

国家骨干高职院校建设项目教材

水力计算与测试技术

主 编 张 劲 杨栗晶

副主编 刘秀珍 朱三华

主 审 叶佩兰



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

考 试 参 考

国家骨干高职院校建设项目教材

水力计算与测试技术

主 编 张 劲 杨栗晶

副主编 刘秀珍 朱三华

主 审 叶佩兰



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

《水力计算与测试技术》是国家骨干高等职业院校建设规划教材。本书是根据国家骨干高等职业院校建设项目水利水电建筑工程和水政水资源管理重点建设专业人才培养方案要求,按照《水力计算与测试技术》课程教学标准编写。全书共有 10 个学习项目,主要包括静水压强分析与计算、水流运动的一般分析及连续性原理应用、水流运动的能量守恒及其转化原理应用、水流作用于水工建筑物上的力及动量定律应用、有压管道水力分析与计算、明渠恒定流水力分析与计算、堰流水力分析与计算、闸孔出流水力分析与计算、泄水建筑物下游水流衔接与消能和水利测试技术基础。

本书可作为高职高专水利类、土建类专业教学用书,也可供成人教育学院师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力计算与测试技术 / 张劲, 杨栗晶主编. — 北京:
中国水利水电出版社, 2013. 12
国家骨干高职院校建设项目教材
ISBN 978-7-5170-1582-6

I. ①水… II. ①张… ②杨… 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(2013)第318379号

书 名	国家骨干高职院校建设项目教材 水力计算与测试技术
作 者	主编 张劲 杨栗晶 副主编 刘秀珍 朱三华 主审 叶佩兰
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 (发行部)
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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 13.75 印张 326 千字
版 次	2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书是国家骨干高等职业院校建设项目中重点建设专业——水利水电建筑工程专业和水政水资源管理专业课程改革系列教材。

全书共有 10 个学习项目，主要包括静水压强分析与计算、水流运动的一般分析及连续性原理应用、水流运动的能量守恒及其转化原理应用、水流作用于水工建筑物上的力及动量定律应用、有压管道水力分析与计算、明渠恒定流水力分析与计算、堰流水力分析与计算、闸孔出流水力分析与计算、泄水建筑物下游水流衔接与消能和水力测试技术基础。

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、财政部关于启动 2011 年度“国家示范性高等职业院校建设计划”骨干高职学校项目建设工作的通知》（教职成厅函〔2011〕44 号）等文件精神，本教材在编写过程中注重高职高专人才培养目标及其教学特点，以水利行业有关技术规范为依据，以实际水利工程案例为载体组织教材内容，构建学习项目，突出了学生水力计算与水力测试技能培养，加强了针对性和实用性，体现了高职教育的特色。

本书由广东水利电力职业技术学院张劲、杨栗晶任主编，刘秀珍、朱三华任副主编，叶佩兰主审。张劲编写绪论、项目一、项目二、项目三、项目四、项目七，杨栗晶编写项目五、项目六、项目九、项目十，刘秀珍编写项目二、项目十，中水珠江规划勘测设计有限公司朱三华编写项目八。

本书在编写过程中，得到有关兄弟院校和单位同行的帮助，同时，本书参考了国内同行的著作、教材及相关文献资料，在此一并表示感谢！

随着课程改革的不断深入，我们将在试用的基础上进一步对这本教材进行修订。由于水平有限，书中疏漏及不足在所难免，恳请广大读者批评指正（Email: shuilx@126.com）。

