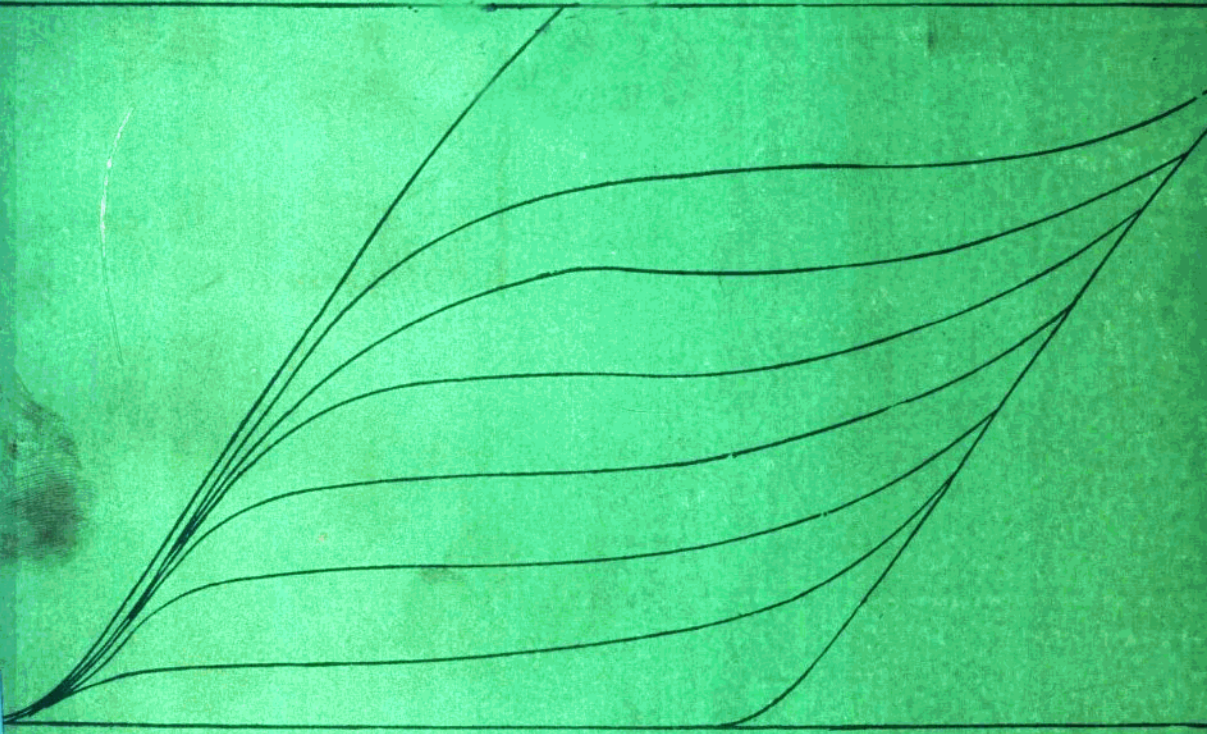


中等专业学校教材

地下水动力学



古自纯 徐启昆 编



地质出版社

中等专业学校教材

地下水动力学

古自纯 徐启昆 编

地质出版社

内 容 简 介

本书是根据地质矿产部四年制中等专业学校《地下水动力学附水力学》大纲编写的。全书分为两篇。第一篇，水力学基础，着重介绍了与地下水动力学有关的和水文地质工程地质工作者必备的水力学基础知识；二篇，地下水动力学，除绪论外，共分七章：渗流理论基础、含水层中地下水的稳定运动、水工建筑区的地下水运动、地下水向集水建筑物的稳定运动、解析法推算涌水量和水位降深、地下水流向单井的非稳定运动、地下水流向干扰井的非稳定运动。

本书可作为地质、水利、建筑、煤炭、冶金等部门水文地质工程地质类专业教材，它可供有关工程技术人员参考。

* * *

本书由禹祥裕担任主审，经地质矿产部中等专业学校水文地质教材编审委员会于1984年12月审稿，同意作为中等专业学校教材出版。

* * *

中等专业学校教材 地下水动力学 古自纯 徐启昆 编

责任编辑：禹祥裕 王肇芬

地质出版社出版

(北京西四)

北京昌平沙河建印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787×1092 1/16 印张：24¹/₂ 字数：560,000

