

高等职业教育水利类“十三五”系列教材

# 水力分析与计算

主 编 杨 艳 陈一华  
副主编 黄宏亮 易进蓉  
主 审 邹 林



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

高等职业教育水利类“十三五”系列教材

# 水力分析与计算

主 编 杨 艳 陈一华  
副主编 黄宏亮 易进蓉  
参 编 陈 红 张 倩



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本书是根据全国水利水电高职教研会制定的水利水电建筑工程专业及专业群人才培养方案要求,按照水力分析与计算课程教学标准编写完成的。根据实际工程中水力分析与计算的工作任务组织教材内容,全书共分十个项目,主要包括:液体的认知,静水压强与静水压力的计算,水流运动基本原理的认知,水流形态的判别与水头损失的计算,管道的水力计算,明渠的水力计算,堰闸的水力计算,泄水建筑物下游的消能计算,渗流水力分析与计算,高速水流基础知识。

本书为高职高专水利大类水利工程与管理类专业教材,亦可作为水利水电工程技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

水力分析与计算 / 杨艳, 陈一华主编. -- 北京 :  
中国水利水电出版社, 2016. 8  
高等职业教育水利类“十三五”系列教材  
ISBN 978-7-5170-4396-6

I. ①水… II. ①杨… ②陈… III. ①水力计算—高等职业教育—教材 IV. ①TV131.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第193161号

书 名	高等职业教育水利类“十三五”系列教材 <b>水力分析与计算</b> SHUILI FENXI YU JISUAN
作 者	主编 杨艳 陈一华 副主编 黄宏亮 易进蓉 参编 陈红 张倩
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、68545874 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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16.5印张 392千字
版 次	2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	<b>39.00元</b>

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

本书是根据《教育部、财政部关于实施国家示范性高等职业院校建设计划，加快高等职业教育改革与发展的意见》（教高〔2006〕14号）、教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作意见》和《面向21世纪教育振兴行动计划》等文件精神组织编写的水利工程与管理类高职高专规划教材。

本书针对高等职业技术教育的特点，适应教学改革的要求，以学生能力培养为主线，以实际工程案例为载体，融“教、学、练、做”为一体，适合开展项目化教学，体现出实用性、实践性、创新性的教材特色，是紧密联系工程实际、教学面向生产的高职高专教育规划教材。从高职教育的实际出发，基于水利工程设计、施工、管理中有关水力分析与计算的工作任务和工作过程，依据水利水电建设有关规范，以培养学生的岗位能力为目标，以实际工程案例为载体组织教材内容、构建学习项目，突出学生水力分析能力和计算能力的培养。

本书在编写过程中，注重基本概念、基本理论，但不过分强调理论及公式推导；更注重结合工程实例，应用基本计算方法解决工程实际中的计算问题，加强培养学生的工程意识；本书编写力求做到内容紧凑、叙述简明、由浅入深，计算方法演示简明，示例经典，便于读者理解和接受。文中标“\*”的内容为选编部分，根据教学需要进行学习。

本书编写人员及编写分工如下：长江工程职业技术学院杨艳编写项目二、项目五、项目十，长江工程职业技术学院陈一华编写项目三、项目四；长江工程职业技术学院黄宏亮编写项目一、项目六；长江工程职业技术学院易进蓉编写项目七、项目八；湖北大禹水利水电建设有限责任公司陈红编写项目九；长江勘测规划设计研究有限责任公司张倩参与编写项目二。本书由杨艳、陈一华担任主编，杨艳负责全书统稿；由黄宏亮、易进蓉担任副主编；由长江工程职业技术学院邹林担任主审。

在本书的编写过程中，得到了湖北大禹水利水电建设有限责任公司、长江勘测规划设计研究有限责任公司的大力支持。同时，本书参考了国内同行的著作、教材及相关规范，在此谨对参考文献的编者表示感谢！

