



普通高等教育“十三五”规划教材

水力学

主 编 杨小林 刘起霞

副主编 黄宗柳 赵 晴 吕文娟 江启峰



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十三五”规划教材

水力学

主编 杨小林 刘起霞
副主编 黄宗柳 赵 晴 吕文娟 江启峰



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书共 13 章, 主要内容包括: 绪论, 水静力学, 液体运动学, 液体动力学基础, 液流流态和水头损失, 孔口、管嘴出流与有压管流, 明渠恒定流, 明渠非恒定流, 堰流、闸孔出流和洞涵过流, 泄水建筑物下游水流的衔接和消能, 渗流, 相似理论与量纲分析, 水力学实验等。本书论述简明, 注意加强理论基础, 注重对学生能力的培养, 便于教学。

本书可作为高等院校水利类、土建类各专业本科和专科教材, 也可供相关专业研究生和有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

水力学 / 杨小林, 刘起霞主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018. 4
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5170-6052-9

I. ①水… II. ①杨… ②刘… 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077588号

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 水力学 SHUILIXUE
作 者	主 编 杨小林 刘起霞 副主编 黄宗柳 赵 晴 吕文娟 江启峰
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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 24.5 印张 581 千字
版 次	2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	56.00 元

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

水力学是研究液体平衡和机械运动规律及其应用的一门学科，它是力学的一个重要分支。在水利类、土建类各专业中，水力学是一门主要的技术基础课。全书以分析水流现象、揭示水流流动规律、加强水力学基本概念和基本原理为主，尽量避免繁琐的数学推导。本书编写上注意遵循“由浅入深、循序渐进、加强基础、理论联系实际、便于教学”的原则，力求结构严谨、重点突出、简明易学。

书中编入一定数量的例题和习题，习题包括选择题和计算题。值得一提的是，本书紧扣前面内容新增两章，分别介绍了实验理论和水力学实验技术。尤其是水力学实验一章，系统地介绍了流动参数测量、流动显示技术、水力学实验等，其中特别介绍了一些新的测试技术和设备，如 PIV、LDV 等。通过本书的学习，读者不仅对水力学理论知识有全面的了解，而且对水力学实验也有较系统的认识，既可加强读者对水流现象的感性认识，又可加强对理论知识的理解学习。

本书具体编写分工如下：西华大学杨小林编写第 3 章、第 4 章、第 13 章，黄宗柳编写第 9 章、第 10 章、第 11 章，吕文娟编写第 1 章、第 2 章，江启峰编写第 12 章；河南工业大学刘起霞编写第 5 章、第 6 章，赵晴编写第 7 章、第 8 章。全书由杨小林统稿审阅，由余波主审。本书的出版得到了西华大学流体及动力机械教育部重点实验室、西华大学流体力学教学团队、西华大学“流体力学立体化教学资源库的建设与共享”教改项目的资助，也得到了西华大学能源与动力工程学院和河南工业大学土木建筑学院的大力支持，在此表示衷心的感谢。

为了配合本书使用，我们制作了配套的教学课件、建设了水力学题库、开放了水力学（流体力学）网络辅助教学平台（网址为 <http://kcx.xhu.edu.cn/G2S/Template/View.aspx?action=view&courseType=0&courseId=11298>）。广大读者可以通过网站浏览大纲、课件、题库试题等，也可开展网上讨论、提