1986年12月北京第一版·1986年12月北京第一次印刷

印数：1—5870册 定价：3.85元

统一书号：13038·教254

前 言

本书是根据地矿部制订的中专四年制教材大纲编写的。1984年12月提出初稿在南京会议上经过审查。1985年上半年在初审的基础上，由编者进行了修改。同年10月编者会同责任编辑进一步交换了意见，再次修改并定稿。

本书重点阐述地下水运动的基本理论，特别是稳定井流和非稳定井流的理论。为了给以学生以必要的基础知识，书前还编写了水力学基础一篇。由于科学的发展，地下水的数值计算方法已发展为一门独立的分支，根据教学计划的规定，本课程不包括这部分内容。

在编写本书过程中，编者的指导思想是通过本书的学习，使学生在掌握基本理论的基础上能独立分析条件、选用公式并熟练地进行实际的水文地质计算，而不要求在公式推导上过多地花费精力。但要圆满地解决这个问题，并不是一件容易的事，因此，编者愿和本教材的授课教师共同完成这项任务。

本书第一篇各章及第二篇的绪论和一至五章由古自纯编写，第二篇第六、七章及附录由徐启昆编写，全书由古自纯统稿。

参加过本书审稿的有禹祥裕、杨荫家、肖戈、潘其山等同志。本书在编写过程中，得到了编者所在单位、地矿部中专水文地质类教材编委会主任王德明同志的关心和支持。责任编辑禹祥裕同志对书稿的审定付出了辛勤的劳动，提出了许多宝贵的意见，刘金山、薛禹群同志对一些问题提出了有益的见解。本书的插图由罗慧君、李凤英、土淑云、柴凤云、刘红、李娜大等同志清绘。对以上所有同志给予的合作和支持，编者在此谨表示深切的谢意！

由于编者水平有限，错误和不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

1985年12月

目 录

第一篇 水力学基础

绪论

一、水力学的研究对象	1
二、液体的主要物理力学性质	1
1. 质量	2
2. 压缩性	2
3. 膨胀性	3
4. 流动性	3
5. 粘滞性	3
6. 表面张力	4

思考题

第一章 静水力学基本原理	6
第一节 作用于液体上的力	6
第二节 静水压力	6
一、静水压力的概念	6
二、静水压力的特性	7
第三节 静水压力分布规律	9
一、静水力学基本方程	9
二、连通器原理	11
三、测管高度和静力高度	13
第四节 静水压强分布图	15
思考题	
第二章 动水力学基本原理	18
第一节 水流及其类型	18
一、水流的几个概念	18
1. 迹线与流线	18
2. 流速与流量	19
3. 等水头线与流网	20
二、水流类型	20
1. 稳定流与非稳定流	20
2. 均匀流与非均匀流	21
3. 缓变流与急变流	23
4. 有压流与无压流	24
第二节 稳定流连续性方程	25
第三节 水流能量方程——伯诺里方程	26

一、水流的机械能	26
1. 动能	26
2. 位置势能	26
3. 压力势能	26
4. 水流机械能的互相转化	27
二、纤流能量方程	27
三、总流能量方程	29
四、能量方程讨论	80
1. 能量方程的物理意义和几何意义	80
2. 能量方程的应用条件	31
思考题	
第三章 水流形态与水头损失	35
第一节 概述	35
第二节 水流形态及其判别	36
一、水流的两种流态	86
二、层流与紊流的判别	37
第三节 沿程水头损失	38
一、沿程阻力与沿程水头损失的关系	88
二、层流沿程水头损失	40
三、紊流的基本特征	41
1. 紊流运动要素的脉动现象	41
2. 紊流流速分布图	42
3. 紊流的附加切应力	42
四、紊流沿程水头损失	48
五、阻力系数 λ 和谢才系数 C 的确定	44
第四节 局部水头损失	48
第五节 测管水头线的绘制	50
思考题	
第四章 明渠均匀流	53
第一节 明渠均匀流的水力特性	53
第二节 明渠水力最佳断面和允许流速	53
一、水力最佳断面	53
二、允许流速	55
第三节 明渠均匀流水力计算类型	56
思考题	
第五章 堰流	59
第一节 堰流的概念及分类	59
第二节 薄壁堰的流量计算	60
一、矩形堰	60
二、三角堰	81
三、梯形堰	62