由于编者水平有限，本书难免存在缺点和疏漏，恳请广大师生及读者批评指正，以便今后作进一步修订完善。

编者

2016年6月

# 目录

## 前言

<b>项目一 液体的认知</b> .....	1
任务一 了解水力学研究的对象和任务 .....	1
任务二 液体的基本特性和主要物理力学性质 .....	2
任务三 连续性介质假设和理想液体的概念 .....	8
任务四 作用于液体上的力 .....	9
任务五 水力学的研究方法 .....	10
技能训练题 .....	13
<b>项目二 静水压强与静水压力的计算</b> .....	14
任务一 静水压强及其特性 .....	14
任务二 静水压强的基本规律 .....	16
任务三 静水压强的单位和测量 .....	20
任务四 作用于平面壁上的静水总压力 .....	26
任务五 作用于曲面壁上的静水总压力 .....	31
任务六 浮力、浮体的平衡与稳定 .....	35
技能训练题 .....	38
<b>项目三 水流运动基本原理的认知</b> .....	43
任务一 描述水流运动的两种方法 .....	43
任务二 恒定总流的连续性方程 .....	48
任务三 恒定总流的能量方程 .....	50
任务四 能量方程的应用条件及应用举例 .....	56
任务五 恒定总流的动量方程 .....	63
技能训练题 .....	68
<b>项目四 水流型态的判别与水头损失的计算</b> .....	72
任务一 水头损失的类型及其与阻力的关系 .....	72
任务二 水流运动的两种流态 .....	75
任务三 水流的层流运动 .....	79
任务四 水流的紊流运动 .....	82
任务五 沿程水头损失的分析 and 计算 .....	86
任务六 沿程水头损失计算的谢才公式 .....	90

任务七 局部水头损失的计算 .....	94
技能训练题 .....	100
<b>项目五 管道的水力计算</b> .....	102
任务一 管流的认知 .....	102
任务二 简单管道的水力计算 .....	103
任务三 简单短管的应用举例 .....	110
任务四 简单长管水力计算 .....	116
任务五 复杂管路水力计算 .....	119
任务六 压力管道中的水击 .....	123
技能训练题 .....	128
<b>项目六 明渠的水力计算</b> .....	132
任务一 明渠水流的认知 .....	132
任务二 明渠恒定均匀流的特点及发生条件 .....	133
任务三 明渠恒定均匀流的水力计算 .....	134
任务四 明渠恒定非均匀流的三种流态 .....	145
任务五 水跌和水跃 .....	158
任务六 明渠恒定非均匀流的计算 .....	164
技能训练题 .....	176
<b>项目七 堰闸的水力计算</b> .....	180
任务一 堰流 .....	180
任务二 薄壁堰的水力计算 .....	183
任务三 实用堰的水力计算 .....	185
任务四 宽顶堰的水力计算 .....	191
任务五 闸孔出流的水力计算 .....	196
技能训练题 .....	203
<b>项目八 泄水建筑物下游的消能计算</b> .....	206
任务一 概述 .....	206
任务二 底流式衔接与消能的水力计算 .....	214
任务三 挑流式衔接与消能的水力计算 .....	222
技能训练题 .....	226
<b>项目九 渗流水力分析与计算</b> .....	227
任务一 渗流水力现象分析 .....	227
任务二 恒定渐变渗流浸润线的分析与计算 .....	233
任务三 排水廊道和井的水力计算 .....	237
任务四 井群的水力计算 .....	240
技能训练题 .....	242

<b>项目十 高速水流基础知识</b> .....	243
任务一 水工建筑物气蚀现象分析计算 .....	243
任务二 明渠高速掺气水流现象分析计算 .....	247
技能训练题 .....	250
<b>附录 I 梯形和矩形断面明渠正常水深求解图</b> .....	251
<b>附录 II 梯形和矩形断面明渠底宽求解图</b> .....	252
<b>附录 III 梯形、矩形和圆形断面明槽临界水深求解图</b> .....	253
<b>附录 IV 建筑物下游河槽为矩形时收缩断面水深及其共轭水深求解图</b> .....	254
<b>参考文献</b> .....	255

# 项目一 液体的认知

## 学习指导

- (1) 了解水力学研究的主要问题和基本研究对象。
- (2) 掌握液体的主要物理力学性质，理解液体的黏滞性和表面张力。
- (3) 了解液体的基本假设和理想液体的概念。
- (4) 会用量纲分析的方法对物理量的单位进行基本分析。

## 任务一 了解水力学研究的对象和任务

### 一、水力学的学科属性、范畴

水力学 (hydraulics) 是介于基础课和专业课之间的一门技术基础课，属于力学的一个分支，主要研究以水为主的液体平衡和机械运动规律及其实际应用，根据基础科学中的普遍规律，结合水流特点，建立基本理论，同时又紧密联系工程实际，发展学科内容。