交读者反馈意见。

由于编者学识有限，书中难免有疏漏和不足之处，敬请读者批评指正。

杨小林

二〇一七年九月于西华大学

本书主要介绍了... 杨小林... 水利出版社... 2018.4

水利出版社, 2018.4

ISBN 978-7-5170-0052-9

本书主要介绍了... 杨小林... 水利出版社... 2018.4

水利出版社

本书主要介绍了... 杨小林... 水利出版社... 2018.4

本书主要介绍了... 杨小林... 水利出版社... 2018.4

本书主要介绍了... 杨小林... 水利出版社... 2018.4

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 水力学的研究任务及其发展概况	1
1.2 液体的主要物理性质	4
1.3 液体的三大力学模型	8
1.4 作用在液体上的力	9
习题	10
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	14
2.3 重力作用下静水压强的分布规律	16
2.4 压强的测量	19
2.5 重力和惯性力同时作用下液体的相对平衡	21
2.6 作用于平面壁上的静水总压力	24
2.7 作用于曲面壁上的静水总压力	29
2.8 作用于物体上的静水总压力及潜体与浮体的平衡及其稳定性	32
习题	34
第 3 章 液体运动学	38
3.1 描述液体运动的两种方法	38
3.2 液体运动的相关基本概念	41
3.3 连续性方程	47
3.4 液体微团的运动分析	49
3.5 液体有旋运动简介	54
3.6 液体无旋流动	56
习题	66
第 4 章 液体动力学基础	69
4.1 液体运动微分方程	69
4.2 恒定元流的能量方程	74
4.3 恒定总流的能量方程	76

4.4	能量方程的应用	79
4.5	恒定总流的动量方程	84
4.6	动量方程的应用	86
	习题	90
第5章	液流流态和水头损失	96
5.1	流动阻力与水头损失的分类	96
5.2	均匀流基本方程	98
5.3	液体流动的两种流态——层流与紊流	99
5.4	层流流动	103
5.5	紊流流动	106
5.6	沿程阻力系数的试验研究	111
5.7	局部水头损失	117
5.8	边界层理论基础	124
	习题	133
第6章	孔口、管嘴出流与有压管流	136
6.1	孔口恒定出流	137
6.2	孔口非恒定出流	140
6.3	管嘴恒定出流	140
6.4	短管的水力计算	143
6.5	长管的水力计算	149
6.6	有压管路中的水击	157
	习题	161
第7章	明渠恒定流	164
7.1	明渠的分类	164
7.2	明渠恒定均匀流	166
7.3	明渠恒定非均匀流	178
7.4	水跃和水跌	198
	习题	202
第8章	明渠非恒定流	205
8.1	明渠非恒定流的特性及波的分类	205
8.2	明渠非恒定渐变流的基本方程式	208
8.3	特征线法	213
8.4	直接差分法	220
8.5	明渠非恒定急变流	223
	习题	225

第 1 章 绪 论

教学基本要求:

- (1) 了解水力学的研究任务及其发展概况。
- (2) 掌握液体的基本特性及主要物理性质。
- (3) 理解连续介质模型、理想液体模型及不可压缩液体模型的基本概念。
- (4) 正确分析作用在液体上的力,掌握单位质量力。

1.1 水力学的研究任务及其发展概况

1.1.1 水力学的研究任务

水力学主要研究液体在平衡或运动时所遵循的基本规律及其在实际工程中的应用。水力学属于力学的一个重要分支,它是专门研究水流运动的一门技术学科。近几十年来,随着科技生产的迅速发展,水力学学科发展快速,现代水力学已派生出计算水力学、环境水力学、渗流水力学(或地下水动力学)等新分支。

力学是研究物质受力和运动规律的学科。自然界的物质一般以固体、液体和气体 3 种形式存在。宏观地看,固体有一定的体积和形状,不易变形;液体有一定的体积而无一定的形状,不易压缩,形状随容器形状而变,可有自由表面;气体则既无一定的体积又无一定的形状,容易压缩,气体将充满整个容器,没有自由表面。液体和气体统称为流体。水作为一种流体,在运动过程中表现出与固体不同的特点,其主要差别在于它们对外力的抵抗能力不同。固体由于其分子间距离很小,内聚力很大,能抵抗一定的拉力、压力和剪切力。而流体则不同,由于其分子间距离较大,内聚力较小,几乎不能承受拉力,抵抗拉伸变形,运动的流体具有一定抗剪切的能力,但静止的流体则不能抵抗剪切力,即使在很小的剪切力作用下,静止流体都很容易发生变形或流动,这种特性称为流体的易流动性。流体的易流动性是流体的基本特征。

流体作为物质的一种基本形态,遵循自然界一切物质运动的普遍规律,如牛顿的第二定律、质量守恒定律、动量定理和动量矩定理等。所以,水力学中的一些基本定理实质上都是这些普遍规律在水力学中的具体体现和应用。

