



“十三五”普通高等教育本科规划教材

# 水力学

李朝明 李 寻 主 编  
王东亮 李俊叶 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



## 内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材，是依据高等学校给排水科学与工程本科专业指导委员会关于水力学课程教学要求而编写的，讲授课时为50~60学时。全书共9章，主要内容包括水静力学，水动力学，流动阻力及其水头损失，量纲分析和相似原理，孔口、管嘴出流和有压管流，明渠流，堰流，渗流。教材覆盖了全国注册土木工程师水力学大纲要求的全部内容。

本书可作为高等院校给排水科学与工程、环境工程专业及土建类各相关专业教材，也可作为勘察设计注册工程师考试的参考用书，还可供从事水力学相关工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水力学/李朝明, 李寻主编. —北京: 中国电力出版社, 2018.8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-1901-9

I. ①水… II. ①李…②李… III. ①水力学—高等学校—教材 IV. ①TV13

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第066443号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 孙 静(63412542)

责任校对: 闫秀英

装帧设计: 赵姗姗

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2018年8月第一版

印 次: 2018年8月北京第一次印刷

开 本: 787毫米×1092毫米 16开本

印 张: 12.75

字 数: 305千字

定 价: 32.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

## 前 言

水力学是给排水科学与工程专业的一门核心专业基础课程，主要研究液体运动的规律及液体与边界的相互作用，在水工程建设中广泛的应用，同时也是高等学校众多工科专业的必修课之一。

本书是依据高等学校给排水科学与工程本科指导性专业规范关于水力学课程教学要求编写的，注重物理概念的阐述及液体现象的分析，以水力学的基本概念、基本原理为主，避免繁琐的数学推导，力求与工程实际相结合。本书主要用于给排水科学与工程专业本科教学，适当兼顾环境工程、土木工程等专业的要求。同时每章精选了思考题和习题，方便学生熟练掌握各知识点。

本书以本科生培养目标和适用于水力学教学目的为总指导思想，在保证基础知识的前提下，精选、吸收现有国内外水力学教材的优点，适当反映学科新发展，力求更具启发性、先进性和教学的适用性。

本书主要介绍水力学的基本概念、基本理论和解决水力学问题的基本方法，内容包括水静力学和水动力学的基础理论，流动阻力与水头损失，孔口、管嘴出流和有压管流，明渠流动，堰流，渗流，量纲分析和相似原理等内容。教材覆盖了全国注册土木工程师水力学大纲要求的全部内容。

本书由李朝明、李寻主编，王东亮、李俊叶副主编。第1、5、7、8、9章由李朝明编写，第2、3章由李寻、李朝明编写，第4章由李俊叶、李朝明编写，第6章由王东亮、李朝明编写。李泽兵、李海林、张艳梅对全书进行了部分文字、图表校对工作。全书由李朝明统编定稿，赵昕主审。

本书在编写过程中得到了中国电力出版社、东华理工大学、华东交通大学、合肥工业大学、华东交通大学理工学院等单位的大力支持，并得到江西省高等学校省级精品资源共享课程水力学教学质量工程项目的支持，在此一并表示由衷的感谢。

由于编者水平所限，错漏和不当之处在所难免，恳请广大读者不吝指正。

编 者

2018年7月

# 目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 水力学的任务及其发展简史	1
1.2 连续介质假定和液体的主要物理性质	3
1.3 作用在液体上的力	10
思考题	11
习题	11
第 2 章 水静力学	13
2.1 静水压强及其特性	13
2.2 液体平衡微分方程	15
2.3 重力作用下液体静力学基本方程	17
2.4 静水压强的表示、量测及分布图	18
2.5 液体的相对平衡	23
2.6 作用在平面、曲面上的静水总压力	25
思考题	32
习题	32
第 3 章 水动力学	39
3.1 描述液体运动的两种方法	39
3.2 液体运动的基本概念	41
3.3 液体运动的连续性方程	44
3.4 理想液体运动微分方程	47
3.5 能量方程	49
3.6 恒定总流动量方程	60
思考题	65
习题	65
第 4 章 流动阻力及其水头损失	68
4.1 流动阻力和水头损失分类及计算公式	68
4.2 层流与紊流	70
4.3 均匀流沿程水头损失的理论分析	75