### 二、水力学研究的对象

水力学所研究的基本规律，主要包括以下两部分：

- (1) 液体的平衡规律：研究液体处于平衡状态时，作用于液体上的各种力之间的关系，称为水静力学。
- (2) 液体的运动规律：研究液体在运动状态时，作用于液体上的力与运动之间的关系，以及液体的运动特性与能量转化等，称为水动力学。

水力学所研究的液体运动是指在外力作用下的宏观机械运动，而不包括微观分子运动。水力学在研究液体平衡和机械运动规律时，须应用物理学和理论力学中的有关原理，如力系平衡定理、动量定理、能量守恒与转化定理等，因为液体也同样遵循这些普遍的原理，所以物理学和理论力学知识是学习水力学课程必要的基础。

### 三、水力学的任务及其在水利建设中的应用

学习本课程的主要任务是，掌握水流运动的基本概念、基本理论和分析方法；正确区分水流的不同运动状态和特点；研究水流运动的规律，掌握并能应用水流运动的基本方程进行水利水电工程常见的水力设计计算，包括建筑物水力荷载（不包括脉动和风浪荷载）的确定、过水能力的计算和过流建筑物尺寸的设计，为学习专业课程和从事专业技术工作打下良好的基础。

水力学在实际工程中有广泛的应用，如农业水利、水力发电、交通运输、土木建筑、石油化工、采矿冶金、生物技术以及信息、物资、资金等流动问题，都需要水力学的基本原理。在城市水利中，如城市生活和工业用水一般都是由水厂集中供应，水厂用水泵把河



流、湖泊或水井中的水抽上来，经过净化处理后，再经过管路系统把水送到各用户；有时为了均衡用水负荷，还须修建水塔。仅这一供水系统，就要解决一系列水力学问题，如取水口和管路的布置，管径和水塔高度的计算，水泵容量和井的产水量计算等。

随着工农业生产的发展和城市化进程的加快，交通运输业也在飞速发展。在修建铁路公路，开凿航道，设计港口时，也必须解决一系列水力学问题，如桥涵孔径计算、站场路基排水设计、隧洞通风排水设计等。

随着科学技术的发展，新的研究领域不断出现，如环境水力学、生态水力学、灾害水力学，以及人流、物流、车流、资金流和信息流等。学习水力学的目的，是学习它的基本理论、基本方法和基本技能，获得分析和解决有关水力学问题的能力，为进一步的科学研究打下基础。

#### 四、水力学研究的主要问题

(1) 水力荷载问题。当关闭闸门、水库蓄水时，为了计算闸门的强度、刚度，校核大坝的稳定性，必须考虑上、下游水对大坝和闸门的作用力，如管道水击、调压井等。

(2) 过水能力问题。当宣泄洪水时，必须确定和校核泄流量，以确保大坝安全泄洪；或已知泄流量，确定大坝的溢流宽度。

(3) 水能利用和消能问题。由于大坝壅高了水位，泄洪时下游的水流动能较大，会冲击河床，危及大坝的安全。因此，必须采取工程措施，消耗过大的动能，减轻对河床的冲刷。

(4) 水工建筑物中的渗流问题。大坝建成后，水流会通过土壤、岩石中的缝隙渗流，对坝基产生作用力，同时产生渗透变形，会危及大坝的安全。

(5) 水力学研究的其他问题。如河渠水面线问题、水工建筑物及河道的冲刷问题等。

## 任务二 液体的基本特性和主要物理力学性质

### 一、液体的基本特性

#### (一) 液体与固体、气体的相同与不同之处

自然界的物质一般有三种形态，即固态、液态和气态，相应的物质称为固体、液体和气体。液体的基本特性，主要是从力学的角度研究液体与固体、气体的相同与不同之处。固体由于分子间的距离很小，内聚力很大，所以它能够保持固定的形状和体积，能够承受一定大小的拉力、压力和剪切力。与固体相比，液体分子间距离较大，内聚力较小，它只能保持一定的体积，没有固定的形状。液体几乎不能承受拉力、抵抗拉伸变形，在静止状态下也不能承受剪应力，极易发生剪切变形或流动，但液体与固体一样能承受压力。气体分子间的距离很大，几乎不存在内聚力，分子可以自由运动。因此，气体不仅没有固定的体积，也没有固定的形状，它可以任意扩散充满其所占据的有限空间，所以气体极易膨胀和压缩。液体与气体相比，液体的压缩性很小，但他们都具有易流动性，所以液体、气体又统称为流体。

