



高等教育“十三五”应用型规划教材

# 水力学

主编 温爱存 金建华



电子科技大学出版社

高等教育“十三五”应用型规划教材

# 水 力 学

主 编 温爱存 金建华

副主编 李 妍 郑美玉 曹 杰 孙晓丽

常州大学图书馆  
藏书章



电子科技大学出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

水力学/温爱存, 金建华主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5647-3948-5

I. ①水… II. ①温…②金… III. ①水力学 IV. ①TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 228510 号

## 内 容 简 介

本书论述了水力学的主要理论及其应用, 具有循序渐进、强化基础、理论联系实际、利于教学的特点。全书在整体安排上采用由浅入深的方式, 首先阐述水力学的任务与研究对象, 介绍液体的物理性质, 其次介绍水静力学内容, 再次从液体运动的流束理论出发, 渐进式地介绍水动力学内容。

本书主要包括绪论、水静力学、水动力学基础、量纲分析与相似原理、液流形态和水头损失、有压管道恒定流、明渠恒定均匀流、明渠恒定非均匀流、明渠恒定急变流、堰顶溢流及闸孔出流、泄水建筑物下游的水流衔接与消能、渗流等项目。每个项目附思考题、典型习题和例题。本书可作为高等院校土建类的土木工程、交通土建工程、建筑工程、给排水工程、地质工程和环境工程、水利水电工程、水文与水资源工程等专业的教材, 也可供有关科技人员学习参考。

## 水 力 学

主编 温爱存 金建华

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 刘 愚

责任编辑: 刘 愚

主 页: [www.uestcp.com.cn](http://www.uestcp.com.cn)

电子邮箱: [uestcp@uestcp.com.cn](mailto:uestcp@uestcp.com.cn)

发 行: 全国新华书店经销

印 刷: 北京航天伟业印刷有限公司

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 18 字数: 414 千字

版 次: 2016 年 12 月第一版

印 次: 2016 年 12 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-3948-5

定 价: 40.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

# 前 言

水力学是以水为主要研究对象，研究液体运动规律以及应用这些规律解决实际工程问题的科学，是水利类、土木类、化工类、机械类专业的一门主要技术基础课。它既有本学科的系统性和完整性，又有鲜明的工程应用特征。

在教材编写过程中，注重应用国内外最新科研成果，从水力学课程的基础地位出发，加深理论基础，注意运用基本方程分析流动问题，引导学生学以致用，重在培养学生分析问题的能力。本书内容主要包括：绪论、水静力学、水动力学基础、量纲分析与相似原理、液流形态与水头损失、有压管道的恒定流动、明渠恒定均匀流、明渠恒定非均匀流、明渠恒定急变流、堰顶溢流与闸孔出流、泄水建筑物下游的水流衔接与消能、渗流。为了便于学生课后复习和自学，本书在每个项目的后面附有配套的习题。

本书由甘肃林业职业技术学院温爱存、天津农学院金建华担任主编，天津农学院李妍、绥化学院郑美玉、重庆科技学院曹杰、内蒙古建筑职业技术学院孙晓丽担任副主编。全书由温爱存、金建华统编定稿。具体编写分工如下：项目五、项目十由温爱存编写；项目十一、项目十二由金建华编写；项目二、项目七由李妍编写；项目八、项目九由郑美玉编写；项目一、项目三由曹杰编写；项目四、项目六由孙晓丽编写。

由于时间和水平所限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。读者如有意订书、购书，请致电 0313-7157345。