思考题

第二篇 地下水动力学

绪论

第一章 渗流理论基础 69

第一节 渗流的基本概念 69

 一、水在岩石中的运动方式 69

 二、渗透流速与实际流速 70

 三、水头和水力坡度 71

 四、流网 72

 五、渗流分类 72

第二节 渗流基本定律 74

 一、线性渗透定律(达西定律) 74

 二、非线性渗透定律(哲才-克拉斯诺波里斯基定律) 75

 三、渗透系数讨论 76

第三节 岩层透水性的分类 77

第四节 渗流连续性方程 78

 一、渗流连续性方程 78

 二、地下水稳定运动基本微分方程 80

思考题

第二章 含水层中地下水的稳定运动 82

第一节 均质含水层中地下水的稳定运动 82

 一、承压水的单向运动和平面运动 82

 二、无压水的平面运动 85

 三、地下水的承压-无压运动 88

 四、潜水的辐射运动 89

第二节 非均质含水层中地下水的稳定运动 90

 一、地下水在透水性突变含水层中的运动 91

 二、地下水在透水性渐变含水层中的运动 94

 三、地下水在透水性变化复杂含水层中的运动 95

思考题

第三章 水工建筑区的地下水运动 97

第一节 坝基渗流量计算 97

 一、均质坝基渗流量计算 97

 二、层状坝基渗流量计算 98

第二节 绕坝渗流量计算 100

 一、无侧向天然地下水流影响时的绕坝渗流量计算 100

 二、有侧向天然地下水流影响时的绕坝渗流量计算 102

第三节 库岸渗流量计算 102

思考题

第四章 地下水向集水建筑物的稳定运动 108

第一节 概述	108
第二节 无界含水层中地下水向完整井的稳定运动	109
一、承压完整井的裘布依公式	110
二、潜水完整井的涌水量公式	112
三、承压-无压完整井的裘布依公式	114
四、裘布依井流公式讨论	115
五、完整注水井的流量公式	122
六、非均质含水层中完整井的涌水量计算	122
第三节 边界附近地下水向完整井的稳定运动	123
一、概述	123
二、势及势的叠加原则	125
三、单一直线边界附近完整井的涌水量计算	128
四、正交边界内完整井的涌水量计算	133
五、斜交边界内完整井的涌水量计算	135
六、两条平行边界内完整井的涌水量计算	137
第四节 地下水向非完整井的稳定运动	139
一、地下水向非完整井运动的特征	139
二、承压非完整井	139
三、无压非完整井	145
四、关于含水层的有效带和过滤器的有效长度	146
第五节 地下水向干扰井的稳定运动	147
一、任意排列的干扰井	147
二、环状排列的干扰井	150
三、直线排列的干扰井	151
四、非完整干扰井	152
第六节 地下水向水平集水建筑物的稳定运动	153
思考题	
第五章 解析法推算涌水量及水位降深	156
第一节 $Q=f(s)$ 曲线类型分析	156
一、直线型	156
二、抛物线型	157
三、指数曲线型	157
四、对数曲线型	158
第二节 $Q=f(s)$ 曲线类型的鉴别	158
第三节 曲线方程参数的确定	159
一、作图选点法	159
二、解联立方程法	160
三、最小二乘法	161
第四节 $Q=f(s)$ 曲线的应用	162
思考题	
第六章 地下水流向单井的非稳定运动	165
第一节 无限含水层中地下水流向完整井的非稳定运动	165