(二) 液体的易流性

易流性是流体在切向力作用下，容易发生连续不断变形运动的特性。液体和气体与固体的差异，或者说流体最显著的特征就是具有“流动性”或者“易流性”。如果对静止的流体施加一个切向力，不论这个力多么微小，流体也将沿着力的方向运动。流体具有易流性的原因，是流体既不能承受拉力、也不能承受切向力。由于流体具有易流性，所以流体没有固定的形状，并且在流动中能与外界发生各种传输作用。理想流体和实际流体都具有易流性。理想流体的易流性比实际流体更强。气体只能传递纵波，而液体主要传递纵波的原因就是流体的易流性。

二、液体的主要物理力学性质

(一) 惯性、质量和密度

(1) 惯性 (inertia)：液体具有保持原有运动状态的物理性质。

(2) 质量 (mass) ( $m$ )：质量是惯性大小的量度。

(3) 密度 (density) ( $\rho$ )：单位体积所包含的液体质量。

若质量为  $m$ ，体积为  $V$  的均质液体，其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-1}$$

对于非均匀质液体，

$$\rho = \rho(x, y, z) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{1-2}$$

密度的国际单位： $\text{kg}/\text{m}^3$ ；密度的量纲： $\rho = [\text{ML}^{-3}]$ 。

液体的密度随温度和压力变化，但这种变化很小，所以水力学中常把水的密度视为常数，即采用一个大气压下  $4^\circ\text{C}$  纯净水的密度 ( $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ ) 作为水的密度。

(二) 重力和重度

(1) 重力 (gravity) ( $G$ )：液体受到地球的万有引力作用，称为重力。

$$G = mg \tag{1-3}$$

式中： $g$  为重力加速度。

(2) 重度 (unit weight) ( $\gamma$ )：单位体积液体的重力称为重度或容重。

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \tag{1-4}$$

重度的单位： $\text{N}/\text{m}^3$ ；重度的量纲： $[\gamma] = [\text{ML}^{-2}\text{T}^{-2}]$ ，液体的重度也随温度变化。空气和几种常见液体的重度见表 1-1。

表 1-1 空气和几种常见液体的重度

流体名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
重度/ $(\text{N}/\text{m}^3)$	11.82	133280	6664~7350	7778.3	15600	9996~10084
测定温度/ $^\circ\text{C}$	20	0	15	15	20	15

在 1 个大气压下，纯净水的密度和重度随温度的变化见表 1-2。

表 1-2

水的密度和重度

水温 $t/^\circ\text{C}$	0	4	10	20	30
密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67
重度/ $(\text{N}/\text{m}^3)$	9798.73	9800.00	9797.35	9782.65	9757.57
水温 $t/^\circ\text{C}$	40	50	60	80	100
密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38
重度/ $(\text{N}/\text{m}^3)$	9723.95	9683.09	9635.75	9523.94	9392.12

在水力计算中，常取  $4^\circ\text{C}$  纯净水的重度作为水的重度， $\gamma=9800\text{N}/\text{m}^3$ 。

### (三) 黏滞性

#### 1. 黏滞性

黏滞性 (viscosity) 是指液体抵抗剪切变形 (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，液体的这种物理性质称为黏滞性 (或黏性)。

由于液体具有黏滞性，液体在流动过程中，就必须克服流层间的内摩擦力做功，这就是液体运动必然要损失能量的根本原因。因此，液体的黏滞性在水动力学研究中具有十分重要的意义。

#### 2. 动力黏滞系数

1686 年，著名科学家牛顿做了如下实验：在两层很大的平行平板间夹一层很薄的液体 (图 1-1)，将下层平板固定，而使上层平板运动，则夹在两层平板间的液体发生了相对运动。