4.4	液体紊流流动特征	78
4.5	紊流的沿程水头损失	83
4.6	局部水头损失	89
	思考题	98
	习题	98
<b>第5章</b>	<b>量纲分析和相似原理</b>	<b>100</b>
5.1	量纲分析	100
5.2	相似理论基础	106
5.3	模型实验	111
	思考题	113
	习题	113
<b>第6章</b>	<b>孔口、管嘴出流和有压管流</b>	<b>115</b>
6.1	孔口出流	115
6.2	管嘴出流	119
6.3	有压管流	122
6.4	有压管道中的水击	132
	思考题	135
	习题	136
<b>第7章</b>	<b>明渠流</b>	<b>139</b>
7.1	概述	139
7.2	明渠均匀流	142
7.3	无压圆管均匀流	149
7.4	明渠的流动状态与判别	151
7.5	水跃和水跌	159
7.6	棱柱形明渠非均匀渐变流水面曲线分析	162
	思考题	167
	习题	168
<b>第8章</b>	<b>堰流</b>	<b>169</b>
8.1	堰流及其特征	169
8.2	堰流基本公式	172
8.3	薄壁堰流	174
8.4	实用堰流	177
8.5	宽顶堰流	179
	思考题	183
	习题	183

第9章 渗流.....	184
9.1 渗流基本概念.....	184
9.2 渗流基本定律.....	186
9.3 井和井群.....	188
思考题.....	192
习题.....	193

参考文献.....	194
-----------	-----

# 第1章 概 论



## 教学基本要求

明确水力学课程的性质和任务。要求了解液体的基本特征,连续介质和理想液体的概念及在水力学研究中的作用;了解质量力、表面力的定义,单位面积表面力(压强、切应力)和单位质量力的物理意义。重点掌握液体的重力特性、惯性、黏滞性,包括牛顿内摩擦定律及适用条件。理解液体5个主要物理性质的特征和度量方法。



## 学习重点

连续介质和理想液体的概念,液体的基本特征和主要物理性质,液体的黏滞性和牛顿内摩擦定律及其应用条件。

液体及水力学现象充斥在人们日常生活和生产的各个方面,如水的流动、管道内液体的流动、土壤内水分的运动、地球深处熔浆的流动、石油通过地质结构的运动等。水力学是土木工程、城市建筑工程、环境工程、水利工程、机械工程及生物工程等诸多领域研究和应用的最基础的学科之一。因此,从事与液体流动相关的研究和工程应用的技术人员都应该或必须了解水力学的基本原理及应用。

## 1.1 水力学的任务及其发展简史

水力学是高等工科院校很多专业的一门重要专业基础课,它是力学的一个分支,其发展和数学、普通力学的发展密不可分,也是人类长期和自然界斗争的结果,是人类智慧的结晶。

### 1.1.1 水力学的任务

水力学的主要任务是研究液体(主要是水)的平衡和机械运动规律及其实际应用。自然界的物质一般有三种存在形式,即固体、气体和液体。气体和液体统称为流体。在人们的生活和生产活动中随时随地都可遇到流体,所以水力学是与人类日常生活和生产事业密切相关的。大气和水是最常见的两种流体,大气包围着整个地球,地球表面的70%是水。大气运动、海水运动(包括波浪、潮汐、中尺度涡旋、环流等),乃至地球深处熔浆的流动都是流体力学的研究内容。本书主要探讨液体(主要是水)的运动。

水力学研究的对象主要是液体内部及其与相邻固体和其他液体之间的动量、热量及质量的传递和交换规律,这个问题不仅广泛存在于自然界和各种工程技术中,而且随着生产的发展、科学技术的进步和人民生活的改善,不断扩大、充实、更新和提高。

水力学是力学的基本原理在液体中的应用。力学原理包括质量守恒、能量守恒和牛顿运动定律。水力学的基本内容可以分为:研究液体处于平衡状态时的压力分布和对固体壁面作用的液体静力学;研究不考虑液体受力和能量损失时的液体运动速度和流线的液体运动学;