编 者  
2016 年 7 月

# 目 录

项目一 绪 论 .....	(1)
任务一 水力学的任务与研究对象 .....	(1)
任务二 水力学的发展简史 .....	(2)
任务三 液体的基本特性和主要物理性质 .....	(4)
任务四 连续介质和理想液体的概念 .....	(8)
任务五 作用在液体上的力 .....	(9)
任务六 水力学的研究方法 .....	(9)
项目二 水静力学 .....	(12)
任务一 静水压强定义及其特性 .....	(12)
任务二 液体平衡的微分方程及其积分 .....	(14)
任务三 重力作用下的液体平衡 .....	(18)
任务四 几种质量力作用下的液体的相对平衡 .....	(24)
任务五 作用在平面上的静水总压力 .....	(25)
任务六 作用在曲面上的静水总压力 .....	(31)
项目三 水动力学基础 .....	(37)
任务一 描述液体运动的两种方法 .....	(37)
任务二 欧拉法的若干基本概念 .....	(40)
任务三 恒定总流的连续性方程 .....	(44)
任务四 恒定总流的能量方程 .....	(45)
任务五 恒定总流的动量方程 .....	(55)
项目四 量纲分析与相似原理 .....	(64)
任务一 量纲分析的概念和原理 .....	(64)
任务二 量纲分析法 .....	(67)
任务三 相似原理 .....	(70)
任务四 相似准则 .....	(73)
任务五 模型试验设计 .....	(80)
项目五 液流形态与水头损失 .....	(82)
任务一 水头损失的物理概念及其分类 .....	(82)
任务二 液流边界几何条件对水头损失的影响 .....	(83)
任务三 恒定均匀流沿程水头损失与切应力的关系 .....	(84)
任务四 液体运动的两种形态——层流和紊流 .....	(87)
任务五 圆管中层流的水力特性及沿程水头损失的计算 .....	(91)

任务六	紊流的水力特性 .....	(93)
任务七	沿程阻力系数的变化规律 .....	(98)
任务八	计算沿程水头损失的经验公式 .....	(101)
任务九	局部水头损失 .....	(103)
<b>项目六</b>	<b>有压管道的恒定流动 .....</b>	<b>(109)</b>
任务一	概述 .....	(109)
任务二	简单管道的水力计算 .....	(110)
任务三	虹吸管及水泵装置的水力计算 .....	(117)
任务四	复杂管道的水力计算 .....	(121)
任务五	沿程均匀泄流管道的水力计算 .....	(125)
<b>项目七</b>	<b>明渠恒定均匀流 .....</b>	<b>(129)</b>
任务一	概述 .....	(129)
任务二	明渠边壁的几何特性和水力特性 .....	(130)
任务三	明渠均匀流的特性及产生条件 .....	(132)
任务四	明渠均匀流的水力计算 .....	(133)
任务五	断面周界粗糙度不同的明渠及复式断面明渠的水力计算 .....	(141)
<b>项目八</b>	<b>明渠恒定非均匀流 .....</b>	<b>(145)</b>
任务一	概述 .....	(145)
任务二	明渠水流的三种流态及判别 .....	(146)
任务三	明渠恒定非均匀渐变流的微分方程 .....	(152)
任务四	棱柱体明渠恒定非均匀渐变流的水面曲线分析 .....	(154)
任务五	明渠恒定非均匀渐变流水面曲线的计算 .....	(160)
<b>项目九</b>	<b>明渠恒定急变流——水跃和水跌 .....</b>	<b>(165)</b>
任务一	概述 .....	(165)
任务二	棱柱体水平明渠的水跃方程 .....	(166)
任务三	棱柱体水平明渠中水跃共轭水深的计算 .....	(168)
任务四	棱柱体水平明渠中水跃方程的验证及跃长的计算 .....	(172)
任务五	棱柱体水平明渠中水跃的能量损失 .....	(174)
任务六	非棱柱体明渠中的水跃 .....	(179)
任务七	水跌 .....	(182)
<b>项目十</b>	<b>堰顶溢流及闸孔出流 .....</b>	<b>(185)</b>
任务一	堰流的定义及分类 .....	(185)
任务二	堰流基本公式 .....	(188)
任务三	薄壁堰流的水力计算 .....	(190)
任务四	实用堰流的水力计算 .....	(193)
任务五	宽顶堰流的水力计算 .....	(203)
任务六	闸孔出流的水力计算 .....	(214)

---

项目十一 泄水建筑物下游的水流衔接与消能 .....	(225)
任务一 概述 .....	(225)
任务二 底流消能的水力计算 .....	(227)
任务三 挑流消能的水力计算 .....	(243)
任务四 其他消能形式简介 .....	(250)
项目十二 渗流 .....	(256)
任务一 渗流基本定律 .....	(256)
任务二 渗流运动的微分方程 .....	(261)
任务三 地下河槽中恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流 .....	(265)
任务四 棱柱体地下河槽中恒定渐变渗流的浸润曲线 .....	(267)
任务五 普通井和井群的计算 .....	(273)
参考文献 .....	(279)