编者

2013 年 10 月

目录

前言

绪论	1
技能训练题	8
项目一 静水压强分析与计算	10
任务一 静水压强分析	10
任务二 静水压强的基本规律	11
任务三 静水压强的表示方法	15
任务四 压强的测算	17
任务五 静水压强分布图	20
技能训练题	20
项目二 水流运动的一般分析及连续性原理应用	23
任务一 水流运动的一般分析	23
任务二 恒定总流连续性原理及应用	28
技能训练题	31
项目三 水流运动的能量守恒及其转化原理应用	33
任务一 恒定总流的能量方程	33
任务二 能量方程的讨论	37
任务三 能量损失的分析与计算	41
技能训练题	58
项目四 水流作用于水工建筑物上的力及动量定律应用	61
任务一 水工建筑物壁面静水总压力计算	61
任务二 恒定总流的动量方程和动水作用力计算	69
技能训练题	74
项目五 有压管道水力分析与计算	78
任务一 简单短管水力分析与计算	78
任务二 简单长管水力分析与计算	81
任务三 管径的确定	84
任务四 管道中水流压强的沿程分布	84

任务五 虹吸管水力分析与计算	85
任务六 水泵装置水力分析与计算	87
任务七 倒虹吸管水力分析与计算	90
任务八 有压隧洞水力分析与计算	90
任务九 复杂管道水力分析与计算	93
任务十 管网水力分析与计算	97
任务十一 水击压强分析与计算	103
技能训练题	109
项目六 明渠恒定流水力分析与计算	112
任务一 明渠均匀流水力分析	112
任务二 明渠均匀流输水能力及断面尺寸设计	122
任务三 无压圆管均匀流水力分析与计算	127
任务四 明渠非均匀流水力分析与计算	130
任务五 水跃与水跌的水力分析与计算	139
任务六 明渠非均匀流水面曲线分析与计算	144
技能训练题	154
项目七 堰流水力分析与计算	157
任务一 堰流水力分析	157
任务二 薄壁堰流水力计算	159
任务三 宽顶堰流水力计算	161
任务四 实用堰流水力计算	166
技能训练题	171
项目八 闸孔出流水力分析与计算	173
任务一 底坎为宽顶堰型的闸孔出流水力分析与计算	174
任务二 底坎为曲线形实用堰的闸孔出流水力分析与计算	179
技能训练题	179
项目九 泄水建筑物下游水流衔接与消能	181
任务一 泄水建筑物下游消能水力分析	181
任务二 底流消能水力分析与计算	182
任务三 挑流消能水力分析与计算	190
技能训练题	195
项目十 水力测试技术基础	196
任务一 水力测试技术初步	196
任务二 静水压强的量测	203

任务三	管流水头线的绘制	205
任务四	点流速的测定	205
任务五	动量修正系数的测定	206
任务六	运动水流流态的观测	208
任务七	沿程水头损失与速度关系曲线的绘制	209
任务八	局部水头损失系数的测定	209
任务九	堰流流量系数的测定	211

绪 论

一、课程的研究对象与任务

开卷研读，初学者首先会想到《水力计算与测试技术》是怎样一门课程，从事水利工程的技术工作者为什么要学习它呢？这正是下面要说明的问题。

古代中国有大禹治水、疏通江河战胜洪水的传说；秦代修建了都江堰、郑国渠、灵渠三大水利工程，特别是李冰父子领导修建的都江堰，既有利于岷江洪水的疏排，又能常年用于灌溉农田，并总结出“深淘滩，低作堰”、“遇弯截角，逢正抽心”的治水原则；明代的潘季驯提出了“筑堤防溢，建坝减水，以堤束水，以水攻沙”和“借清刷黄”的治黄原则。此外，在中国古代，人们以水为动力的简单机械也有了长足的发展，如用水轮提水或利用水能通过简单的机械传动去碾米、磨面等。这些都说明人类在改造自然的长期斗争中，特别是在除水害、兴水利等生产活动中，通过反复实践总结，逐步认识了液体机械运动的各种规律，并掌握了各种水力计算方法和水力测试技术。

《水力计算与测试技术》课程主要研究以水为代表液体的机械运动规律和实际工程应用。这个简单的定义概括了3个含义：①虽以水为研究对象，但其基本原理同样适用于一般常见的液体和可以忽略压缩性影响的气体；②研究的内容是液体的机械运动规律；③研究的目的在于应用。