研究液体运动过程中产生和施加在液体上的力和液体运动速度与加速度之间关系的液体动力学。

### 1.1.2 水力学的发展简史

水力学是在人类同大自然作斗争、在长期的生产实践中,通过科学实验逐渐发展起来的。人们最早对流体知识的认识是从治水、供水、灌溉、航行等方面开始的,在远古时代就在诸多方面取得了很大的成就。早在公元前 2000—公元前 1000 年,埃及、古巴比伦、罗马、希腊和印度等地的水利工程、造船和航海等事业的发展就是很好的例证,说明人们在大量的与自然作斗争和生产实践中,对水流运动的规律有了一定的认识。而我们的祖先在水利工程方面也做出过许多杰出的贡献。公元前 300 多年,人们为了消除岷江水患和发展农业生产,在四川成都境内修建了著名的都江堰水利工程,将岷江分为内外两江。在枯水期,由内江满足下游的灌溉用水;在洪水期,由外江泄洪保证下游灌区的安全,由此总结出“深淘滩、低作堰”,说明当时人们对明渠水流和堰流已经有了一定的认识和掌握。由公元前 485 年开始修建直到隋朝才完成的大运河,全长 1782km,运河多处使用的船闸及各段设置的合理性,充分说明了我国劳动人民在建设水利工程领域的聪明才智。这些工程至今仍在农业生产和交通等方面起着重要作用。

西方记录最早从事水力学研究的是古希腊学者阿基米德(Archimedes, 公元前 287—212)著的《论浮体》一书开始的。他第一个阐明了相对密度的概念,发现了各种不同的物体有不同的密度——密度原理;发现了水静力学的基本原理——浮力定律。他证明了任何一种液体的液面,在静止时与地球表面呈同一曲面,此曲面的中心即地心。他的这些著名论断至今仍是水静力学的重要基础。

15 世纪末以来,随着文化、思想及生产力的发展,水力学也与其他学科一起有了显著的发展。著名物理学家和艺术家列奥纳德·达芬奇(Leonardo da-Vinci, 1452—1519)系统地研究了沉浮、孔口出流、物体的运动阻力等问题;促进了这一时期水力学的发展。1687 年,牛顿(Newton, 1642—1727)提出了流体黏性的概念,通过实验建立了流体内摩擦力的确定方法——牛顿内摩擦定律,为黏性流体力学初步奠定了理论基础。1738 年,伯努利(Daniel Bernouli, 1700—1783)对孔口出流和管道流动进行了大量的观察和测量研究,建立了流体位势能、压强势能和动能之间能量转换关系——伯努利方程。欧拉(L.Euler, 1707—1783)可称为理论流体力学的奠基人,他提出了描述无黏性流体的运动方程——欧拉运动微分方程。拉格朗日(Lagrange, 1736—1813)在前人基础上进一步发展了流体力学的解析方法,严格地论证了速度势的存在,并提出了流函数的概念,运用这些概念可将复杂的流体问题转化为纯数学问题。

从 19 世纪起,由于工农业生产的蓬勃发展,大大促进了流体力学的进展。随着生产规模逐渐扩大,技术更为复杂,以纯理论分析为基础的流体力学和以实验研究为主的水力学已不能适用技术发展的需要,因此出现了理论分析和实验研究相结合的趋势,在这种结合的研究中,量纲分析和相似原理起着重要的作用。1883 年,雷诺(O.Reynolds, 1842—1912)通过实验证实了黏性流体的两种流动状态——层流和湍流的客观存在,并得到了判别流态的雷诺数,从而为流动受到的阻力和能量损失的研究奠定了基础。1894 年,雷诺又提出了湍流流动的基本方程——雷诺方程。瑞利(Reyleigh, 1842—1919)的量纲分析法和雷诺、弗劳德(W.Froude, 1810—1879)等人在相似理论方面的贡献,使理论分析和实验研究建立了有机联

系。1904年,普朗特(Prandtl, 1875—1953)提出了边界层理论,通过对层流边界层的研究,形成了层流边界层理论,解决了绕流物体的阻力计算问题。1933年,尼古拉兹(J.Nikuradse)发表的论文中,公布了他对砂粒粗糙管内水流阻力系数的实测结果——著名的尼古拉兹曲线图,对各种人工光滑管和粗糙管的水头损失因素进行了系统的实验研究和量测,为管道的沿程水头损失的计算提供了依据。我国著名科学家钱学森早在1938年发表的论文中,便提出了平板可压缩层流边界层的解法,在空气动力学、航空工程技术等科学领域做出了许多开创性的贡献。

20世纪50年代以来,科学技术的高速发展,特别是计算机技术迅猛发展,使得数值计算技术得到了快速发展,在求解水力学问题中得到了广泛的应用,水力学中数值计算已成为继理论分析和实验研究后的第三种重要的研究方法,是目前针对各种复杂的流体流动问题求解的重要工具。