水力学在工程中有着十分广泛的应用。如在修筑水坝,修建公路、铁路,开通运河和输水渠道,以及修建桥梁、隧道、地下铁道及房屋等许多土建工程中,需要解决一系列的水力学问题。在给排水工程及建筑设备工程中也要解决一系列的水力学问题。另外,现代水力学在水利、农业、交通、地学、生物学、医学等领域也得到越来越广泛的应用。因此,水力学是高等工科院校多个相关专业的一门重要技术基础课程。

1.1.2 水力学的发展概况

水力学作为一门以应用为目的的学科,是人类逐步认识和掌握自然规律并不断深入生产实践的结晶,其发展与力学、数学、物理学等相关学科密不可分。

1. 古代中国水力学发展

人类社会在以文明为主的早期,对水力学的认识是从治水、灌溉、航运等方面开始的。在中国,相传4000多年前(公元前2070年,夏左右)大禹治水,他采用填堵筑堤、疏通导引方法,治理了黄河和长江。据《庄子·天下篇》所说,大禹“堙(yin)洪水,决江河,而通四夷九州”,治理了“名川三百,支川三千,小者无数”。

春秋战国末期(公元前221年左右)秦国蜀郡太守李冰在岷江中游修建了都江堰,闻名世界的防洪灌溉工程,消除了岷江水患,灌溉了大片土地,使成都平原成为沃野。2000年来,一直造福于人类。都江堰工程采取中流作堰的方法,把岷江水分为内江和外江,内江供灌溉,外江供分洪,这就控制了岷江急流,免除了水灾,灌溉了300多万亩农田。说明当时对堰流理论有一定的认识。

秦始皇二十八年(公元前219年)修建了灵渠,中国沟通长江水系和珠江水系的古运河,又名陡河、兴安运河,在今广西壮族自治区兴安县境内。秦统一六国后,向岭南用兵,秦始皇派监郡御史禄凿灵渠运粮。它沟通了湘江和漓江,由于历代不断增修改进,技术逐步完善,作用日益增大,是2000余年来岭南(今广东、广西)与中原地区的主要交通线路,直至粤汉铁路和湘桂铁路通车。灵渠渠首处用拦河坝壅高湘江水水位,将其一股(今称南渠)通过穿越分水岭的人工渠道引入漓江上源支流,并对天然河道进行扩挖和整治后,入漓江;将另一股(今称北渠)另开新渠于湘江右岸入湘江。

秦始皇元年(公元前246年)韩国水工郑国主持兴建郑国渠,古代关中地区的大型引泾灌区,近代陕西泾惠渠的前身。由于泾水含有大量肥沃的淤泥,灌溉时还可改良盐碱地,故使产量提高。郑国渠的建成直接支持了秦国统一六国的战争。

公元1363年(元末)曾制造了一种计算时间的工具:铜壶滴漏。通过一系列铜壶的小孔时壶中的水位随时间变化规律来计算时间。可见,当时已认识到孔口出流和上游水位间存在一定的关系。明朝潘季驯总结广大人民与黄河水患作斗争的丰富的经验,提出“塞旁决以挽正流,以堤束水,以水攻沙”的治理黄河的措施。可见,当时对流速与过水断面成反比的连续方程一定量的水流能携带一定量的泥沙规律有一定认识。清朝初年我国何梦瑶等人提出用过水断面面积乘以断面流速计算流量的方法。我国人民很早就懂得利用水流的冲力带动水车、水磨等水力机械。

2. 以纯理论分析为基础的古典流体力学

公元前250年诞生了水力学最早的理论,希腊哲学家、物理学家阿基米德(Archimedes,公元前287—前212年)在《论浮体》中论述了液体浮力和浮体的定律。

15世纪文艺复兴时期,意大利物理学家、艺术家列奥纳德·达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452—1519)设计制造小型水渠,系统地研究了物体的沉浮、孔口出流、物体的运动阻力及管道、明渠水流等问题。他还提出水的连续定律,认识到明渠流的边界阻力,还首先提出关于流线型物体、降落伞、风速表、离心泵等设想。达·芬奇在水利方面的著