本课程是水利类专业的一门重要技术基础课，它是连接前期基础课程和后续专业课程的桥梁。其教学内容主要包含静水压强分析与计算、水流运动的一般分析及连续性原理应用、水流运动的能量守恒及其转化原理应用、水流作用于水工建筑物上的力及动量定律应用、有压管道水力分析与计算、明渠恒定流水力分析与计算、堰流水力分析与计算、闸孔出流水力分析与计算、泄水建筑物下游水流衔接与消能和水力测试技术基础。

发达的经济要有发达的水利作为保障。未来的水利工作者们应该胸怀远大目标，刻苦学习，开拓创新，争取优异的成绩，为发展我国的经济建设和水利事业而努力奋斗。

下面首先来了解水利工程中有哪些常见的水力计算问题。例如，为了满足防洪、发电和灌溉的需要，要在河道上修建大坝、厂房等水工建筑物拦蓄河水，形成水库。在水库蓄水后，大坝要承受很大的水压力，所以为了设计坝体断面和校核坝的稳定性，就必须计算上、下游的水对坝体的作用力。同时，由于水库水位高于坝下游水位，水库中的水可能通过坝基土壤或岩石中的缝隙向下游渗漏，形成渗流。校核坝体稳定性时，就必须计算渗流对坝底的作用力，同时还应考虑渗流可能对坝基的破坏作用。

要泄洪，通常设有溢流坝。对于溢流坝，必须计算需要多大的溢流孔尺寸才能通过溢流坝的设计流量（流量是单位时间内流过某一过水断面的水体体积），这就是溢流坝过水能力的计算。



当溢流坝泄洪时,由于上、下游水位差较大,水库的水经由溢流坝坝面泄至下游时,往往具有较大的流速,可能冲刷和破坏下游河床及岸坡,甚至危及坝身安全。因此,必须采取措施,减轻对下游河床和岸坡的冲刷破坏,这就是溢流坝下游水流的消能问题。

河道中筑坝后,抬高了坝上游河道中的水位,可能淹没河道两岸的部分农田、乡村和城镇,并使两岸地下水水位相应升高,影响作物生长等。为了正确估计筑坝后水库的淹没范围,必须计算坝上游河道水位沿流程的变化。这就是河道水面曲线的计算。而对于溢流陡槽,也需要计算进口段及槽身的水面线,以确定陡槽边墙高度。

尽管这些水力计算问题各不相同,但可以把它们大致归纳为以下几个方面:

- (1) 水对水工建筑物的作用力问题,如闸门、坝身、闸身、管壁上的静水作用力和动水作用力问题。
- (2) 水工建筑物的过水能力和尺寸问题,如溢洪道、管道、水闸和渠道的过水能力问题。
- (3) 水工建筑物下游水流的消能问题,如溢洪道、水闸、隧洞、涵洞、陡槽和跌水下游水流的消能问题。
- (4) 河渠的水面曲线问题,如河道、渠道、溢洪道和陡槽中的水面曲线问题。
- (5) 水工建筑物的渗流问题。

以上这些问题,彼此不是孤立的,也不是水力计算的全部问题。此外,还有一些特殊的水力计算问题,比如挟沙水流、高速水流、波浪运动、水资源的污染等。要解决上述水力计算问题,就必须研究水流运动的基本规律。

二、研究方法

水力计算与测试技术课程是为解决工程实际问题服务的。理论分析在建立液体运动的一般规律方面已比较成熟,但由于实际水流的复杂性,许多问题要想完全由理论分析的方法来解决还存在较多困难。因此,本课程常采用理论分析与实验研究紧密结合的方法,两者相互补充、相辅相成。

三、连续介质的概念

众所周知,一切物质都是由分子构成的。组成物体的分子都是离散的、不连续的,其运动状态是随机的呈不均匀状态。这给运用高等数学微积分方法来分析讨论液体的运动带来了困难,因为微积分运算的必要条件是连续性。