# 项目一 绪 论



## 情景提示

1. 水利和水力的区别是什么？
2. 水力学是一门重要的基础课程，水力学的产生和发展与社会生产的发展密切相关，想一想在我们的社会经济发展中哪些领域会用到水力学知识？
3. 一块干净的玻璃板水平放置，在上面滴一滴油和一滴水，然后慢慢将玻璃板的一侧抬起，随着抬起高度的增加，水滴和油滴会相继从玻璃板上流下。为什么水滴先流而油滴后流？
4. 有两个容器一个容器中放水，另一个放水银，并且在两个容器中分别插入一个细玻璃管，发现水银在玻璃管中下降并且管中液面为凸形，水在玻璃管中上升，液面为凹形。为什么会呈现两种不同的现象？



## 项目导读

本项目是水力学的开篇，概要介绍流体的特征、连续介质模型、流体的主要物理性质和作用于流体上的力。黏滞性是学习的重点和难点，在理解黏滞性概念的基础上，理解牛顿内摩擦定律，理解动力黏度和运动黏度的意义。

本项目是水力学的基础内容，比较简单易于理解，要求准确地理解基本概念，进而为后续项目的学习打好基础。



## 学习目标

1. 了解水力学的研究对象与任务、水力学的发展简史、牛顿体和非牛顿体、表面张力。
2. 掌握液体的黏滞性、压缩性、连续介质假设、理想液体。

## 任务一 水力学的任务与研究对象

水力学是一门基础性很强且应用性很广的学科，随着生产的需要和科学的发展在不断更新、深化和扩大。水力学是研究液体（以水为代表）的平衡和机械运动的规律及其实际应用的一门技术学科，是力学的一个分支，是一门重要的专业基础课。水力学的任务包括三方面的含义。

1. 水力学研究的对象是液体，液体的种类很多，如：水、石油、酒精、水银等。由



于工程实际中最为常见的液体是水，便以水作为研究液体运动规律的代表，实际上水力学的基本原理与水力计算的一般方法不仅适用于水，而且适用于一般常见液体和可忽略压缩性影响的气体。

2. 水力学研究的主要内容是液体平衡和机械运动的规律。一是关于液体平衡的规律，它研究液体处于静止（或相对平衡）状态时，作用于液体上的各种力之间的关系，称为水静力学；二是关于液体运动的规律，它研究液体处于运动状态时，作用于液体上的力与运动要素之间的关系，以及液体的运动特性与能量转换等，称为水动力学。

3. 水力学研究的目的在于应用。水力学是一门与工农业生产密切相关的应用学科，已经渗透到工程技术的各个领域，如：农田水利、水利水电、航运、市政、建筑、石油、化工、采矿、冶金、环境等部门。

## 任务二 水力学的发展简史

水力学作为一门以应用为目的的学科，是人类不断认识、掌握自然规律及不断深入生产实践的结晶，其发展与力学、物理学、数学等相关学科密不可分。人类社会在以农业文明为主的早期，对水力学的认识是从治水、灌溉、航运等方面开始的。

早在几千年前由于治水、灌溉、航运的需要修建了一些工程，在生产实践的基础上开始了解和认识了一些流体运动的规律。相传大禹治水采取“疏壅导滞”的措施，疏九河之水以防洪患，对防洪排涝、发展农业做出了积极贡献。公元前 250~210 年间，中国社会正处于奴隶制向封建制过渡的时期，秦朝修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大灌溉渠道。都江堰，已有 2000 年的历史，迄今仍发挥着巨大作用，在都江堰中设置了平水池和飞沙堰，并总结出了“深淘滩，低作堰”的规律。灵渠全长 35 千米，沟通了湘江和桂江，公元 285 年，在湘江上修建了 18 道船闸，比欧洲早 400 年。公元前 485 年隋朝完成了从杭州到北京的京杭运河，又称南北运河，全长 1 872 千米，沟通江、河、淮、海四大水系，并在运河上大量使用船闸。所有这些反映了当时我国对明渠水流、堰流有了一定认识并居世界先进水平。在水利机械方面，发明了戽斗、桔槔、辘轳，水车、水力鼓风机、水排等，处于世界领先地位。在水力著作方面，公元 1360 年，元代欧阳玄著有《至正河防记》一书，为世界第一水利书籍；清代，何梦瑶著有《算迪》一书。