作有《水的运动与测量》。荷兰科学家斯蒂文 (S. Stevin, 1548—1620), 发表了《水静力学》, 把研究固体的方法用于静止液体中。

17世纪, 法国数学家、物理学家帕斯卡 (B. Pascal, 1623—1662) 提出密闭流体能传递压强的原理——帕斯卡原理, 并利用这一原理制成水压机。水静力学理论得到进一步发展。

1643年意大利物理学家、数学家托里拆利 (E. Torricelli, 1608—1647) 提出了液体孔口出流关系式。

1686年牛顿 (Newton) 提出了关于液体内摩擦的假定和黏滞性的概念, 建立液体内摩擦定律——牛顿内摩擦定律。

1738年伯努利 (D. Bernoulli) 建立了理想液体运动的能量方程——伯努利方程。

1775年欧拉 (L. Euler) 提出了流体的连续介质模型, 建立了理想液体的运动微分方程——欧拉运动微分方程。

1843—1845年纳维尔 (L. M. H. Navier) 和斯托克斯 (G. G. Stokes) 建立了实际液体的运动方程——纳维尔-斯托克斯方程, 奠定了古典流体力学的理论基础, 使它成为力学的一个分支。但古典流体力学采用严格数学分析方法理论上比较严密, 但数学上求解困难或某些假设不能符合实际, 尚难求解大部分实际问题。

1852—1855年法国工程师达西 (H. Darcy) 建立了砂土渗流基本定律。达西着重研究了冲积层中地下水的运动机理。1856年通过沙土渗透试验, 首先提出: 通过试样的流量与试样横断面积及试样两端测压管水头差成正比, 与试样的高度成反比。国际上将此项渗透规律定名为达西定律。

3. 求解各种实际水力学问题的经验方法

为了满足迅速发展的工程技术的需要, 人们通过大量的试验和实地观测, 得到了求解各种实际水力学问题的经验方法, 如法国水利工程师谢才 (A. de Antoine de Chezy, 1718—1798) 在总结了一系列渠道水流实测资料的基础上, 提出了明渠均匀流流速与流量的经验公式——谢才公式, 以后又有确定谢才系数的曼宁公式 (R. Manning)、巴普洛甫斯基公式。1732年毕托 (H. Pitot) 发明了量测水流流速的毕托管。1797年文丘里 (G. B. Venturi) 创造了量测管道流量的文丘里管, 文丘里管是先收缩而后逐渐扩大的管道, 测出其入口截面和最小截面处的压力差, 用伯努利定理即可求出流量。

4. 现代流体力学和现代水力学

到19世纪末, 虽然用分析法的流体动力学取得很大进展, 但不易起到促进生产的作用。与流体动力学平行发展的是水力学。这是为了满足生产和工程上的需要, 从大量实验中总结出一些经验公式来表达流动参量之间关系的经验科学。

使上述两种途径得到统一的是边界层理论。边界层理论是由德国普朗特 (L. Prantl) 在1904年创立的。这一理论既明确了理想流体的适用范围, 又能计算物体运动时遇到的摩擦阻力。

随着现代化工农业和新技术的迅速发展, 以纯理论分析为基础的古典流体力学, 实验为基础的实验水力学都不能满足生产发展要求, 逐渐形成了以理论和试验研究结合的现代流体力学和现代水力学。

英国力学家、物理学家和工程师雷诺 (O. Reynolds, 1842—1912) 1883 年用实验证实了黏性流体的两种流动状态——层流和紊流的客观存在, 提出了流体流动相似律——雷诺数; 1895 年又引进雷诺应力的概念, 用时均方法建立了不可压缩黏性流体的紊流运动方程——雷诺方程。1891 年俄国物理学家儒科夫斯基 (N. Joukowski, 1847—1921) 首先建立了试验风洞, 1905 年又提出了圆柱绕流的升力理论。