水力学在很多工程中都有广泛的应用。例如,城市给水工程,一般都是利用水泵从江、河、湖或井中取水,经过处理达标后,再通过管道系统送至各个用水点,有时,为了调节水量负荷等问题,还需要修建水塔、高位水池等。整个工程设计过程中,需要解决大量的水力学问题,如取水口的布置、管道布置、管道直径及水塔高度计算,水泵流量、扬程和井的产水量计算等。在修建铁路、公路、城市地铁等工程时,也需要解决一系列水力学问题,如桥涵孔径设计,站场路基排水设计,隧道通风、排水设计等。因此,必须掌握好液体的各种力学性质和运动规律,才能有效、正确地解决工程实际中所遇到的各种水力学问题。

随着生产的发展,水力学所研究的问题会更加广泛深入,许多石油、化工、能源、环境保护等领域问题都涉及流体力学研究范畴,同这些相邻学科会越来越紧密,形成许多新分支或交叉学科,如计算流体力学、实验流体力学、非牛顿流体力学、化学流体力学、生物流体力学、多相流体力学、渗流力学等。这些新兴学科的出现和发展,使得流体力学这一古老的学科焕发出新的生机和活力。

## 1.2 连续介质假定和液体的主要物理性质

### 1.2.1 液体的连续介质假定

自然界中的所有物质都是由分子构成的,液体也不例外。由于分子间存在间隙,因此从微观上看液体是不连续的,描述液体运动的物理量(如流速、压强等)的空间分布也是不连续的。同时,由于分子的随机热运动,又导致物理量在时间上的不连续性。所以,水力学要研究的并不是个别分子的微观运动,而是研究大量分子组成的宏观液体在外力作用下的宏观运动。因此,在水力学中,取液体微团来作为研究液体的基元。所谓液体微团是一块体积为无穷小的微量液体,由于液体微团的尺寸极其微小,故可作为液体质点看待。这样,液体可看成是由无限多连续分布的液体微团组成的连续介质。

当把液体看成是连续介质后,表征液体性质的密度、速度、压强和温度等物理量在液体中也应该是连续分布的。因此,可将液体的各物理量看作是空间坐标和时间的连续函数,从而就可以引用连续函数的解析方法等数学工具来研究液体的平衡和运动规律,为水力学的研究提供了很大的方便。所以,连续介质假定是水力学中一个根本性的假设。

必须要指出的是,连续介质模型的应用是有条件的,对于某些特殊问题则不适用。例如,

在高空非常稀薄的气体中运动的飞行器，其分子距与设备尺寸可以比拟，不再是忽略不计了。这时连续介质模型就不适用了，必须借助气体分子运动论的微观方法来解决有关问题。本书只研究连续介质的力学规律。

### 1.2.2 液体的主要物理性质

液体的物理性质取决于其分子结构，有些物理性质对液体受力和液体运动有着非常显著的影响，所以学习水力学及工程应用时首先必须了解液体的主要物理性质。本节介绍与液体运动密切相关的主要物理性质。

#### 1. 液体的密度

惯性是液体保持原有运动状态的性质。质量是用来度量物体惯性大小的物理量，质量越大，惯性也就越大。液体和固体一样，也具有质量，通常用密度来表示其特征。

单位体积液体的质量称为液体的密度，以符号  $\rho$  表示，单位是  $\text{kg/m}^3$ 。在连续介质假设的前提下，对于均质液体，其密度的表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

式中  $V$ ——液体的体积， $\text{m}^3$ ；

$m$ ——液体的质量， $\text{kg}$ 。

在工程计算中，常取  $4^\circ\text{C}$  时水的密度  $\rho=1000\text{kg/m}^3$  作为计算值。

表 1.1 列举了水在一个标准大气压条件下，密度随温度的变化。

表 1.1 水的密度

密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	999.87	999.73	998.23	995.67	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38
测定温度 ( $^\circ\text{C}$ )	0	10	20	30	40	50	60	80	100

#### 2. 重力特性

液体处于地球引力场中，它所受的重力是地球对液体的引力。

单位体积液体的重力称为液体的重力密度，以符号  $\gamma$  表示，单位是  $\text{N/m}^3$ ，对于均质液体，其重力密度的表达式为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1.2)$$

式中  $V$ ——液体的体积， $\text{m}^3$ ；

$G$ ——液体的重力， $\text{N}$ 。

由于物体的重力等于质量与重力加速度的乘积，即重力为  $G=mg$ ，故密度与重力密度的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1.3)$$

不同液体的密度和重力密度各不相同，同一种液体的密度和重力密度则随温度和压强而变化。一个标准大气压下，常用液体的密度和重力密度见表 1.2。

表 1.2 常用液体的密度和重力密度（标准大气压下）

名称	水	水银	纯乙醇	煤油	汽油	四氯化碳	海水
密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	1000	13590	790	800~850	679~749	1590.7	1019~1028