由于 1cm^3 的水中就有 3×10^{22} 个水分子,水分子间的距离为 $3 \times 10^{-8}\text{cm}$,所以采用由微观到宏观的研究方法来研究液体的运动是不现实的。由于水力学研究的是液体的宏观机械运动,如管流、明渠流、闸孔流出及堰流等。分子本身和分子间隙的尺度对于与所研究的水流来说是极其微小的。因此,就可以提出下列假设:液体所占据的空间是由液体质点连续地无空隙地充满的,这种抽象化的液体模型就是连续介质的概念。这样,我们研究的液体运动就是连续介质的连续运动,就可以运用微积分来分析液体运动和建立运动方程,这给我们研究带来极大的方便。



四、液体的主要物理性质

液体的物理性质是决定液体运动状态的内在因素，液体的主要物理性质有惯性、万有引力特性、黏滞性、压缩性及表面张力特性等。

(一) 惯性

惯性是物体保持原有运动状态的性质，任何改变物体的运动状态，都必须克服惯性的作用。质量是物体惯性大小的度量，常以符号 m 表示，质量的标准单位为 g 或 kg 。

单位体积均质液体所具有的质量称为密度，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg/m}^3 \quad (0.1)$$

式中 V ——液体的体积。

非均质液体时任一点密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (0.2)$$

液体的密度随着压强和温度的变化很小，一般可视为常数。水的密度一般为 1000kg/m^3 ，水银的密度一般为 13600kg/m^3 。

(二) 万有引力特性

地球对液体的万有引力称为液体的重量，常用符号 G 表示，其单位为千牛顿 (kN)。

单位体积均质液体所具有的重量称为容重，即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \text{kN/m}^3 \quad (0.3)$$

非均质液体时任一点容重为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (0.4)$$

容重和密度的关系是

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (0.5)$$

式中 g ——重力加速度，和所处维度有关。为简化计算，一般采用 $g = 9.80 \text{m/s}^2$ 。

液体的容重随温度和压强的变化而改变，但这种变化很小，通常可以视作常数。水的容重为 9.8kN/m^3 ，水银的容重为 133.3kN/m^3 ，空气的容重为 0.0118kN/m^3 。

【工程应用实例 0.1】 体积为 1000L 的纯水在 4°C ，一个大气压下的重量和质量各为多少？

【计算过程】

纯水在 4°C 、一个大气压下的密度为 $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ ，

$$m = \rho V = 1000 \times 1 = 1000 (\text{kg})$$

$$G = mg = 1000 \times 9.8 = 9800 (\text{N})$$

(三) 黏滞性

液体具有流动性，静止时不能承受切力抵抗剪切变形。但当液体处于运动状态时，液体质点间存在相对运动，则质点间就要产生内摩擦力，具有抵抗剪切变形的能力，这种性



质即为液体的黏滞性。此内摩擦力称为黏滞力。

从实际液体流动情况可以看出黏滞性的意义和作用。实验表明,明渠断面流速分布是不均匀的,在断面上,表层流速大,靠近渠底的流速小,贴附在渠底面上的质点静止不动,形成了如图 0.1 (a) 所示的断面流速分布曲线。这样,流层间就形成相对运动,如图 0.1 (b) 所示。

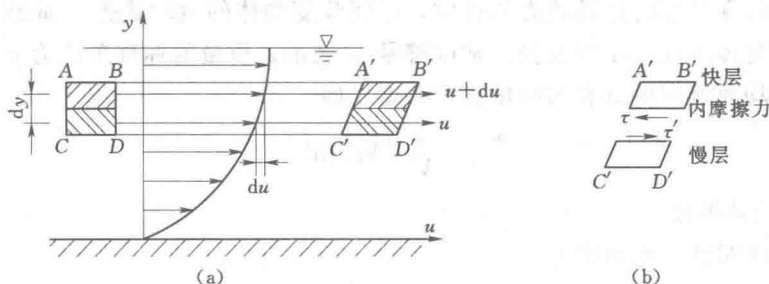


图 0.1

运动快的质点带动较慢的质点,运动较慢的质点阻滞较快的质点,相邻流层接触面上产生相互作用的大小相等而方向相反的成对内摩擦力。

可见,液体的黏滞性是液流质点发生相对运动,产生内摩擦力,引起质点变形,形成液流阻力的重要因素。液体在流动过程中克服内摩擦力必然做功,消耗能量,它是影响液流状态并产生液流机械能损失的根源,是液体固有的物理性质。