1904 年, 德国力学家普朗特 (L. Prandtl, 1875—1953) 观测分析了固体边界对流动的影响, 首先提出液流边界层概念, 后来对层流边界层的研究, 形成了边界层理论, 在流体力学、水力学研究历史上, 具有划时代的意义。普朗特 1904 年提出边界层理论。1904 年建立和主持了空气动力学实验所。1925 年以后又建立威廉皇家流体力学研究所。以后该所改名为普朗特流体力学研究所。他在边界层理论、风洞实验技术、机翼理论、紊流理论等方面都做出了重要的贡献, 被称作空气动力学之父。

5. 中华人民共和国成立以后水力学的发展

自 20 世纪 50 年代以来在迅速的科学技术的推动下国内外对水力学中各个问题展开了广泛的研究。紊流边界层理论、水工水力学、管道和明渠非恒定流、渗流、高速水流 (高速水力学)、波浪运动、相似理论等领域, 取得了丰硕成果, 丰富和发展了水力学的内容: 环境水力学、随机水力学、计算水力学。各种量测的试验仪器也得到进一步发展, 例如, 激光、PIV 测速等技术。现在, 水力学已成为一门理论、实验和计算相结合的学科。现代水力学亦在水利、农业、交通、地学、生物学、医学等领域得到越来越广泛的应用。

1.2 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, 同液体运动有关的主要物理性质有黏性、压缩性、表面张力等。

1.2.1 液体的黏性

液体具有易流动性。静止的液体没有抵抗剪切变形的能力, 而运动的液体, 当液体质点之间发生相对运动时, 质点之间就会产生切向阻力 (摩擦阻力) 抵抗其相对运动, 即运动的液体具有一定的抵抗剪切变形的能力, 但不同的液体在相同的剪切力作用下其变形速度是不同的, 即不同的液体抵抗剪切变形的能力不同, 这种特性称为液体的黏性。黏性是液体的一种基本属性, 它与液体的运动规律密切相关, 是液体运动时产生阻力和能量损失的原因。

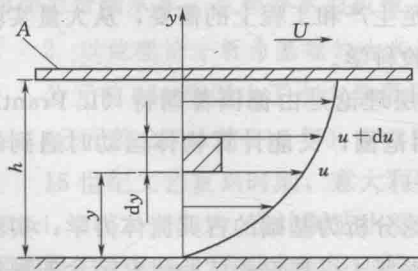


图 1.1 平行平板间的黏性流动

现用牛顿平板实验来说明液体的黏性。

如图 1.1 所示, 设有两块平行平板, 其间充满液体, 下板固定不动, 上板在拉力 T 作用下沿所在平面以速度 U 匀速向右运动。由于液体质点黏附于固体表面, 其速度与固体速度相同, 所以与上板接触的液体将以速度 U 向右运动, 与下板接触的液体速度为零, 两板间的液体作平行于平板的层流运动, 其速度的大小由下板的零均匀过渡到上板的

U 。这样，速度较大的上层液体将带动速度较小的下层流体向右运动，而下层液体将阻滞上层液体的运动，相互间便产生大小相等、方向相反的切向阻力，也称为内摩擦阻力或黏滯力，以 T 表示。

实验证明，液体内摩擦阻力 T 的大小与速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 和接触面积 A 成正比，并与液体的性质有关，其数学表达式为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1.1)$$

式中 μ ——随液体种类不同而异的比例系数，称为动力黏度，简称黏度；

$\frac{du}{dy}$ ——两液层间流速增加与其距离的比值称为速度梯度。

单位面积上的内摩擦阻力称为切应力（黏滯力），用 τ 表示，则：

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.2)$$

式 (1.1) 和式 (1.2) 就是著名的“牛顿内摩擦定律”。当两平板间距离 h 和速度 U 不大时，速度 u 沿其法线方向呈线性分布，即

$$u(y) = \frac{U}{h}y$$

则摩擦阻力：
$$T = \mu A \frac{U}{h}$$

切应力：
$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{U}{h}$$

下面进一步说明上述各式中速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 的物理意义。可以证明，速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 实质上是代表液体微团的剪切变形速度。如图 1.2 所示，在图 1.1 运动的液体中取矩形微元面 $abcd$ 。因上、下层流速相差 du ，经 dt 时段，矩形微元平面发生角变形（或剪切变形），角变形速度为 $d\theta/dt$ 。根据几何关系，可得：