续表

名称	水	水银	纯乙醇	煤油	汽油	四氯化碳	海水
重力密度 (N/m <sup>3</sup> )	9807	133318	7745	7848~8338	6659~7345	15600	9993~10082
测定温度 (°C)	4	0	15	15	15	20	15

### 3. 黏滞性

黏滞性是液体所具有的重要属性，是有别于固体的主要物理性质。当液体相对于物体运动时，液体内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力（切向力或剪切力）以反抗相对运动，从而产生了摩擦阻力。这种在液体内部产生内摩擦力以阻抗液体运动的性质称为液体的黏滞性，简称黏性。必须注意的是，只有在液体流动时才会表现出黏性，静止液体不呈现黏性。

早在 1686 年，牛顿根据试验成果首先提出：处于相对运动的两层相邻液体之间的内摩擦力  $T$ ，其大小与液体的物理性质有关，并与流速梯度  $\frac{du}{dy}$  和流层的接触面积  $A$  成正比，而与接触面上的压力无关。其数学表达式为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1.4)$$

式中  $\mu$  为比例系数，在  $A$  和  $\frac{du}{dy}$  相同的条件下黏性越大的液体，其内摩擦力越大，因而  $\mu$  也越大，故可以用  $\mu$  来量度液体的黏性。 $\mu$  称为动力黏度，可简称黏度。在国际单位制中  $\mu$  的单位为牛顿·秒/米<sup>2</sup> (N·s/m<sup>2</sup>) 或帕斯卡秒 (Pa·s)。

若以  $\tau$  代表单位面积上的内摩擦力即切应力，则

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.5)$$

切应力  $\tau$  的单位为 Pa。

式 (1.5) 中  $\frac{du}{dy}$  表示速度沿垂直于速度方向的变化率。为了更好地理解速度梯度的意义，在图 1.1 (a) 中垂直于流动方向的  $y$  轴上任取一边长为  $dy$  的方形流体质点  $acdb$ ，并将它放大，如图 1.1 (b) 所示。由于其下表面的速度  $u$  小于上表面的速度  $u+du$ ，经过  $dt$  时段以后，下表面移动的距离  $udt$  小于上表面移动的距离  $(u+du)dt$ ，因而方形  $acdb$  变形为  $a'c'd'b'$ ，两流层间的垂直连线  $ac$  和  $bd$  在  $dt$  时段里变化了角度  $d\theta$ ，由于  $dt$  是一个微小时段，因此转角  $d\theta$  也很小，所以

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

故

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1.6)$$

可见，速度梯度就是直角变形速度，它是在切应力作用下发生的，故又称剪切变形速度。所以，牛顿内摩擦定律也可以理解为切应力与剪切变形速度成正比。

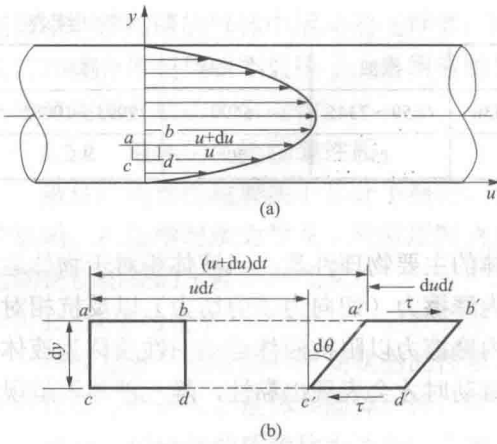


图 1.1 液体质点的剪切变形速度

工程问题中还经常用到动力黏度与密度的比值来表示液体的黏性，其单位是  $\text{m}^2/\text{s}$ ，具有运动学的量纲，故称为运动黏性系数，以符号  $\nu$  表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.7)$$

液体的黏性一般随温度和压强的变化而变化，但实验表明，在低压情况下（通常指低于 100 个大气压），压强的变化对液体的黏性影响很小，一般可以忽略。

温度则是影响液体黏性的主要因素，而且液体和气体的黏性随温度的变化规律是不同的，液体的黏性随温度的升高而减小，气体的黏性则随温度的升高而增大。其原因是黏性取决于分子间的引力和分子间的动量交换。因此，随温度升高，分子间的引力减小而动量交换加剧。液体的黏滞力主要取决于分子间的引力，而气体的黏滞力则取决于分子间的动量交换。所以，液体与气体产生黏滞力的主要原因不同，造成截然相反的变化规律。