一、弹性释水的概念	165
二、径向流非稳定运动微分方程	167
1. 承压水径向流微分方程	167
2. 潜水径向流微分方程	169
三、泰斯公式	171
四、应用泰斯公式确定水文地质参数	209
1. 理论公式图解求参数——配线法	209
2. 近似公式的图解法求参数	215
五、泰斯公式分析	225
思考题	
第二节 直线边界附近地下水流向完整井的非稳定运动	228
一、直线边界附近的完整井	228
二、两平行边界间的完整井	228
三、直线边界井公式的应用	236
思考题	
第三节 $I \neq 0$ 的含水层中地下水向完整井的非稳定运动	242
思考题	
第四节 有越流补给时地下水流向完整井的非稳定运动	247
一、越流补给的概念	247
二、不考虑弱透水围闭层储存水释放时, 半承压含水层中地下水向完整井的非稳定运动	249
1. 越流公式的建立	249
2. 越流公式的分析	259
3. 越流公式的应用(确定 T 、 a 值)	261
三、考虑弱透水层释放弹性储量、相邻含水层的水头保持不变时, 半承压含水层中地下水流向完整井的非稳定运动	276
思考题	
第五节 潜水含水层中地下水流向完整井的非稳定运动	287
一、延迟给水的概念	287
二、考虑延迟疏干的博尔顿法	288
三、考虑存在流速垂直分量 and 滞后反应的纽曼法	292
思考题	
第六节 变流量时地下水流向完整井的非稳定运动	314
一、流量呈阶梯状变化的计算式	314
二、公式的应用	318
思考题	
第七节 定降深完整井的计算式	320
一、抽水井的流量计算式	320
二、水位计算式	322
三、流量计算式的应用	324
第八节 地下水向非完整井的非稳定运动	328
一、承压非完整井的非稳定运动	328

二、非完整井计算式的应用	330
第七章 地下水流向干扰井的非稳定运动	334
第一节 无限含水层中任意排列的干扰井的非稳定运动	334
一、定流量干扰井的非稳定运动	334
二、流量呈阶梯状变化的承压干扰井的非稳定运动	335
第二节 直线边界附近地下水流向干扰井的非稳定运动	340
一、直线透水边界附近干扰井的计算式	340
二、直线隔水边界附近干扰井的计算式	341
第三节 面积井的非稳定运动计算	342
一、矩形开采区面积井的计算式	345
二、圆形开采区面积井的计算式	350
附录I 流向非完整井的非稳定运动微分方程的建立	358
附录II 证明在抽水时下式恒等 $\lim_{r \rightarrow 0} \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right) = -\frac{Q}{2\pi r}$	358
附录III 积分指数函数 $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{u} \exp(-u) du$ 展成级数表达式的过程	359
附录IV 直线井排干扰完整井涌水量计算式推导	363
附录V 两条平行边界间完整井涌水量计算公式的推导	365
附录VI 无限含水层地下水流向完整井的计算式——泰斯公式的推导（假设条件同前）	367
附录VII 有越流补给时地下水流向完整井计算公式的推导	370
附录VIII 有延迟给水时地下水流向完整井的计算式——布尔顿公式的推导	372
主要参考书	

第一篇 水力学基础

绪 论

一、水力学的研究对象

水力学是研究液体（主要指水）的平衡和运动规律，并运用这些规律去解决工程实际问题的一门科学。它是应用力学的一部分。

以液体为研究对象之一的还有流体力学。但二者研究的方法有所不同。流体力学以空间流速场内的液流质点为研究对象，用严格的数学方法研究液体的运动规律，从而得出一般性的精确解答。水力学则是用实验和分析的方法研究液体的力学规律，它除了应用流体力学的理论外，侧重于从整体上研究液体所表现出来的平均力学性质。

由于水流状态是复杂多样的，而严格的数学方法只能解决有限的、比较简单和有规律的课题，因而流体力学方法在应用范围方面受到了较大的限制。水力学不同，对那些用数学理论目前还难以解决的实际问题，常借助于实验资料来补充。它的许多公式和结论，正是从大量的实际资料中整理出来的。用水力学方法研究出来的结果，虽然往往是近似的，但对工程实际需要来说，一般都能满足要求，所以，具有广泛的工程实际效果。

根据研究任务的不同，水力学可分为普通水力学和专门水力学两大部分。前者着重于研究水力学的基础理论；后者着重于研究水力学的实际应用。又由于液体具有相对静止状态和相对运动状态两种形式，因而水力学理论又包括静水力学和动水力学两个部分。其中，静水力学研究静止液体的力学规律；动水力学研究运动液体的力学规律。

水力学在工程实践中应用范围很广，如：农田水利、水能利用、河道整治、运河开挖、桥梁建设、水文测验、给水排水以及水力机械的设计等等，都离不开水力学知识。

水力学是地下水动力学的基础。因为以渗流为研究对象的地下水动力学，是在水力学的基础上建立和发展起来的，水力学中的许多基本概念和基本原理，在渗流理论中继续得到沿用。此外，水文地质工作者经常要碰到的井管水力计算、河溪测流、渗流试验等，更是直接应用水力学知识。由此可见，水力学是水文地质专业不可缺少的专业基础课程，学习它是非常必要的。需要说明的是，考虑到我们所需要的，只是普通水力学中的基础理论部分，为了精简课程、削枝强干，这里不单独开设水力学课程，而把它附在《地下水动力学》中。