做层流运动的液体遵循牛顿内摩擦定律,即

$$F = \mu A \frac{du}{dy} = \mu A \frac{d\theta}{dt} \quad (0.6)$$

单位面积上的内摩擦力称为黏滞切应力,用 τ 表示,即

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (0.7)$$

式中 μ ——动力黏滞系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

$\frac{du}{dy}$ ——流速梯度;

$\frac{d\theta}{dt}$ ——剪切变形速度。

可见,液体中的切应力与剪切变形的速度成正比,这是液体的一个重要特性。而固体在弹性限度内,切应力是与剪切变形的大小成比例的。

黏滞系数 μ 是液体黏滞性的度量。在水力计算中,今后还常用运动黏滞系数 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 表示黏滞性,有

$$\nu = \frac{0.01775 \times 10^{-4}}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (0.8)$$

式中 ν 的单位为 m^2/s 。

一般情况下,黏滞系数受压强变化影响很小,可忽略不计。但温度对黏滞系数的影响



较大,而且对气体和液体的黏滞系数的影响是相反的。这是因为液体的黏性取决于分子间的内聚力,当温度升高时液体分子间的内聚力减小,因此液体的黏性随着温度的增加而减小;但是气体分子间的间距很大,内聚力极小,而分子运动非常剧烈,气体的黏性主要来自分子间的动量交换。当气体的温度升高时,分子运动加剧,分子间的动量交换加大,所以黏性增大。

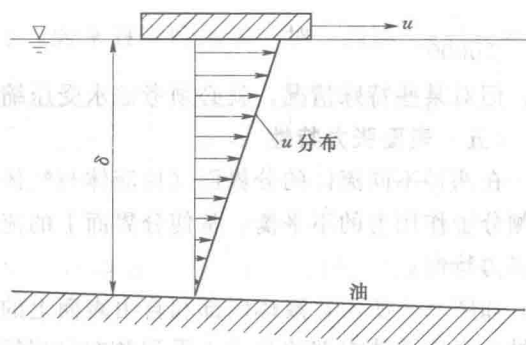
不同温度条件下水的物理性质见表 0.1。

表 0.1 不同温度条件下水的物理性质

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	容重 γ (kN/m^3)	密度 ρ (kg/m^3)	动力黏滞系数 μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	运动黏滞系数 ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	压缩系数 β ($10^{-9}1/\text{Pa}$)	弹性系数 K (10^9Pa)	表面张力系数 σ (N/m)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	0.495	2.02	0.0756
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	0.485	2.06	0.0749
10	9.804	999.7	1.306	1.306	0.476	2.10	0.0742
15	9.798	999.1	1.139	1.139	0.465	2.15	0.0735
20	9.789	998.2	1.002	1.003	0.459	2.18	0.0728
25	9.777	997.0	0.890	0.893	0.450	2.22	0.0720
30	9.764	995.7	0.798	0.800	0.444	2.25	0.0712
40	9.730	992.2	0.653	0.658	0.439	2.28	0.0696
50	9.689	988.0	0.547	0.553	0.437	2.29	0.0679
60	9.642	983.2	0.466	0.474	0.439	2.28	0.0662
70	9.589	977.8	0.404	0.413	0.444	2.25	0.0644
80	9.530	971.8	0.354	0.364	0.455	2.20	0.0626
90	9.466	965.3	0.315	0.326	0.467	2.14	0.0608
100	9.399	958.4	0.282	0.294	0.483	2.07	0.0589