表 1.3 列出了水在（一个大气压下）不同温度下的黏性系数。

表 1.3 水的黏性系数（一个大气压下）

温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\mu \times 10^{-3} (\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\mu \times 10^{-3} (\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$
0	1.781	1.785	40	0.653	0.658
5	1.518	1.519	45	0.589	0.595
10	1.300	1.306	50	0.547	0.553
15	1.139	1.139	60	0.466	0.474
20	1.002	1.003	70	0.404	0.413
25	0.890	0.893	80	0.354	0.364
30	0.798	0.800	90	0.315	0.326
35	0.693	0.698	100	0.282	0.294

最后需指出：牛顿内摩擦定律不是对所有液体都适用，有些特殊的液体不满足牛顿内摩擦定律，如人体中的血液、油漆、黏土和水的混合溶液等。这些液体称为非牛顿流体，能满足牛顿内摩擦定律的液体称为牛顿型流体，如水、空气和许多润滑油等。本课程仅涉及牛顿流体的力学问题。

**例 1.1** 长度  $L=1\text{m}$ ，直径  $d=200\text{mm}$  水平放置的圆柱体，置于内径  $D=206\text{mm}$  的圆管中以  $u=1\text{m/s}$  的速度移动，已知间隙中油液的相对密度为 0.92，运动黏度  $\nu=5.6 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ ，求所需拉力  $F$  为多少？

**解** 间隙中油的密度为

$$\rho = \rho_{\text{H}_2\text{O}} d = 1000 \times 0.92 = 920 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

动力黏度为

$$\mu = \rho \nu = 920 \times 5.6 \times 10^{-4} = 0.5152 (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

根据牛顿内摩擦定律

$$F = \mu A \frac{du}{dy}$$

由于间隙很小，速度可认为是线性分布

$$F = \mu A \frac{u-0}{D-d} = 0.5152 \times 3.14 \times 0.2 \times 1 \times \frac{1}{206-200} \times 10^3 = 107.8(\text{N})$$

#### 4. 压缩性和热胀性

液体的压缩性是指在温度不变的条件下，液体的体积随压强的增加而缩小；液体的热胀性是指在压强不变的条件下，液体的体积随温度的升高而增大。

液体的压缩性一般用体积压缩系数或体积弹性模量来度量。在一定温度下，液体原有的体积为  $V$ ，在压强增量  $dp$  作用下，体积改变了  $dV$ ，则体积压缩系数为

$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1.8)$$

式中  $\beta$ ——液体体积压缩系数， $\text{m}^2/\text{N}$ ；

$V$ ——压缩前液体的体积， $\text{m}^3$ ；

$dV$ ——液体体积变化量， $\text{m}^3$ ；

$dp$ ——压强的增加值， $\text{N}/\text{m}^2$ 。

式中的“-”是由于  $dp > 0$ ， $dV < 0$ ，为使压缩系数为正值而加的。

体积压缩系数的倒数为体积弹性模量，用  $E_V$  表示，单位是  $\text{N}/\text{m}^2$ ，即

$$E_V = \frac{1}{\beta} = -V \frac{dp}{dV} \quad (1.9)$$

$\beta$  值越大或  $E_V$  越小，则液体的压缩性也越大。

表 1.4 为  $0^\circ\text{C}$  时水在不同压强下的压缩系数。

表 1.4

水在不同压强下的压缩系数

压强 (kPa)	500	1000	2000	4000	8000
压缩系数 ( $\text{m}^2/\text{N}$ )	$0.538 \times 10^{-9}$	$0.536 \times 10^{-9}$	$0.531 \times 10^{-9}$	$0.528 \times 10^{-9}$	$0.515 \times 10^{-9}$

由表 1.4 可知，水的压缩系数是很小的。例如，压强由  $4000\text{kPa}$  增加到  $8000\text{kPa}$  时，相对体积的变化为

$$-\frac{\Delta V}{V} = \beta \Delta p = 0.515 \times 10^{-9} \times (8000 - 4000) \times 10^3 = 0.21 \times 10^{-2}$$

该数值表明，此时水的相对体积的变化大约为  $0.2\%$ 。所以工程上一般可将液体视为不可压缩的，即认为液体的体积（或密度）与压力无关。但在瞬间压强变化很大的特殊场合（如本书第 6 章讨论的水击问题），则必须考虑水的压缩性。