二、液体的主要物理力学性质

为了更好地研究液体的平衡和运动规律，让我们先了解一下液体的主要物理力学性质。

这里所研究的液体（水），可以看成是一种连续、均质、易于流动的介质。它几乎不能抵抗张力和变形，因而没有独立的形状，或者说，其形状随着容器形状的改变而变化。

液体是流体的一种，它和另一种流体——气体的区别在于：液体在重力作用下具有自由

表面，同时在常压下几乎不可压缩。

下面以水为例具体介绍液体的几个主要物理力学性质。

1. 质量

和所有物体一样，水具有自己的质量。根据牛顿第二定律，重力 G 等于质量 m 和重力加速度 g 的乘积，即

$$G = mg \quad (0-1)$$

两边除以体积 V ，得

$$\frac{G}{V} = \frac{m}{V}g \quad (0-2)$$

等式左边的 G/V ，表示单位体积液体的重力，称容重，记作

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

在SI导出单位中，重力 G 的单位为N，体积 V 的单位为 m^3 ，故容重 γ 的单位为 N/m^3 。

式(0-2)等号右边的 m/V 表示单位体积液体的质量，称密度，记作

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (0-4)$$

由于质量的单位是kg，从而可推算出密度 $\rho (=m/V)$ 的单位为 kg/m^3 。

水的密度和容重随温度、压力的不同而变化，但在常温常压下，其变化很小，可以忽略，只有在温度或压力变化较大时，才给予考虑。

在标准大气压力下，当温度等于 $4^\circ C$ 时，水的密度最大，其值

$$\rho = 1020 kg/m^3$$

对于淡水，在标准大气压力下，当温度为 $4^\circ C$ 时，其容重亦具有最大值，即

$$\gamma = \rho g = 9.8 \times 1020 N/m^3 \approx 10^4 N/m^3 \quad (0-5)$$

2. 压缩性

物体的体积随压力增加而减小、随压力减小而增大的性质，称为压缩性。液体的压缩性大小用体积压缩系数 β 表示。 β 的物理意义是：单位面积上的压力增加（或减小）一个单位时，受压液体体积相对减小（或增加）的值。若以 dp 表示单位面积上压力的改变量， dV 表示液体体积的改变量， V 表示原液体的体积，则

$$\beta = -\frac{dV}{V}/dp \quad (0-6)$$

式中用负号是因为：压力增量 dp 与体积增量 dV 的符号总是相反。为保证压缩系数为正值，公式前必须加负号。

液体的压缩性有三个特点：

(1) 压缩与回弹是可逆的，即：当压力增加时，其体积缩小；压力减小时，其体积增大。且只要单位面积上增加或减小的压力绝对值相等，则其体积的相对压缩量或回弹量也相等。

(2) 液体自由表面压力的变化能沿铅垂线等值地传递到液体内部的各点上。故当表面压力改变时，液体沿铅垂线各点的相对压缩量或回弹量是相等的。

(3) 液体的压缩系数很小，对于水，在压力为 $1 \sim 500$ 个大气压力、温度为 $0 \sim 20^\circ C$ 的范围内，体积压缩系数约为

$$\beta_{\text{水}} \approx \frac{1}{20000} = 5 \times 10^{-5}$$

即是说，每增加或减小一个大气压力时，水的体积改变约10万分之五。由于水的压缩系数很小，因此，一般情况下认为水是不可压缩的，但当压力变化较大时，不可忽略。

3. 膨胀性

液体的体积随温度的升高而胀大，随温度的降低而收缩的性质，称为液体的膨胀性。液体膨胀性的大小，以体积膨胀系数 α 表示。其物理意义是：温度升高或降低 1°C 时，单位体积液体胀大或缩小的值。若以 dt 表示温度的改变量， dV 表示液体体积的改变量， V 表示液体原体积，则

$$\alpha = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (0-7)$$

水的体积膨胀系数 $\alpha_{\text{水}}$ 很小，在常压下，温度在 $0 \sim 10^\circ\text{C}$ 范围内， $\alpha_{\text{水}} = 1.4 \times 10^{-5}$ ；温度在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 范围内， $\alpha_{\text{水}} = 1.5 \times 10^{-5}$ 。故通常情况下可以不考虑水的膨胀量，只有温度变化很大时，才予以考虑。

