到测压管内液面的高度$z + \frac{p}{\gamma}$又称测压

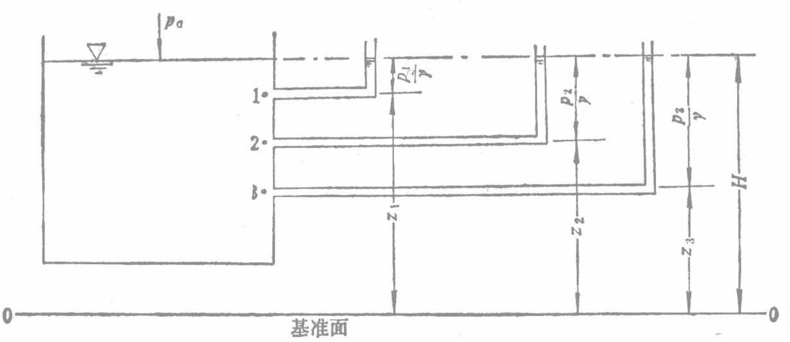

图 1-10