与我国情况相似，早在几千年前，埃及、希腊、巴比伦和印度等地区，为了发展农业也修建了灌溉渠道，并发展了航运，古罗马人修建了大规模的供水管道工程。约在公元前 250 年，希腊哲学家、物理学家阿基米德发表了《论浮体》，提出了浮体原理，是第一篇阐述流体静力学规律的文献。公元前在欧洲各国同我国一样，水力学受生产力低下的影响，在相当长的时间内未受到重视，而未发展为一门系统的学科。

15 世纪文艺复兴时期，水静力学理论初步形成。16 世纪初，意大利物理学家、艺术家兼工程师达·芬奇，在观察和实验的基础上描绘和叙述了许多重要的流动现象，写了《论水的流动和水的测量》，探讨了孔口泄流、不可压缩流体恒定流的质量守恒连续性原理、明渠水流等。1638 年，意大利物理学家、天文学家伽利略，发表了《物体沉浮》。

1650年法国数学家、物理学家、哲学家帕斯卡，建立了流体中静水压强的传递原理——帕斯卡定律。

17世纪，资本主义制度兴起，生产迅速发展，自然科学也得到质的飞跃。牛顿研究了物体在阻尼介质中的运动，牛顿通过分析和实验，于1686年提出了牛顿内摩擦定律。1738年，瑞士的物理学家、数学家伯努利在《水动力学》一书中，提出了恒定不可压缩流体运动的能量方程——伯努利方程。1748年俄国科学家罗蒙诺索夫提出质量守恒定律。1753年，瑞士数学家、物理学家、俄国科学院院士欧拉，提出了连续介质假设。1755年提出了描述液体运动的方法——欧拉法和理想液体运动方程——欧拉运动方程，首先应用微积分的数学方法来研究流体力学的问题，为理论流体力学的发展开辟了新的途径，奠定了古典流体力学的基础。1783年法国的数学家、天文学家拉格朗日在总结前人工作的基础上，提出了一种新的描述流体运动的方法——拉格朗日法。到19世纪中叶，基本建成理想液体运动的系统理论——古典流体力学。古典流体力学在数学分析上系统、严谨，但忽略了液体黏性，计算结果与实验不完全相符。由于生产发展需要快速解决实际问题，一些工程师和实际工作者，凭借实际观测和实验，得出了经验半经验公式，或在理论公式中引入修正系数，如1732年法国工程师、发明家毕托发明了量测流速的毕托管；意大利物理学家、工程师文丘里发明了量测流量的文丘里流量计；1856年法国工程师达西，提出了渗流的达西定律；这一时期取得重大成就的还有德国水利工程师哈根，法国物理学家、生理学家、医生泊肃叶，德国工程师魏士巴赫等。这些成果被统称为实验水力学。

1821年，法国工程师纳维在欧拉理想流体运动方程的基础上，运用离散分子模型，提出了不可压缩黏性流体的运动微分方程，1845年英国数学家、物理学家斯托克斯也推导出黏性流体的运动方程，此后统称为纳维-斯托克斯方程（简称N-S方程），为研究实际流体运动奠定了基础。1882年英国工程师、物理学家雷诺，阐明了相似原理，1883年通过一系列的实验发现流体运动存在两种形态，1895年建立了描述不可压缩实际流体的湍流运动方程，也称为雷诺方程。上述两方面成果促进了理论和实验的结合。

19世纪末20世纪初，随着生产和科技发展的需要，提出了许多复杂问题，古典流体力学和实验水力学由于各自的局限性都不能很好的说明和解决，在客观上促成了古典流体力学和实验水力学的结合。1904年德国工程师、力学家普朗特提出了边界层概念，经后人不断发展形成了边界层理论揭示了水、空气等低黏性流体的实际流动与理想流动之间的实质性联系，为解决边界复杂的实际流体运动开辟了新的途径，同时将无黏性理论和黏性理论联系起来，使流体力学和实验水力学两种不同的研究方法得到了统一，后经许多学者的努力，边界层理论和紊流理论都有很大发展，逐渐形成了理论分析和试验研究相结合的现代流体力学和现代水力学。

近几十年来，随着电子计算机的发展和广泛应用，数值计算方法得到迅速发展，并在水力学中得到广泛应用。这一时期我国在水力学方面取得重大成就的科学家有钱学森、周培源、郭永怀等。