4. 流动性

液体在切力作用下易产生流动的性质，称为流动性。从力学观点来看，液体易于流动的根本原因，在于静止液体不能承受那怕是微小的切力。

如图0-1所示，在固体中任截一斜面 ab ，在体积 abc 重力 G 的作用下，斜面上分解出切力 T ，由于固体能承受一定的切力，故当斜面不很陡时，即切力 T 小于固体在 ab 面上的抗切力 F 时， abc 棱体可以稳定在原来的位置上。液体则不能，要保持图0-1c的形状，必须有侧壁约束，否则就会在自重引起的切力作用下发生变形。由于静水不能抵抗变形，因此，只要存在微小的水位差，水就必然发生流动。

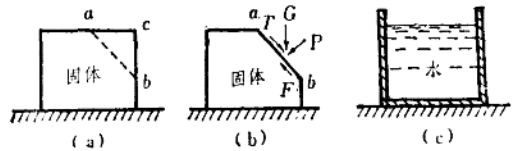


图 0-1

5. 粘滞性

如上所述，在切力作用下，静止液体将发生流动，说明静止液体内部不存在切力。但同时也说明，液体能作相对运动，是因其内部存在切力的结果。和一切运动必然会遇到阻力一样（真空中的物体运动例外），运动液体内部也存在与切力方向相反的内摩擦力。内摩擦力的存在，影响液流速度，并使液流产生能量损失。这种液体内部固有的能抵抗相对运动（剪切变形）的性质，称粘滞性。

粘滞性是由作相对运动液体分子间的引力和动量交换作用引起的。实验证明，当运动速度不很大时，液体作成层相对运动（如图0-2所示），且液层间的内摩擦应力 τ ，与液流的速度梯度成正比，同时与液体的性质有关，其表达式如下

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dn} \quad (0-8)$$

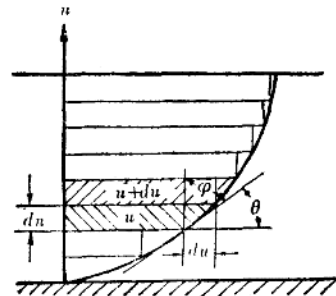


图 0-2

式中 $\frac{du}{dn}$ ——沿法线 n 的速度梯度，其中， dn 为液层的微分厚度， du 为厚度等于 dn 的液层相邻层面之间的速度差，即速度增量；

μ ——动力粘度，单位 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；

τ ——两液层间单位接触面积上的内摩擦力，即摩擦应力，单位 Pa 。

应力 τ 是一个向量，它在两液层间总是成对地面方向相反地出现，其方向和液层运动的方向相反，即对于相对快层来说是一种阻力；对于相对慢层来说是一种牵引力。为保证 τ 永远为正，公式 (0-8) 的右边加了正负号，当 $\frac{du}{dn}$ 为负时取负号；反之，取正号。

μ 是表征液体粘滞性大小的一个物理量，因其单位中包含有力这个动力学因素，故称之为动力粘度。工程实践中多采用 μ 与液体密度 ρ 的比值

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (0-9)$$

来表示液体粘滞性大小。 ν 的单位为 m^2/s 或 cm^2/s 由于其单位中有速度这个运动学要素，故一般称之为运动粘度。

不同种类的液体，其粘度大小是不同的，就是同一种液体，当温度不同时，粘度也不同。液体的粘度随温度升高而减小。水在不同温度下的运动粘度值如下：

表 0-1

温度(°C)	ν (cm ² /s)	温度(°C)	ν (cm ² /s)
0	0.0178	30	0.0081
5	0.0152	40	0.0066
10	0.0131	50	0.0055
15	0.0114	70	0.0041
20	0.0101	90	0.0031

6. 表面张力

表面张力是液体表面层质点间互相吸引的力。它产生在液体与气体接触的自由表面上，同时也产生在液体与固体接触的表面上。在表面张力的作用下，液体表面好象蒙上了一层均匀紧张的薄膜。这一薄膜，力图使液体紧缩成最小的表面形状。液滴所以成圆形，就是因为存在表面张力的缘故。