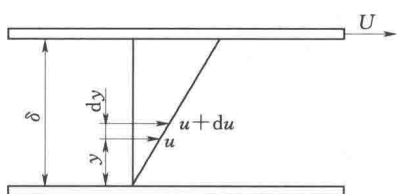


图 1-1

实验发现，两层平板间液体的内摩擦力  $F$ ，与接触面积  $A$  成正比，与液体相对运动的速度梯度  $\frac{U}{\delta}$  成正比。因平板间距  $\delta$  很小，可认为液体速度呈线性分布，其表达式为

$$F \propto A \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

引入比例系数  $\mu$ ，可将上式写成等式

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

这就是著名的牛顿内摩擦定律。

式 (1-6) 中  $\mu$  称为动力或动力黏滞系数 (黏度) (dynamic viscosity)。 $\mu$  值大小与液体种类和温度有关，黏滞性大的液体  $\mu$  值高，黏滞性小的液体  $\mu$  值低。

牛顿内摩擦定律，也可用单位面积上的内摩擦力  $\tau$  来表示：

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

可以证明：流速梯度  $\frac{du}{dy}$  实质上代表液体微团的剪切变形速率。

如图 1-2 所示，从图 1-1 中将相距为  $dy$  的两层液体 1-1 及 2-2 分离出来，取两层间矩形微团  $ABCD$ ，经过  $dt$  时段后，该液体微团运动至  $A'B'C'D'$ 。因液层 2-2 与液层 1-1 间存在流速差  $du$ ，微团除平移运动外，还有剪切变形，即由矩形  $ABCD$  变成平行四边形  $A'B'C'D'$ 。 $AD$  或  $BC$  都发生了角变位

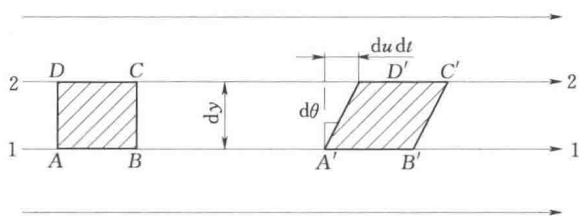


图 1-2

$d\theta$ ，其角变形速率为  $\frac{d\theta}{dt}$ 。因为  $dt$  为微分时段， $d\theta$  也为微量，可认为

$$d\theta \approx \tan(d\theta) = \frac{du dt}{dy}$$

故

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$$

因此，式 (1-7) 又可写成

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-8)$$

表明黏滞性也是液体抵抗角变形速率的能力。

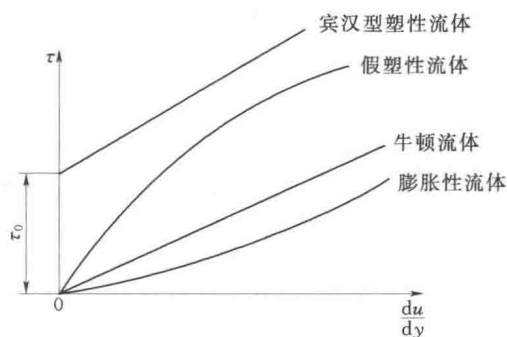


图 1-3

牛顿内摩擦定律只适用于一般流体，对于某些特殊流体是不适用的。一般把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，如水、空气、汽油、煤油、甲苯、乙醇等，不符合的叫作非牛顿流体，如接近凝固的石油、聚合物溶液、含有微粒杂质或纤维的液体（如泥浆）等。它们的差别可用图 1-3 表示。本教材仅讨论牛顿流体。

$\mu$  的单位为牛顿·秒/米<sup>2</sup> ( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ) 或帕斯卡·秒 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )，或称之为“泊司”，其

单位换算关系为

$$1 \text{ “泊司”} = 0.1 \text{ 牛顿} \cdot \text{秒}/\text{米}^2$$

动力黏度的量纲： $[\mu] = [\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}]$ 。

### 3. 运动黏滞系数

液体的黏滞性还可以用  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  来表示， $\nu$  称为运动黏滞系数或运动黏度 (kinematic viscosity)，其单位是米<sup>2</sup>/秒 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )，过去习惯上把 1 厘米<sup>2</sup>/秒 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) 称为 1 “斯托克斯”，其换算关系为

$$1 \text{ “斯托克斯”} = 0.0001 \text{ m}^2/\text{s}$$

运动黏度的量纲： $[\nu]=[L^2T^{-1}]$ 。

水的运动黏滞系数  $\nu$  可用下列经验公式计算：

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-9)$$

其中  $t$  为水温，以  $^{\circ}\text{C}$  计； $\nu$  以  $\text{cm}^2/\text{s}$  计。为了使用方便，在表 1-3 中列出不同温度时水的  $\nu$  值。