## 任务三 液体的基本特性和主要物理性质

外力的作用是引起液体的运动状态发生变化的原因，力作用于液体上，需要通过液体内在物理性质来表现，研究液体的运动规律，就要从分析液体的基本特征和物理性质以及受力着手。

### 一、液体的易流动性

常温常压下液体分子间的距离是  $10^{-8}\text{cm}$ ，每个液体分子在平衡位置附近做着无规则的热运动，当液体分子受外力作用后液体分子就会沿外力的方向移动平衡位置，引起液体的流动，形成所谓的液体的易流动性，即：液体在静止时不能承受剪力、抵抗剪切变形的性质。

### 二、质量、密度和惯性

液体同其他物体一样都具有质量，单位体积液体所具有的质量称为密度，用符号  $\rho$  表示，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。对于均质液体，质量为  $m$ ，体积为  $V$ ，密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

对于非均质液体，密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-2)$$

液体的密度随温度和压强的变化而变化，实验证明，这种变化甚微，因此在水力学中把水的密度视为常数。

根据牛顿第一运动定律可知任何一种物体都具有惯性，即任何一种物体都具有保持其原有运动状态的性质，惯性的大小用质量来量度，因此液体同其他物体一样也具有惯性。根据达朗贝尔原理，质量为  $m$  的液体具有的惯性力为

$$F = -ma \quad (1-3)$$

### 三、黏滞性

如图 1-1 所示两个平行平板，其间充满静止液体，两平板间距离为  $h$ ，以  $y$  方向为法线方向，保持下平板固定不动，上平板以速度  $U$  向右运动，粘附于上平板的一层液体，随平板以速度  $U$  运动，并逐层向内影响，各层相继流动，直至粘附于下平板的流层速度为零。在  $U$ ， $h$  都较小的情况下，各流层的速度沿法线方向呈直线分布。上平板带动粘附在板上的流层运动，而能影响到内部各流层运动，说明内部各流层间存在着切向力，即内摩擦力，这就是黏性的宏观表现。

液体具有易流动性，静止时不能承受剪力抵抗剪切变形，但是在运动状态下，液体具有抵抗剪切变形的能力。当液体处在运动状态时，若液体质点之间存在着相对运动，

则质点间要产生内摩擦力抵抗其相对运动, 这种性质称为液体的黏滞性, 此内摩擦力称为液体的黏滞力。

内摩擦力的概念是由牛顿最先提出, 并经后人验证, 习惯上称为牛顿内摩擦定律, 它可表述为: 做层流运动的液体, 相邻液层间单位面积上所作用的内摩擦力, 与流速梯度成正比, 同时与液体的性质有关。可表述为下式

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

其中  $\eta$  为与液体性质有关的系数, 称为动力黏滞系数, 简称动力黏度或黏度, 单位为  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

式中  $\frac{du}{dy}$  为速度梯度, 代表液体微团的剪切变形速度, 如图 1-1 所示。在相距为  $dy$  的两流层间取矩形微团进行研究, 因为上下两流层速度相差  $du$ , 经过时间  $dt$  之后, 微团除位置发生平移之外, 还伴随着形状的改变, 由原来的矩形变成了平行四边形, 即产生了剪切变形, 角变形量为  $d\gamma$