表面张力的存在，说明液体表面能承受微小的拉力，这种拉力虽小（每 1 m 长度水面上的表面张力 σ 相当于 $6.9 \times 10^{-3} \sim 7.8 \times 10^{-3} \text{N}$ ），但却引出了毛细作用这一重要现象。在毛细管中，表面张力作用的结果，使液体受到附加法向力（压力或拉力）。这个附加法向力与弯液面的总法线方向一致，并指向弯液面的凹向（见图 0-3）。当弯液面凹向上时，表现为拉力；反之，表现为压力。

附加法向力的大小，可通过如下讨论来确定：取一个半径为 r 的球形液体（如图 0-4），用过直径的平面（隔离面）把它分成两个半球。设单位长度上的表面张力为 σ ，则作用于隔离面圆周表面上的表面张力等于 $2\pi r\sigma$ ，由于圆面积等于 πr^2 ，故分配于隔离平面上的附加法向应

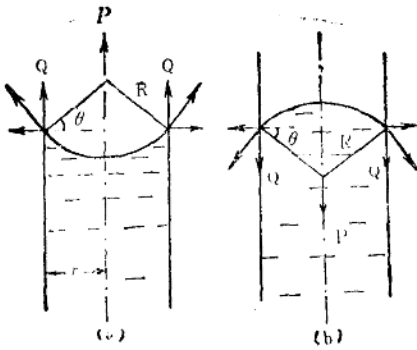


图 0-3

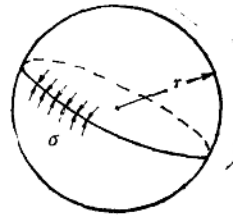


图 0-4

力 p 相当于

$$p = \frac{2\pi r\sigma}{\pi r^2} = \frac{2\sigma}{r} \quad (0-10)$$

上式表明：由表面张力表现出来的附加法向应力 p 与液面的曲率半径成反比。这就是管径越小，毛细高度越高的原因。

当液体的曲率半径各向不等时，附加法向应力的大小由下式确定：

$$p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (0-11)$$

式中， r_1 和 r_2 为两个互相垂直方向上的曲率半径。

表面张力在水力学中不那么重要；在渗流理论中有一定的实际意义；研究包气带的水分迁移规律时，其意义最大。

思考题

1. 水力学的研究对象是什么？水文地质专业学生为什么要学习水力学？
2. 水有哪些主要物理力学性质？
3. 质量与重力、密度与容重的相互关系和单位各如何？
4. 压缩性与膨胀性的物理意义有何不同？水的压缩性和膨胀性有何特点？
5. 如何理解液体的粘滞性？粘滞性如何表示？
6. 在毛细管中如何理解表面张力表现为作用于液体上的附加法向力？

第一章 静水力学基本原理

第一节 作用于液体上的力

作用于液体上的力可分为两类：质量力和表面力。

一、质量力 作用于液体的每个质点上，其大小与液体的质量成正比，对于均质液体，又与体积成正比，故又称体积力。

在水力学中，最常遇到的质量力有两种：

一种是重力，它等于质量 m 和重力加速度的乘积，即

$$G = m \cdot g \quad (1-1)$$

另一种是惯性力，它等于质量 m 和运动加速度 a 的乘积，即

$$G = m \cdot a \quad (1-2)$$

此外，属于质量力的还有液体分子间相互作用的电、磁力。但从宏观角度上讨论问题时，不需考虑。表面张力属于不平衡的分子引力，因此，是质量力的一种。

质量力的单位为 N ，单位质量力的单位为 N/m^3 等。

二、表面力 作用于液体的表面上，其大小与作用面的面积有关。表面力可以是作用于液体边界上的外力，如大气压力、活塞对液体的压力等；也可以是一部分液体质点对另一部分液体质点的内力，如静力压力、动水压力。

表面力可分为垂直于作用面的压力（法向力）和沿作用面的剪切力（切向力）。

第二节 静水压力

一、静水压力的概念

在表面压力和自重压力（重力）作用下，静止液体内任一点都存在法向压力，即静水压力。在日常生活中，经常可以觉察到静水压力的存在：当你下到没胸深的水中，会感到呼吸有点困难；要从背面推开一扇水下闸门，需要很大的力气。（图1-1）