表 1-3 不同水温时水的  $\nu$  值

温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	2	4	6	8	10	12
$\nu/(\text{cm}^2/\text{s})$	0.01775	0.01674	0.01568	0.01473	0.01387	0.01310	0.01239
温度/ $^{\circ}\text{C}$	14	16	18	20	22	24	26
$\nu/(\text{cm}^2/\text{s})$	0.01176	0.0118	0.01062	0.01010	0.00989	0.00919	0.00877
温度/ $^{\circ}\text{C}$	28	30	35	40	45	50	60
$\nu/(\text{cm}^2/\text{s})$	0.00839	0.00803	0.00725	0.00659	0.00603	0.00556	0.00478

任何实际液体都具有黏滞性，因此液体在流动过程中，就必须克服黏滞阻力做功损失能量。黏滞性的存在会使液流具有不同于理想流体的流速分布，并使相邻两层运动液体之间、液体与边界之间除压强外还相互作用着切向力（或摩擦力），此时低速层对高速层的切向力显示为阻力。而在克服阻力做功过程中就会将一部分机械能不可逆地转化为热能而散失，形成能量损失。单位重量液体的机械能损失称为水头损失（详见项目四）。故黏滞性在水动力学研究中具有十分重要的意义。

在水力计算中，有时为了简化分析，对液体的黏滞性暂不考虑，而引出没有黏滞性的理想液体模型。在理想液体模型中，动力黏滞系数  $\mu=0$ 。由理想液体模型分析得出的结论，必须对没有考虑黏滞性而引起的偏差进行修正。

#### （四）压缩性和膨胀性

压强增高时，分子间的距离减小，液体宏观体积减小，这种性质称为压缩性（compressibility），也称弹性（elasticity）。温度升高，液体宏观体积增大，这种性质称为膨胀性（expansibility）。

液体的压缩性大小可用体积压缩系数  $\beta$  或体积弹性系数  $K$  来量度。设压缩前的体积为  $V$ ，压强增加  $\Delta p$  后，体积减小  $\Delta V$ ，体应变为  $\frac{\Delta V}{V}$ ，则体积压缩系数为

$$\beta = -\frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad (1-10)$$

当  $\Delta p$  为正时， $\Delta V$  必为负值，故上式右端加一负号，保持  $\beta$  为正数。 $\beta$  的单位为  $\text{米}^2/\text{牛顿}$  ( $\text{m}^2/\text{N}$ )，量纲为  $[\beta]=[\text{M}^{-1}\text{LT}^2]$ 。

体积弹性系数  $K$  是体积压缩系数  $\beta$  的倒数，即

$$K = \frac{1}{\beta} = - \frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (1-11)$$

其单位为牛顿/米<sup>2</sup> (N/m<sup>2</sup>), 量纲为 $[K] = [ML^{-1}T^2]$ 。

液体种类不同, 其 $\beta$ 或 $K$ 值不同。同一液体,  $\beta$ 或 $K$ 随温度和压强而变化, 但变化不大。因此, 液体并不完全符合弹性体的胡克定律。

在一般工程设计中, 水的体积弹性系数 $K$ 可近似地取为 $2 \times 10^9$  Pa。此值说明, 若 $\Delta p$ 为一个大气压,  $\frac{\Delta V}{V}$ 约为2万分之一, 因此, 在 $\Delta p$ 不大的条件下, 水的压缩性可以忽略, 相应地, 水的密度和重度可视为常数。但在讨论管道水击问题时, 则要考虑水的压缩性。

至于气体, 它的压缩性和膨胀性要比液体大。但是在一定的条件下, 如在距离不太长的输气系统中, 若各点气体流速远小于音速, 则气体压缩性对气流流动的影响也可以忽略, 也就是说, 这时的气体也可视为不可压缩的。