由于黏滞性对液体的影响十分重要而且极其复杂,它使得研究和分析液体的运动规律变得非常困难。为了简化问题,便于从理论上研究和分析液体的运动,引入理想液体的概念,即认为这是一种完全没有黏滞性的液体。这样,可以先按理想液体分析研究液体的运动,从理论上求得其运动规律,借以揭示实际液体运动的概貌和趋势,然后再根据实际液体的具体情况,考虑黏滞性的影响,对理想液体的运动规律进行修正,进一步得到实际液体的运动规律。因此,可以说研究理想液体是研究实际液体的一个台阶。

【工程应用实例 0.2】 一平板在油面上做水平运动,如图 0.2 所示,已知平板的运动速度为 $u=50\text{cm}/\text{s}$,油层厚度为 $\delta=10\text{mm}$,油的动力黏度 $\mu=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。求作





用在平板单位面积上的黏性阻力。

【计算过程】

由牛顿内摩擦定律，有

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

因为油层内流速按直线分布

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

故

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{u}{\delta} = 0.1 \times \frac{50}{1} = 5 (\text{N/m}^2)$$

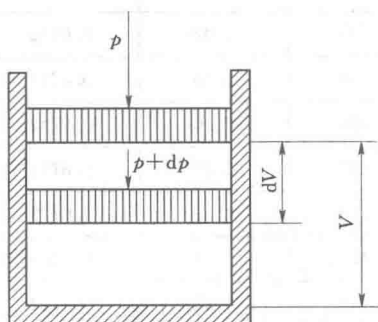


图 0.3

(四) 压缩性

液体受压后体积减小，撤掉压力后又恢复原状的性质称为压缩性。

如图 0.3 所示，设活塞上的压强为 p 时液体的体积为 V ，当活塞上的压强增加 dp 后，液体的体积减小 dV 。将增加单位压强时液体体积的相对缩小值定义为体积压缩系数，即

$$\beta = -\frac{dV}{V dp} \quad \text{m}^2/\text{N} \quad (0.9)$$

β 的单位为 m^2/N ，因为压强增加时 $dp > 0$ ，而体积却减少了 $dV < 0$ ，所以公式等号右边要加上负号才能使 β 恒为正值。对于 20°C 的水，体积压缩系数为 $\beta = 0.459 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{N}$ 。

体积压缩系数的倒数称为体积弹性系数，即

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{dp}{\frac{dV}{V}} \quad \text{Pa} \quad (0.10)$$

对于 20°C 的水， $K = 2.18 \times 10^9 \text{Pa}$ 。 K 越大则表明液体越不容易压缩。

在一般情况下，水的体积压缩量不大，在 10°C 时水的体积弹性系数 $K = 2.10 \times 10^9 \text{Pa}$ 。也就是说，每增加一个大气压（一个大气压为 98kPa ），水体积相对缩小值约为 $\frac{dV}{V} = \frac{1}{20000}$ 。因此，对一般水利工程来说，水的压缩性可忽略不计，认为水是不可压缩的。

但对某些特殊情况，就必须考虑水受压缩后的弹性，如本书中介绍的水击现象。

(五) 表面张力特性

在两种不同流体的分界面（如液体与气体）以及液体同固体的接触面上，由于分界面两侧分子作用力的不平衡，常使分界面上的流体分子间产生一个微小拉力的性质，称为表面张力特性。

如图 0.4 所示，液体内部和自由表面上的分子 1 和分子 2 的受力情况。若忽略分子的重量，由于液体内部的分子 1 受到各方向相等的液体分子引力作用，因此自身处于平衡状态。而自由表面处的分子 2 则只受自由表面下面液体分子的引力作用，致使分子 2 有向下