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

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

所以内摩擦力又可表达为

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1.3)$$

根据以上推证，又可将牛顿内摩擦定律表述为：液体作层流运动时，相邻液层之间所产生的切应力与剪切变形速度成正比。所以液体的黏滯性可视为液体抵抗剪切变形的特性。

比例系数 μ 表征了液体抵抗剪切变形的能力，即液体黏性的大小。工程中还常用动力

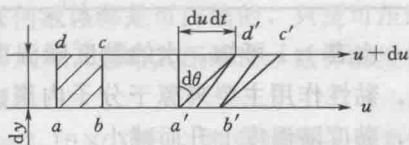


图 1.2 平行平板间的黏性流动

黏度 μ 与液体密度 ρ 的比值 μ/ρ 来表示黏性。将这个比值定义为运动黏度 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$ ，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.4}$$

黏度是液体的重要属性，它与液体种类、温度和压强有关。在工程常用的温度和压强范围内，黏度受压强的影响较小，主要随温度变化，表 1.1 列出了在标准大气压下，不同温度时水的黏度。

表 1.1 不同温度时水的黏度

温度/℃	水	
	$\mu/(\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$
0	1.792	1.792
10	1.308	1.308
20	1.005	1.007
30	0.801	0.804
40	0.656	0.661
50	0.549	0.556
60	0.469	0.477
70	0.406	0.415
80	0.357	0.367
90	0.317	0.328
100	0.284	0.296

由表 1.1 可知，水的黏度随温度升高而减小。其原因是，液体分子间距小，内聚力强。黏性作用主要来源于分子内聚力，当液体温度升高时，其分子间距加大，内聚力减小，黏度随温度上升而减小。

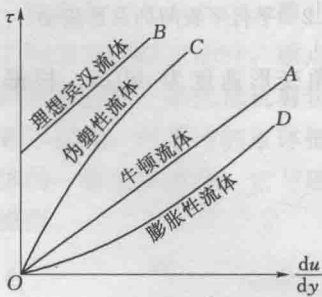


图 1.3 牛顿流体和非牛顿流体

最后还要指出，并不是所有的液体都满足牛顿内摩擦定律。据此，可将流体分为两大类：凡遵守牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体；反之，称为非牛顿流体。如图 1.3 所示，A 线为牛顿流体，常见的牛顿流体有水、空气等。B 线、C 线和 D 线均为非牛顿流体，其中 B 线称为理想宾汉流体，如泥浆、血浆等，这种流体只有在切应力达到某一值时，才开始剪切变形，且变形速度是常数。C 线称为伪塑性流体，如尼龙、颜料、油漆等，其黏度随角变形速度的增加而减小。D 线称为膨胀性流体，如生面团、浓淀粉糊等，其黏度随角变形速度的增加而增加。

如上所述，牛顿内摩擦定律只适用于牛顿流体。非牛顿流体流动中切应力和变形率之间的关系很复杂，有的与切应力作用的时间长短有关，有的与切应力大小有关，而有的只有应力高于其屈服应力时才表现出流体的特性。故非牛顿流体是流变学（研究非牛顿流体受力和运动规律的学科）的研究对象，本书只讨论牛顿流体。

1.2.2 液体的压缩性

液体不能承受拉力，但可以承受一定的压力。液体受压后体积缩小，且压力撤除后能恢复原状，这种性质称为液体的压缩性或弹性。液体的压缩性用体积压缩系数 $\kappa(\text{Pa}^{-1})$ 来表示。它指的是在某一温度和压强下，温度保持不变，液体单位压强升高所引起的体积的相对减少值。若液体的体积为 V ，压力增加 $d\rho$ 后，体积减小 dV ，则体积压缩系数：