总之, 在可以忽略液体或气体压缩性时, 引出“不可压缩液(流)体模型”, 可使分析简化。

水力学一般不考虑水的膨胀性。

#### (五) 表面张力

表面张力(surface tension)是指液体表面在分子作用半径内的一薄层分子, 由于引力大于斥力而在液体表层沿表面方向产生的拉力。表面张力的大小可用表面张力系数 $\sigma$ 来量度。 $\sigma$ 是液体表面上单位长度上所受的拉力, 单位为牛顿/米(N/m), 量纲为 $[\sigma] = [MT^{-2}]$ 。

$\sigma$ 值随液体种类和温度而变化, 对20℃的水,  $\sigma$ 值为0.074N/m, 水银的 $\sigma$ 值为0.54N/m。

液体的表面张力很小, 在水力学计算中一般不考虑它的影响, 但在某些情况下, 它的影响也是不可忽略的, 如微小液滴(如雨滴)的运动、水深很小的明渠水流和堰流等。

在水力学实验中, 经常使用盛水或水银的细玻璃管做测压管, 由于表层液体分子与固壁分子的相互作用会发生毛细现象, 如图1-4所示。

对20℃的水, 玻璃管中的水面高出容器水面的高度 $h$ (单位: mm)约为

$$h = \frac{29.8}{d}$$

对水银, 玻璃管中水银面低于容器水银面的高度 $h$ (单位: mm)约为

$$h = \frac{10.5}{d}$$

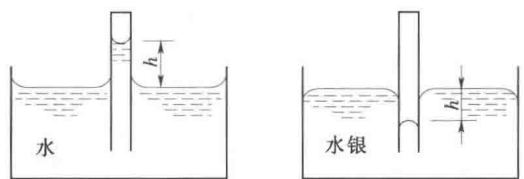


图 1-4

上面二式中的  $d$  为玻璃管的内径，以 mm 计。由于毛细管现象的影响，使测压管读数产生误差。 $h$  称为毛细影响高度 (capillarity suction head)。因此，通常测压管的直径不小于 1cm。

## 任务三 连续性介质假设和理想液体的概念

### 一、连续性介质假设

#### (一) 液体的均质等向性

液体是由分子组成的。从微观角度看，液体分子之间具有空隙，并且在进行着重复的微观运动，是不连续、不均匀的。由于水力学研究的是液流的宏观机械运动，并不关心液体分子的微观运动，所以在水力学中引入了液体具有连续性的假说，即认为液体是由液体质点所组成的中间没有空隙存在的连续介质。这样就可以运用数学中的连续函数来分析水力学问题。

液体质点是由很多分子组成的、无微观运动、体积很小、可以忽略不计的小水团，它是水力学研究的液体的最小单位。这样，在水力学研究中一般认为液体具有均匀等向性，即认为液体的各个部分和各个方向的物理性质是一样的。

#### (二) 液体的连续性介质假设

液体的连续介质假说，就是认为液体是由许多微团——质点组成（每个质点包含无穷多个液体分子），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。即认为液体是一种无间隙地充满所在空间的连续介质。

#### (三) 连续函数的数学理论在分析水流运动规律时的意义

液体同任何物质一样，都是由分子组成，分子与分子之间是不连续而有空隙的。水力学研究的是液体在外力作用下的机械运动（宏观运动），由于液体分子之间的间隙极其微小，因此，在水力学中，把液体当作连续介质看待，即假设液体是一种连续充满其所占据空间毫无空隙的连续体。根据连续介质的假设，则液流中的一切物理量（如速度、压强、密度等）都可以视为空间坐标和时间的连续函数，这样，我们在研究液体运动规律时，就可以利用连续函数的分析方法。

### 二、理想液体的概念

由于黏滞性的存在，使得对液体运动的分析变得非常复杂，为了简化问题分析，我们引入了“理想液体”的概念。所谓“理想液体”，就是把水看作是绝对不可压缩、不能膨胀、没有黏滞性、没有表面张力的连续介质 ( $\mu=0$ )。当流体发生剪切变形时总会伴有黏性应力。黏性应力不仅与流体的黏性性质（以黏滞系数表征）有关，还依赖于速度梯度，对于低黏（小）流体的流动，如果速度的空间变化不太急剧，黏性应力就比较小。如果黏性应力对所研究的流动问题影响较小，可以忽略流体的黏性，认为液体是无黏性的，即理想流体。一般常见的流体，如空气和水，其黏性系数很小，在自然界和工程中遇到的大多数流体流动，其黏性的影响都可以忽略，都可以近似看作是