液体的热胀性一般用体积热胀系数  $\alpha$  来度量。在一定的压力下，液体原有的体积为  $V$ ，当温度升高  $dT$  时，体积变化为  $dV$ ，则热胀系数为

$$\alpha = \frac{dV/V}{dT} \quad (1.10)$$

式中  $\alpha$ ——液体的体积热胀系数,  $1/K$ ;

$V$ ——热胀前液体的体积,  $m^3$ ;

$dV$ ——液体体积变化量,  $m^3$ ;

$dT$ ——温度的增加值,  $K$ 。

水的密度在  $4^\circ C$  时具有最大值, 高于  $4^\circ C$  后, 水的密度随温度升高而下降。液体热胀性非常小, 表 1.5 列举了水在一个大气压下不同温度时的容重及密度。

表 1.5 一个大气压下水的容重及密度

温度 ( $^\circ C$ )	重力密度 ( $N/m^3$ )	密度 ( $kg/m^3$ )	温度 ( $^\circ C$ )	重力密度 ( $N/m^3$ )	密度 ( $kg/m^3$ )	温度 ( $^\circ C$ )	重力密度 ( $N/m^3$ )	密度 ( $kg/m^3$ )
0	9806	999.9	20	9790	998.2	60	9645	983.2
1	9806	999.9	25	9778	997.1	65	9617	980.6
2	9807	1000	30	9775	995.7	70	9590	977.8
3	9807	1000	35	9749	994.1	75	9561	974.9
4	9807	1000	40	9731	992.2	80	9529	971.8
5	9807	1000	45	9710	990.2	85	9500	968.7
10	9805	999.7	50	9690	988.1	90	9467	965.3
15	9799	999.1	55	9657	985.7	100	9399	958.4

由表 1.5 可知, 温度升高  $1^\circ C$  时, 水的密度降低仅为万分之几。因此, 一般工程中也不考虑液体的热胀性。但在热水采暖工程中, 当温度变化较大时, 需考虑水的热胀性, 并应注意在系统中设置膨胀水箱。

一般情况下, 气体的压缩性和热胀性要比液体大, 但是, 具体问题也要具体分析, 对于气体速度较低的情况, 在流动过程中压强和温度的变化较小, 密度仍可以看作常数, 这时的气体可认为是不可压缩的。在供热通风工程中, 所遇到的大多数气体流动, 都可当作不可压缩流体看待。

总之, 在可以忽略液体的压缩性时, 引出“不可压缩液(流)体”的概念, 这是不计压缩性对液体物理性质的简化。对一般的水利工程来说, 认为水不可压缩是足够合理精确的。

### 5. 表面张力

液体具有附着力和黏附力, 两者都是分子的吸引力, 附着力使液体能够附着到另一个物体上, 而黏附力使液体抵抗切向应力。在液体和气体的交界面处和在两种互不相溶液体的界面处, 分子间附着力和黏附力产生的向外的平衡吸引力使液体形成了一个明显的表面液膜并在液膜表面内产生了张力, 液体的这个特性称为表面张力, 用符号  $\sigma$  表示, 其单位是  $N/m$ 。水的表面张力在结冰点和沸点之间的变化范围为  $0.0075 \sim 0.0589 N/m$ 。

对液体来讲, 表面张力在平面上并不产生附加压力, 它只有在曲面上才产生附加压力, 以维持平衡。

在实际工程中, 液体只要有曲面的存在就会有表面张力的附加压力的作用。例如, 液体中的气泡、气体中的液滴、液体的自由射流、液体表面和固体表面相接触等, 所有这些情况, 都会出现曲面, 都会引起表面张力, 从而产生附加压力。不过在一般情况下, 这种影响是比

较微弱的。

由于表面张力的作用,如果把两端开口的玻璃管竖立在液体中,液体就会在细管中上升或下降  $h$  高度,如图 1.2 所示。这种现象称毛细现象,其形成是由于黏附力和附着力的作用。当附着力大于黏附力时,液体将浸润与它接触的固体表面,并在接触点处上升;反之,液体表面在接触点处收缩。毛细现象使作用在玻璃管内的水位上升,使水银收缩并低于实际高度。