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{d\rho} \quad (1.5)$$

由于 $d\rho$ 和 dV 异号，为保证 κ 为正值，式 (1.5) 右侧加负号。

根据增压前后质量无变化：

$$dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$$

得

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

故体积压缩系数 κ 又可表示为

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\rho} \quad (1.6)$$

工程上常用液体体积压缩系数的倒数来表征液体的压缩性，称为液体的体积弹性模量 $K(\text{Pa})$ 。即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{d\rho}{dV} = \rho \frac{d\rho}{d\rho} \quad (1.7)$$

体积弹性模量 K 随液体的种类、温度和压强而变化，它的大小表征着液体压缩性的大小， K 值越大，液体越不容易压缩； K 值越小，液体的压缩性越大。

由上述可知，液体的压缩性是其基本属性之一，任何液体都是可压缩的，只是可压缩程度不同而已。当液体的压缩性对所研究的问题影响不大时，忽略其压缩性，这样的液体称为不可压缩液体，不可压缩液体是理想化的力学模型。

水的压缩性很小，在 10°C 时水的体积弹性模量 $K = 2.10 \times 10^9 \text{ Pa}$ ，即每增加一个大气压，水的体积相对压缩值约为两万分之一。所以，对一般水利工程问题，认为水不可压缩是足够精确的。故对于一般的液体平衡和运动问题，水可按不可压缩介质处理。但对个别特殊情况，如在水击现象和水中爆炸等问题中，则不能忽略液体的压缩性，必须考虑水受压后的弹力作用，应按可压缩介质来处理。

1.2.3 液体的表面张力

液体的表面张力是液体自由表面上液体分子由于受两侧分子引力不平衡，使得自由表面上液体分子承受极其微小的拉力，这种拉力称为表面张力，其方向与液面相切，并与两相邻部分的分界线垂直。表面张力一般产生在液体和气体相接触的自由表面上，也可以产生于液体与固体的接触面上或与另一种液体的接触面上，它是分子引力在液体表面上的一种宏观表现。例如，在液体和气体相接触的自由表面上，液面上的分子受到液体内部分子的吸引力与其上部气体分子的吸引力不平衡，其合力的方向与液面垂直并指向液体内部。在合力的作用下，表层中的液体分子都力图向液体内部收缩，就像在液体表面蒙上一层弹性薄膜，紧紧将液面上的分子压向液体内部，使液体具有尽量缩小其表面的趋势，这样沿液体的表面便产生了拉力，即表面张力。

表面张力仅在液体的自由表面存在,液体内部并不存在,所以它是一种局部受力现象。由于表面张力很小,一般对液体的宏观运动不起作用,可以忽略不计。但如果涉及流体计量、物理化学变化、液滴和气泡的形成等问题时,则必须考虑表面张力的影响。

表面张力的大小以作用在单位长度上的力,即表面张力系数 σ 来表示,单位为 N/m 。 σ 的大小与液体的性质、纯度、温度和与其接触的介质有关。对于 20°C 的水, $\sigma=0.074\text{N/m}$,对于水银, $\sigma=0.54\text{N/m}$ 。表 1.2 列出了几种液体与空气接触时的表面张力系数。

表 1.2 几种液体与空气接触时的表面张力系数

流体名称	温度/ $^\circ\text{C}$	表面张力系数 $\sigma/(\text{N/m})$	流体名称	温度/ $^\circ\text{C}$	表面张力系数 $\sigma/(\text{N/m})$
水	20	0.07275	丙酮	16.8	0.02344
水银	20	0.465	甘油	20	0.065
酒精	20	0.0223	苯	20	0.0289
四氯化碳	20	0.0257	润滑油	20	0.025~0.035

上述所介绍的液体的主要物理性质,都在不同程度上影响着液体的运动,但每一种性质的影响程度并不相同。在一些情况下,某种物理性质占主导地位;在另一些情况下,另一种物理性质占支配地位。一般而言,黏滞力及重力对液体运动的影响要远大于弹性力及表面张力对液体流动的影响,而弹性力及表面张力只对某些特殊水流运动产生影响。