移动的趋势，并使得表层液体受到相邻分子一个微弱的拉力。这个微弱的拉力有使液面尽可能收缩的性质，且与上述自由表面下液体分子的引力形成平衡。

通常表面张力数值很小，在一般水力计算中都可以忽略表面张力的影响。但当遇到很细的玻璃管、很狭的缝、小液滴、细小泥沙颗粒运动以及水在孔隙介质中运动时，则需要考虑。

我们知道，将细的玻璃管插入水中，水将沿细管上升一定的高度，此现象称为毛细现象。水体沿玻璃管上升的原因是由于玻璃与水体之间的附着力大于水体的内聚力而使液面呈凹形面。对于水银，由于内聚力比附着力大，所以细玻璃管中的水银面呈凸形面，表面张力将产生指向水银内部的附加压强，因而压下一个毛细管高度，如图 0.5 所示。

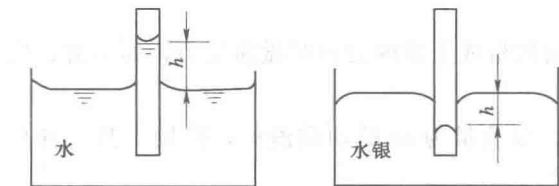


图 0.5

上烧水，由于高原气压低，水温还未达到 100℃ 水就沸腾了。由此可见，形成汽化取决于温度和压强两个因素。在给定的温度条件下，水开始汽化的临界压强（绝对压强）称为水的汽化压强。液体的汽化压强随温度的升高而增大。水的汽化压强随温度的变化情况见表 0.2。

表 0.2 不同温度下水的汽化压强值							
水温 (℃)	0	5	10	15	20	25	30
汽化压强 (kPa)	0.61	0.87	1.23	1.7	2.34	3.17	4.24
水温 (℃)	40	50	60	70	80	90	100
汽化压强 (kPa)	7.38	12.33	19.92	31.16	47.34	70.10	101.33

当液体中某处的压强低于当时温度下的汽化压强时，在此处将产生气泡，该现象称为空化。当空化形成的气泡随流移动到高压区时迅速地破灭。由于气泡破灭过程时间极短，四周水流质点以极大的速度去填充气泡空间，因此将产生巨大的瞬间冲击力作用在相接触的固体壁面上。空化形成的大量气泡不断地流来、破灭，冲击力不断产生，就像锤击一样，不停地敲打着固体壁面，并伴随发出声响，久而久之，便引起材料疲劳破坏使相接触

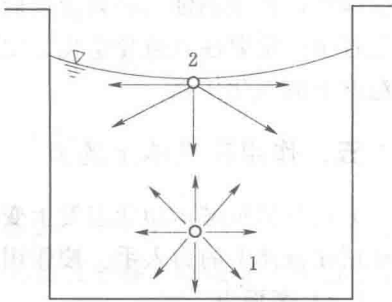


图 0.4

在实验中，常采用测压管进行水力要素测量。在管内径过小（ $d < 10\text{mm}$ ）时，就会引起毛细现象，读数产生误差。

（六）液体的汽化压强

众所周知，在标准大气压强作用下，将水加热到 100℃，水就会沸腾，从液体内部逸出大量蒸汽，形成汽化。但在高原



的固体壁面产生剥蚀,轻则形成麻面、蜂窝,重则造成贯穿的空洞,此现象称为空蚀。水利工程中一定要注意避免空化、空蚀现象的出现,这就要求控制液体中的最低压强大于当时温度下的汽化压强。

五、作用在液体上的力

力是液体机械运动状态发生变化的原因。因此,研究液体机械运动规律,就必须从分析作用在液体上的力入手。按作用方式的不同,可以分为表面力和质量力。

(一) 表面力

作用在液体的表面,并与受作用的液体表面积成正比的力叫做表面力,如黏滞力、压力等。

表面力又可以分为作用在液体表面上的法向力(常称为压力)和切向力(常称为摩阻力)。液体单位面积上所受的压力称为压强,用符号 p 表示,其单位为 Pa;液体单位面积上所受的切向力称为切应力,用符号 τ 表示。