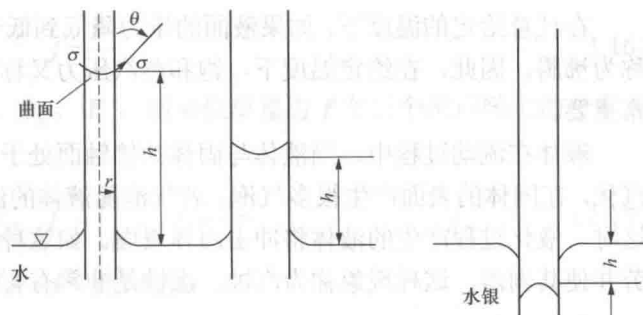


图 1.2 表面张力与毛细现象

管内上升的毛细高度,可由表面张力形成的提升力和重力相平衡得到,即

$$2\pi r\sigma \cos\theta = \pi r^2 h \rho g$$

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g r} \quad (1.11)$$

所以

式中  $\sigma$  ——表面张力, N/m;

$\theta$  ——浸润角, ( $^\circ$ );

$\rho$  ——液体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$r$  ——管半径, m;

$h$  ——毛细高度, m。

式 (1.11) 可以用来计算管内液体上升或下降的毛细高度。如果管子是干净的,水的浸润角为  $0^\circ$ ,水银的浸润角为  $140^\circ$ 。管子的直径越大,毛细高度越小。对于直径大于 12mm 的管子,可以忽略毛细现象。

表面张力的影响在实际工程中是被忽略的,但在水滴和气泡的形成、液体雾化、气液两相流传热与传质的研究中,将是重要不可忽略的因素。

## 6. 汽化压强

所有液体都会蒸发或沸腾,将它们的分子释放到表面外的空间中。这样宏观上,在液体的自由表面就会存在一种向外扩张的压强(压力),即使液体沸腾或汽化的压强,这种压强就称为汽化压强(或汽化压力)。因为液体在某一温度下的汽化压强与液体在该温度下的饱和蒸汽压力所具有的压强对应相等,所以液体的汽化压强又称为液体的饱和蒸汽压强。

分子的活动能力随温度升高而升高,随压力升高而减小,汽化压强也随温度升高而增大。水的汽化压强与温度的关系见表 1.6。

表 1.6

水在不同温度下的汽化压强

温度 ( $^\circ\text{C}$ )	汽化压强 (kPa)	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	汽化压强 (kPa)	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	汽化压强 (kPa)
0	0.61	30	4.24	70	31.16
5	0.87	40	7.38	80	47.34
10	1.23	50	12.33	90	70.10
20	2.34	60	19.92	100	101.33

在任意给定的温度下,如果液面的压力降低到低于饱和蒸汽压力时,蒸发速率迅速增加,称为沸腾。因此,在给定温度下,饱和蒸汽压力又称为沸腾压力,这在涉及液体的工程中非常重要。

液体在流动过程中,当液体与固体的接触面处于低压区,并低于汽化压强时,液体产生汽化,在固体的表面产生很多气泡;若气泡随液体的流动进入高压区,气泡中的气体便液化,这时,液化过程产生的液体将冲击固体表面。如这种运动是周期性的,将对固体表面造成疲劳并使其剥落,这种现象称为汽蚀。汽蚀是非常有害的,在工程应用时必须避免汽蚀。

### 1.3 作用在液体上的力

无论液体处于运动状态还是平衡状态,都是受力作用的结果。因此,在研究液体的运动或平衡规律之前,必须首先分析作用在液体上的力的种类和性质。

在分析液体运动时,通常在液体中取出一段隔离体,这个隔离体是一个封闭表面所包围的一部分液体,将作用在隔离体上的力根据作用方式不同分为表面力和质量力两大类。

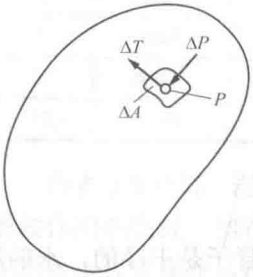


图 1.3 隔离体表面受力分析

若  $\Delta A$  面积无限缩小至  $A$  点,则  $A$  点的压强和切应力为

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1.12)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1.13)$$

若  $\Delta A$  面积无限缩小至  $A$  点,则  $A$  点的压强和切应力为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1.14)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1.15)$$

压强和切应力的国际单位均为 Pa。

#### 1.3.2 质量力

质量力是指作用在隔离体内每个液体质点上的力,其大小是和液体的质量成正比的。在均质液体中,质量力和受作用液体的体积成正比,所以质量力又称为体积力,如重力和惯性力都属于质量力。

设在液体中取一个质量为  $m$  的质点,作用在这个质点上的质量力为  $F$ ,则单位质量力  $f$  为