1.3 液体的三大力学模型

1.3.1 连续介质模型

液体是由大量的、不断作无规则热运动的分子所组成。从微观角度来看,液体分子间存在着间隙,所以液体的物理量(如密度、压力和速度等)在空间上的分布是不连续的。同时,由于分子的随机运动,又导致任一空间点上的液体物理量随时间的变化也是不连续的。因此,从微观角度来看,液体物理量的分布在空间和时间上都是不连续的。

现代物理学研究表明,在标准状态下, 1cm^3 水中约有 3.3×10^{22} 个水分子, 1cm^3 气体约有 2.7×10^{19} 个分子,液体的分子平均自由程很小,往往远小于一般工程问题的特征尺寸,并且水力学关心的是液体的宏观特性,即大量分子的统计平均特性。因此,提出液体的连续介质模型。

所谓连续介质模型,即假定液体是一种由连续分布的流体质点所组成的连续介质,水力学所研究的液体运动是连续介质的连续流动。

连续介质的概念是在 1753 年由瑞士学者欧拉(Enler)首次建议采用的,它作为一种假说在流体力学的发展上起了巨大的作用。如果我们把液体作为连续介质,则描述液流的一切物理量(如速度、加速度、密度、压强等)和力学量都可以视为空间坐标和时间的连续函数。这样,我们就可以利用数学分析方法去研究液体的运动规律。根据长期的科学实

验和生产实践证明：利用连续介质模型所得出的有关液体运动规律的基本理论与客观实际是十分符合的。

关于流体质点，是指液流中宏观尺寸非常小而微观尺寸又足够大的任意一个物理实体，具有以下特点：

(1) 宏观尺寸非常小，无尺度，可视为一个点；微观尺寸足够大，内含足够多的流体分子。

(2) 具有质量、密度、压强、流速、动能等宏观物理量，这些物理量是流体质点中大量流体分子的统计平均值。

(3) 流体质点的形状可任意划定。

1.3.2 理想液体模型

根据牛顿内摩擦定律，在液体的黏度足够小，或其所研究区域的速度梯度不太大的情况下，黏性切应力与其他力，如惯性力、重力等相比很小，这时可以忽略黏性切应力。此时，假设动力黏度 $\mu=0$ ，即液体没有黏性，这种无黏性的假想的液体模型称为理想液体，或无黏性液体。在理想液体模型中，液体微团不承受黏性力的作用。

理想液体（无黏性液体）是不存在的，它只是一种对物体进行简化的力学模型，实际液体都具有黏性。引入理想液体模型后，可以大大简化水力学问题的分析与计算，能近似反映某些实际流动问题的主要特征，为实际流体（液体、气体）分析计算奠定基础，或者通过修正得到满足工程要求的结果。

1.3.3 不可压缩液体模型

实际液体都是可压缩的，然而有许多流动问题，其液体密度的变化很小，可以忽略，由此引出不可压缩液体概念。不可压缩液体是又一理想化的力学模型。

由前述可知，流体（液体和气体）的可压缩性可以表述为：流体在外力作用下体积或密度变化而引起流体压强变化的性质。实际流体都有可压缩的性质，相对来说，气体的可压缩性比较大，而液体的可压缩性比较小。

在解决实际问题中，为了简化，有时将流体（液体和气体）的密度近似认为是不变的，即密度相对变化量 $\Delta\rho/\rho$ 很小，称为不可压缩流体。由于液体在很大的压强作用下，密度的变化很小，所以常将液体视为不可压缩的，但对于一些特殊问题，如水下爆炸、液体管路动态特性问题，则必须考虑液体的压缩性。对气体来讲，一般情况下都不能忽略气体可压缩性的影响，只能当其流动速度较小，因而引起 $\Delta\rho/\rho$ 较小的情况下，才可以将气体看成是不可压缩的。对于一般气体流动问题，当流速与当地声速之比 $v/c < 0.3$ 时，认为气体是不可压缩的，否则就是可压缩的。

1.4 作用在液体上的力

处于平衡或运动状态的液体，都要受各种力的作用。按其物理性质分，这些力包括重力、惯性力、弹性力、摩擦力、表面张力等。这里，为便于分析液体的平衡和运动规律，按力的作用方式分为质量力和表面力两大类。