(二) 质量力

作用于液体的每一个质点上,且与液体的质量成正比的力就叫做质量力,如重力、惯性力等。

质量力的大小可以用单位质量力来度量。设质量为 m 的均质液体,作用于其上的总质量力为 F ,则单位质量的质量力 f 为

$$f = \frac{F}{m} \quad \text{m/s}^2 \quad (0.11)$$

若质量力 F 在空间坐标轴上的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ,则单位质量力 f 在相应坐标轴上的投影为 X 、 Y 、 Z ,即

$$X = \frac{F_x}{m}, Y = \frac{F_y}{m}, Z = \frac{F_z}{m} \quad (0.12)$$

单位质量力的单位为 m/s^2 ,与加速度单位相同。

【工程应用实例 0.3】 试写出重力 G 的单位质量力 f 的 3 个投影值 X 、 Y 、 Z 。取 XOY 平面为水平面, Z 轴铅直向上。

【计算过程】

由坐标图可知,有

$$X = \frac{G_x}{m} = 0$$

$$Y = \frac{G_y}{m} = 0$$

$$Z = \frac{G_z}{m} = -\frac{mg}{m} = -g$$

技能训练题

0.1 什么是连续介质?为什么要引进连续介质的假设?



0.2 理想液体与实际液体有什么区别？为什么要引入理想液体的概念？

0.3 液体黏滞性引起的内摩擦力与固体间的摩擦力有何区别？

0.4 体积为 1.5m^3 的水银，试求其重量和密度各为多少？

0.5 体积为 3m^3 的水，温度不变，当压强增加 $4 \times 10^5\text{Pa}$ 时，体积减少了 900cm^3 ，求其体积压缩系数 β 和体积弹性系数 K 。

0.6 两平行板间距 $\delta=0.5\text{mm}$ ，两板间充满密度为 $\rho=850\text{kg/m}^3$ 的液体，下板固定不动，上板在切应力 $\tau=20\text{Pa}$ 的作用下以 $v=0.25\text{m/s}$ 的速度平移。求液体的动力黏滞系数 μ 和运动黏滞系数 ν （流速为直线分布）。

项目一 静水压强分析与计算

液体的平衡状态有两种：一是液体相对地球没有运动，称为静止状态；二是液体相对于地球虽然有运动，但液体质点间以及液体与容器之间都没有相对运动，称为相对静止状态。蓄水池、水库中的水（不流动时）是处于静止状态；沿直线做等速或等加速运动的油罐车中的油则是处于相对静止状态。

当液体处于静止状态时，液体质点间没有相对运动，这时液体内部没有切应力。静止液体质点间的相互作用是通过压强的形式表现出来的。也就是说，静止液体中只存在压应力——压强。

本项目重点围绕压强，提出了静水压强的分析与计算。

任务一 静水压强分析

一、静水压强

游泳时，人站在淹过胸部的水中，会感到胸、背受压。这种现象说明，处于平衡状态的液体，不仅对与其接触的边壁有压力作用，就是在液体内部，一部分液体与相邻的另一部分液体相互之间也存在压力作用。

因为在静止液体中不存在切力，所以只有垂直于受压面的压力。作用在受压面整个面积上的压力称为静水总压力，作用在单位面积上的压力简称压强。

静水中围绕某点取微小面积 ΔA ，作用在 ΔA 上的静水压力为 ΔP ，则 ΔA 面上的单位面积所受的平均静水压强为

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1.1)$$

$\bar{p}$ 称为 ΔA 面上的平均静水压强，它只表示 ΔA 面上受力的平均值，只有在受力均匀的情况下，才能真实反映受压面上各点的水压力状况。通常受压面上的受力是不均匀的，所以必须建立点静水压强的概念。

当微小面积 ΔA 无限缩小趋于一点时，即 ΔA 趋于 0 时，比值 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 趋于某一极限值，该极限值即为该点的静水压强，静水压强以小写英文字母 p 表示，有

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1.2)$$

静水总压力的单位为牛顿（N）或千牛顿（kN），静水压强的单位为牛顿/米²（N/m²）或千牛顿/米²（kN/m²）。牛顿/米² 又称帕斯卡（Pa）。