静水压力的存在，还可以通过实验来证明。如图1-2所示，取一根盛有液体（水银或水）的U形测压计，一端通大气，另一端通过橡皮管与蒙着弹性薄膜的小圆盒相连。实验前，U形管中的液面在同一高度上，但当你用手指挤压弹性薄膜时，A端液面下降，B端液面上升，且加压越大，A、B两端的液面差 Δh 也越大，当松开手指时，自由液面又回到同一水平上。如果把圆盒放入水中，两端液面亦出现高差，表明橡皮薄膜受到了水的压力作用。

为了讨论静水压力，让我们在静水中取一点A，如图1-3，围绕A取出某一面积 ω ，其上作用着静水压力 P ，这个 P 称为作用于面积 ω 上的静水总压力， ω 称为静水压力 P 的作用面。

若以 \bar{p} 表示作用于 ω 上的平均静水压力，则

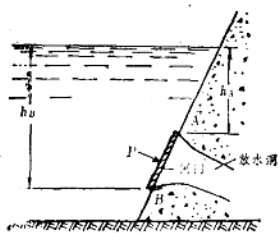


图 1-1

$$\bar{p} = \frac{P}{\omega} \quad (1-3)$$

式中, P ——静水总压力, 单位: N;

ω ——静水压力作用面积, 单位: cm^2 , m^2 ;

\bar{p} ——平均静水压力, 单位: Pa.

一般情况下, 面积 ω 上的压强分布是不均匀的。为了得到任意 A 点的静水压强 p , 可使围绕 A 的面积 ω 无限缩小至一点, 此时, 下列比值的极限, 即定义为 A 点的静水压强

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{P}{\omega} = p \quad (1-4)$$

式中 p ——任意研究点 A 处的静水压强, 单位: Pa.

二、静水压力的特性

静水压力有两个特性。

第一 静水压力的方向与作用面垂直, 且指向作用面。证明如下:

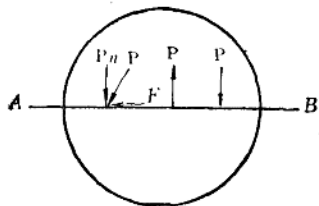


图 1-4

在静水中取出如图1-4所示的某一体积, 通过任意平面 AB 将其分为两部分, 若取走其中的任一部分, 例如上半部分, 让我们考察一下, 为使下半部分保持平衡, 静水压力 P 和作用面 AB 的关系应如何?

很明显, 它们的关系不外乎三种可能: 第一种, 静水压力 P 斜交其作用面, 此时势必分解出法向分力 P_n 和切向分力 F , 由于水不能抵抗切力, 在切力 F 的作用下, 必将沿其作用面发生流动, 从而破坏了平衡, 所以这种情况不可能存在; 第二种, 静水压力 P 向外垂直其作用面, 此时水将受到拉力, 前面已经谈到, 水基本上不能承受拉力的, 在拉力作用下, 必然有水质点发生运动, 这当然也破坏了平衡, 所以这种情况也不可能存在; 第三种, 静水压力 P 垂直并指向其作用面, 此时由于水不易压缩, 即使施于很大的压力也不变形, 因而平衡得到了保证。这就证明了静水压力的方向必须与作用面垂直, 且指向作用面。

第二个特性 静水压力的大小与水深成正比, 与作用面的方向无关。

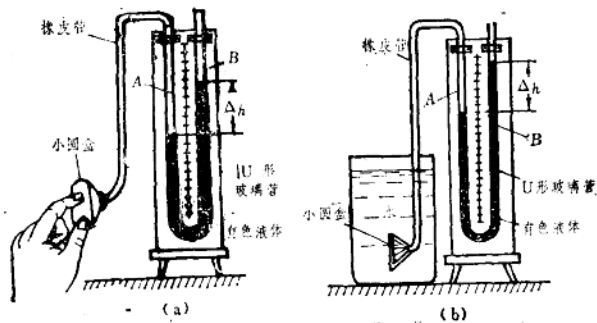


图 1-2

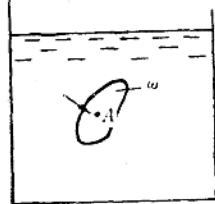


图 1-3