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

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-5)$$

所以牛顿内摩擦定律又可表述为

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-6)$$

所以液体的黏滞性又可以表述为液体抵抗剪切变形的特性。

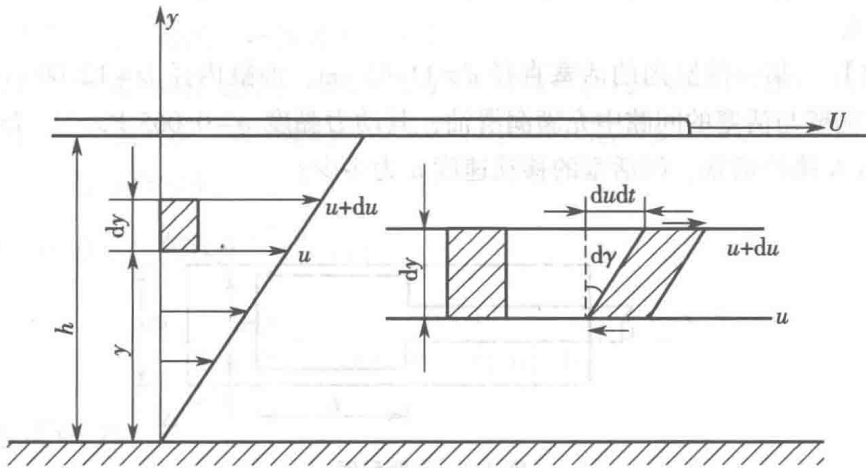


图 1-1 黏性表象

液体的性质对摩擦力的影响, 通过黏度  $\eta$  来反应, 黏性大的液体  $\eta$  值大, 黏性小的液体  $\eta$  值小, 流体的黏度受压力影响很小, 随温度而变化。在分析黏性流体的运动规律的过程中, 动力黏度  $\eta$  和密度  $\rho$  经常以比值的形式出现, 称为运动黏度  $\nu$ , 单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-7)$$

水的运动黏度可按下列经验公式进行计算

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337T + 0.000221T^2} \quad (1-8)$$

式中,  $T$  为水温, 单位  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\nu$  的单位为  $\text{cm}^2/\text{s}$ , 在表 1-1 中列出了不同温度时水的  $\nu$  值。

表 1-1 不同水温时的运动黏度值

温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\nu/(\text{cm}^2/\text{s})$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\nu/(\text{cm}^2/\text{s})$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\nu/(\text{cm}^2/\text{s})$
0	0.01775	16	0.01118	35	0.00725
2	0.01674	18	0.01062	40	0.00659
4	0.01568	20	0.01010	45	0.00603
6	0.01473	22	0.00989	50	0.00556
8	0.01387	24	0.00919	55	0.00515
10	0.01310	26	0.00877	60	0.00478
12	0.01239	28	0.00839		
14	0.01176	30	0.00803		

不是所有的液体都适用牛顿内摩擦定律, 符合牛顿内摩擦定律的液体称为牛顿液体或牛顿体, 如空气和水, 反之称为非牛顿液体或非牛顿体, 如伪塑性液体、膨胀性液体、理想宾汉液体。

由于液体内部存在黏滞力(内摩擦力), 在流动过程中黏滞力做功不断消耗液体的机械能, 转化为热能而散失掉, 从而引起液流的能量损失。因此黏滞性是液体运动产生能量损失的根源。

**【例 1-1】** 某一油缸内的活塞直径  $d=11.96\text{ cm}$ , 油缸内径  $D=12.00\text{ cm}$ , 如图 1-2 所示, 油缸侧壁与活塞的间隙中充满润滑油, 其动力黏度  $\eta=0.065\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $l=20\text{ cm}$ 。若以力  $F=9.8\text{ N}$  推拉活塞, 问活塞的移动速度  $u$  为多少?

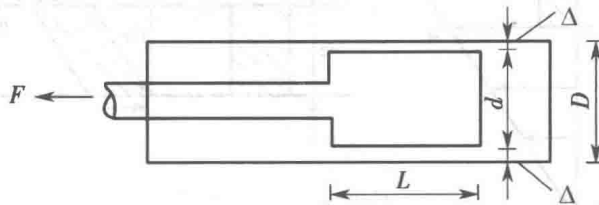


图 1-2 例题配图

解:

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

$$u = \frac{F}{\eta A} (D-d) = \frac{9.8}{0.065 \times 3.14 \times 0.1196 \times 0.2} \times (0.12 - 0.1196) = 0.8\text{ m/s}$$

#### 四、压缩性及压缩率

物体受外力作用产生变形,当外力撤除后,物体有恢复原状的能力,这一性质称为物体的弹性。液体受压后体积缩小,压力撤除后体积又恢复原状的性质称为液体的压缩性或弹性。液体压缩性的大小用体积压缩率 $\beta$ 或体积模量 $K$ 表示。

体积压缩率 $\beta$ 是液体体积的相对缩小值与压强增值之比。可以表示为

$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1-9)$$

$\beta$  值越大,液体越容易压缩,其单位为  $\text{Pa}^{-1}$ 。

又因为 
$$-\frac{dV}{d\rho} = \frac{d\rho}{\rho}$$

所以 
$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} = \frac{1}{\rho} \frac{dV}{d\rho}$$