理想流体。

## 任务四 作用于液体上的力

液体的机械运动是由外力作用引起的，外力是液体机械运动的外因，液体的物理力学特性是其内因。作用在液体上的力，按其物理性质分，有重力、摩擦力、惯性力、弹性力、表面张力等，但在水力学中分析液体运动时，主要是从液体中分出一封闭表面所包围的液体，作为隔离体来分析。从这一角度出发，可将作用在液体上的力分为表面力和质量力两大类。

### 一、表面力 (surface force)

作用在液体表面上的力称为表面力，是相邻液体或与其他物体壁面相互作用的结果。根据连续介质的概念，表面力连续分布在隔离体表面上，因此在分析时常采用应力的概念：与作用面正交的应力称为压应力或压强，与作用面平行的应力称为切应力。

压强  $p$  垂直于作用面：

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-12)$$

切应力平行于作用面：

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-13)$$

上二式中， $\Delta P$  为作用面上的法向压力， $\Delta T$  为切向力， $\Delta A$  为受压面积。

在静止液体中，液体间没有相对运动，即  $\frac{du}{dy} = 0$ 。在理想液体中， $\mu = 0$ ，则  $\tau = 0$ ，则作用在  $\Delta A$  上的力就只有法向力  $\Delta P$ 。

在国际单位制中， $\Delta P$  及  $\Delta T$  的单位是牛顿 (N)，简称牛。 $p$  及  $\tau$  的单位是牛/米<sup>2</sup> (N/m<sup>2</sup>)，或称为帕斯卡 (Pa)，简称帕，其量纲： $[p] = [\tau] = [ML^{-1}T^{-2}]$ 。

### 二、质量力 (mass force)

质量力是指作用在隔离体内每个液体质点上的力，其大小与液体的质量成正比，最常见的是重力；此外，对于非惯性坐标系，质量力还包括惯性力。

质量力常用单位质量力来量度。若隔离体中的液体是均质的，其质量为  $m$ ，总质量力为  $F$ ，则单位质量力  $f$  为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-14)$$

总质量力在坐标上的投影分别为  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ，则单位质量力在相应坐标的投影为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 。



$$X = \frac{F_x}{m}$$

$$Y = \frac{F_y}{m}$$

$$Z = \frac{F_z}{m}$$

即 
$$\vec{f} = X \vec{i} + Y \vec{j} + Z \vec{k}$$

单位质量力具有加速度的单位： $\text{m/s}^2$ ；单位质量力的量纲： $[f] = [\text{LT}^{-2}]$ 。

## 任务五 水力学的研究方法

目前，水力学的研究方法主要有理论分析法、科学实验法、数值模型计算法和量纲分析法等四种。

### 一、理论分析法

理论方法是通过对液体物理性质和流动特性进行科学抽象（近似），提出合理的理论模型。对这样的理论模型，根据机械运动的普遍规律，建立控制液体运动的闭合方程组，将原来的具体流动问题转化为数学问题，在相应的边界条件和初始条件下求解。理论研究方法的关键在于提出理论模型，并能运用数学方法求出理论结果，达到揭示液体运动规律的目的，但由于数学上的困难，许多实际流动问题还难以精确求解。

理论分析的一般过程是，建立力学模型，用物理学基本定律推导水力学数学方程，用数学方法求解方程，检验和解释求解结果。理论分析结果能揭示流动的内在规律，具有普遍适用性，但分析范围有限。

### 二、科学实验法

水力学是一门理论和实践紧密结合的基础学科，它的许多实用公式和系数都是由实验得来的。至今，工程中的许多问题，即使能用现代理论分析与数值计算求解的，最终还要借助实验来检验和修正。

实验研究的一般过程是，在相似理论的指导下建立模拟实验系统，用流体测量技术测量流动参数，处理和分析实验数据。

实验结果能反映工程中的实际流动规律，发现新现象，检验理论结果等，但结果的普适性较差。

### 三、数值模型计算法

数值模型计算方法是在计算机应用的基础上，采用各种离散化方法（如有限差分法、有限元法等），建立各种数值模型，通过计算机进行数值计算和数值实验，得到在时间和空间上许多数值组成的集合体，最终获得定量描述流场的数值解。

数值研究的一般过程是，对水力学数学方程作简化和数值离散化，编制程序进行数值