体积模量是体积压缩率的倒数,即

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1-10)$$

体积模量越大,液体越不容易被压缩,单位为  $\text{Pa}$ 。

体积压缩率和体积模量随液体种类的不同而不同,对于同一种液体,体积压缩率和体积模量也会随温度和压强有所变化,但变化很小,一般可视为常数。水的压缩性很小,10℃时水的体积模量  $K = 2.1 \times 10^9 \text{ Pa}$ ,在相当大的压强变化范围内,密度几乎不变。因此一般液体的平衡和运动问题,都可按不可压缩液体进行理论分析。但是对于某些特殊情况,如水击和爆炸波,必须考虑液体的压缩性。

**【例 1-2】** 充满石油的油罐,内部压强为 5 个大气压,现从罐中排放  $0.04 \text{ m}^3$  的石油后,罐内压强降低了一个大气压,求油罐的体积。石油的体积压缩率  $\beta = 7.553 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 。

**解:** 设油罐的体积为  $V$ ,

根据体积压缩率公式  $\beta = -\frac{dV/V}{dp}$  可得

$$V = -\frac{1}{\beta} \frac{dV}{dP} = \frac{0.04}{7.553 \times 10^{-10} \times 1.01 \times 10^5} = 524 \text{ m}^3$$

#### 五、表面张力

自由表面上的液体分子由于受到两侧分子引力不平衡而承受的一个极其微小的拉力称为表面张力。它在液体与气体、液体与固体、液体与另一种不相混液体接触的周界面上发生。其大小可用表面张力系数 $\sigma$ 表示,是指在自由面单位长度上所受拉力的数值,单位  $\text{N/m}$ 。 $\sigma$  值随液体种类、温度和与它表面接触的物质情况的变化而变化。由于表面张力的作用,如果把两端开口的玻璃毛细管竖立在液体中,液体就会在毛细管中上升或下降,这种现象称为毛细管现象,如图 1-3 所示。

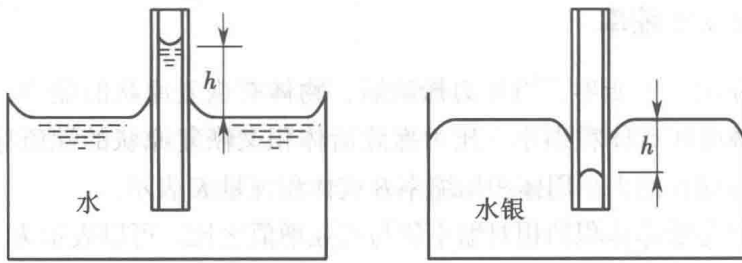


图 1-3 毛细管现象

表面张力仅在液体的自由表面存在，液体内部并不存在，是一种局部受力现象，一般来说对液体的宏观运动影响很小，可以忽略不计。

## 任务四 连续介质和理想液体的概念

### 一、连续介质概念

根据物质结构理论，液体和任何物质一样，都是由分子组成，而分子则由更小的原子组成，所有物质的分子和原子都是不连续而有间隙的，并且都在做永不停息的不规则的热运动，相互间经常相互碰撞、掺混，进行动量、热量（能量）、质量的交换。所以在微观上，流体的结构和运动在时间和空间上都是不连续的，呈现着离散型、不均匀性和随机性。但是在宏观上人们看到的液体的宏观结构和运动，呈现出明显的连续性、均匀性和确定性。

水力学主要研究液体在外力作用下的机械运动，也就是水力学研究的宏观尺度比微观尺度大得多。基于上述原因，在水力学的研究中把液体看作是连续介质，即假设液体是连续无间隙地分布于其所占的空间，所有的宏观物理量是时间和空间的连续函数。

连续介质的概念是由瑞士科学家欧拉在 1753 年提出来的，这一假定在水力学的发展上起了巨大的推动作用。把液体视为连续介质，可以利用连续函数的分析方法研究液体的运动规律。

### 二、理想液体的概念

根据前面所讲液体的主要物理性质，液体具有惯性、黏滞性、压缩性、表面张力，这些性质不同程度的对液体运动发生影响。

液体的压缩性、膨胀性、表面张力很小，对液体运动产生的影响很小。而由于黏滞性的存在使得液体在运动过程中产生能量损失，因此运动规律的分析变得非常复杂。

为了使问题分析简化，引入了理想液体的概念，即把液体看作不能压缩、不能膨胀、没有黏滞性、没有表面张力的连续介质。由前面分析可知，理想液体与实际液体的区别

在于是否考虑液体的黏滞性，因而理想液体又可以表述为不考虑黏滞性的液体。

## 任务五 作用在液体上的力

在液体上作用有各种力，如重力、惯性力、黏滞力、摩擦力、表面张力、弹性力等，按照力的作用特点可以分为表面力和质量力两类。

### 一、表面力

表面力是作用于液体的表面，并与受作用的液体表面面积成比例的力。表面力是通过直接接触，施加在表面上的力，如压力、摩擦力等。

表面力大小的度量有两种方法，第一种是用总作用力度量，第二种是用单位面积上所受的表面力（即应力）度量。根据作用力与表面力的方向，应力可分为压应力（作用力与表面垂直）和切应力（作用力与表面平行）。

### 二、质量力

质量力是通过所研究液体的每一部分质量作用于液体的、大小与液体质量成比例的力。对于均质液体，质量力与体积成正比，故质量力又称为体积力。又由于质量力的产生并不需要施力物体与液体相接触，故又称为超距力。常见的质量力有两种：重力和惯性力。

质量力的度量有两种方法，第一种是用总质量力度量，第二种是用单位质量力度量。对于均值液体，若质量为  $m$ ，质量力为  $F$ ，则单位质量力  $f$  为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-11)$$

设  $F$  在坐标上的投影为  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ，单位质量力  $f$  在相应坐标上的投影分别为  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  则有

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{F_x}{m} \\ f_y &= \frac{F_y}{m} \\ f_z &= \frac{F_z}{m} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

## 任务六 水力学的研究方法

水力学的研究方法主要有三种，理论分析、科学实验、数值计算，这三种方法既有区别又有联系，互相结合、互为补充、相得益彰、相互促进。



## 一、理论分析

水力学是建立在经典力学理论基础之上的，物体的机械运动和作用的外力紧密相关，对液体进行理论分析，首先要分析作用于液体上的力，然后根据物理学的普遍规律、定律（牛顿定律、质量和能量守恒定律等）来建立水流运动的基本方程式。

理论分析在建立液体运动的一般规律方面，已经达到较为成熟的程度。理论分析法揭示了实际流体运动的物理本质和各物理量之间的内在联系及规律，具有重要的指导意义和普遍的适用性。另一方面，理论分析方法往往只能局限于比较简单的流体运动，对于更为复杂、更符合实际的流体运动还不能完全运用理论分析法来解决。

## 二、科学实验

从水力学的发展简史可以知道，人们很早就开始利用实验的方法研究流体运动规律，一方面科学实验可以检验理论分析的正确性，一方面对于一些复杂的流体运动规律还不能完全利用理论分析解决时，可以通过实验得出一些经验性的规律，以满足实际应用的需要。

水力学的实验方法主要有以下四种。

### 1. 原型观测

对工程中的实际流体运动，直接进行观测，收集第一手资料，为检验理论分析成果和总结某些基本规律提供依据。

### 2. 模型试验

由于实际水流运动比较复杂，使得有些水力学问题单纯依靠理论分析方法不能解决，可以以相似理论和量纲分析法为指导，把实际工程缩小或放大为模型，在模型上预演相应的流体运动，得出在模型中的流体运动规律，然后再按照相似关系换算为原型的规律。

### 3. 系统试验

由于原型观测受到某些条件的局限或因流体运动的相似规律在理论上还没有建立，则在实验室内小规模地造成某种流体运动，用以进行系统的观测实验，从中找出规律性。

### 4. 模拟试验

利用水流与气流或电流的相似，进行水电模拟或水气模拟试验等。例如描述恒定地下水流动场的方程为拉普拉斯方程，在导体中的电流也可用拉普拉斯方程描述，这表明渗流和电流之间存在着模拟关系。利用这种关系，通过电流场的测量来解答渗流问题。

## 三、数值计算

计算机具有强大的数值计算功能，而且目前已经开发了一系列的数值计算方法，如有限差分法、有限元法、有限分析法、边界元法等。用理论分析方法得出的微分方程组可以利用上述方法得出数值解。数值计算方法在水力学研究方法中的地位和作用不断提