

蓝色创优规划教材

# 水力学

主 编：郑艳娜 朱永英

副主编：袁丽蓉 孙 雷 张瑞瑾



SHUILIXUE



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

蓝色创优规划教材

# 水 力 学

主 编 郑艳娜 朱永英

副主编 袁丽蓉 孙 雷 张瑞瑾



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

水力学 / 郑艳娜, 朱永英主编. —南京: 东南大学出版社, 2017. 2

蓝色创优规划教材 / 陈昌平主编

ISBN 978-7-5641-7028-8

I. ①水… II. ①郑… ②朱… III. ①水力学—教材 IV. ①TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 013553 号

## 水 力 学

---

|       |                                                               |
|-------|---------------------------------------------------------------|
| 出版发行  | 东南大学出版社                                                       |
| 出 版 人 | 江建中                                                           |
| 社 址   | 南京市四牌楼 2 号(邮编:210096)                                         |
| 网 址   | <a href="http://www.seupress.com">http://www.seupress.com</a> |
| 责任编辑  | 孙松茜(E-mail:ssq19972002@aliyun.com)                            |
| 经 销   | 全国各地新华书店                                                      |
| 印 刷   | 大丰市科星印刷有限责任公司                                                 |
| 开 本   | 787mm×1092mm 1/16                                             |
| 印 张   | 14.25                                                         |
| 字 数   | 365 千字                                                        |
| 版 次   | 2017 年 2 月第 1 版                                               |
| 印 次   | 2017 年 2 月第 1 次印刷                                             |
| 书 号   | ISBN 978-7-5641-7028-8                                        |
| 定 价   | 45.80 元                                                       |

---

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830)

## 目 录

## Contents

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                        | 1  |
| 1.1 水力学的任务及研究对象                 | 1  |
| 1.2 连续介质模型和理想液体的概念              | 2  |
| 1.3 液体的主要物理性质                   | 2  |
| 1.4 作用在液体上的力                    | 9  |
| 1.5 水力学的研究方法                    | 10 |
| 习题                              | 11 |
| 第 2 章 水静力学                      | 13 |
| 2.1 静水压强及其特性                    | 13 |
| 2.2 液体的平衡微分方程式及其积分              | 16 |
| 2.3 等压面                         | 19 |
| 2.4 重力作用下静水压强的基本公式              | 20 |
| 2.5 绝对压强、相对压强、真空度               | 21 |
| 2.6 压强的测量                       | 24 |
| 2.7 压强的表示法,水头与单位势能              | 27 |
| 2.8 作用于平面上的静水总压力                | 28 |
| 2.9 作用于曲面上的静水总压力                | 33 |
| 2.10 作用于物体上的静水总压力,潜体与浮体的平衡及其稳定性 | 38 |
| 习题                              | 41 |
| 第 3 章 水动力学基本理论                  | 46 |
| 3.1 描述液体运动的两种方法                 | 46 |
| 3.2 液体运动的一些基本概念                 | 48 |
| 3.3 恒定总流的连续性方程                  | 55 |
| 3.4 恒定总流的能量方程                   | 57 |
| 3.5 恒定总流的动量方程                   | 72 |
| 习题                              | 82 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第 4 章 量纲分析和相似原理 .....         | 88  |
| 4.1 量纲分析的基本概念 .....           | 88  |
| 4.2 量纲和谐原理 .....              | 89  |
| 4.3 量纲分析法及应用 .....            | 90  |
| 4.4 相似的概念 .....               | 94  |
| 4.5 相似准则 .....                | 95  |
| 4.6 模型实验 .....                | 97  |
| 习题 .....                      | 98  |
| 第 5 章 流动形态与水头损失 .....         | 100 |
| 5.1 流体的两种流态及其判别方法 .....       | 100 |
| 5.2 水流阻力与水头损失 .....           | 101 |
| 5.3 均匀流沿程水头损失与切应力的关系 .....    | 103 |
| 5.4 圆管中的层流运动及其沿程水头损失的计算 ..... | 104 |
| 5.5 湍流运动特征和半经验理论 .....        | 107 |
| 5.6 圆管中的紊流 .....              | 112 |
| 5.7 圆管中沿程阻力系数 .....           | 116 |
| 5.8 边界层理论简介 .....             | 124 |
| 5.9 绕流阻力 .....                | 127 |
| 5.10 局部水头损失 .....             | 130 |
| 5.11 减小阻力的措施 .....            | 135 |
| 习题 .....                      | 137 |
| 第 6 章 孔口、管嘴和有压管道的恒定流 .....    | 139 |
| 6.1 孔口、管嘴出流和有压管流的基本概念 .....   | 139 |
| 6.2 孔口、管嘴出流水力计算 .....         | 140 |
| 6.3 有压管道的恒定流 .....            | 146 |
| 习题 .....                      | 163 |
| 第 7 章 明渠恒定均匀流 .....           | 169 |
| 7.1 明渠的几何特性 .....             | 169 |
| 7.2 明渠均匀流的特性及其产生条件 .....      | 171 |
| 7.3 明渠均匀流的计算公式 .....          | 172 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 7.4 水力最优断面及允许流速 .....          | 173 |
| 7.5 明渠均匀流的水力计算 .....           | 175 |
| 习题 .....                       | 182 |
| <b>第8章 明渠恒定非均匀流</b> .....      | 185 |
| 8.1 明渠水流的三种流态 .....            | 185 |
| 8.2 断面比能与临界水深 .....            | 185 |
| 8.3 临界底坡、缓坡与陡坡 .....           | 191 |
| 8.4 明渠恒定非均匀渐变流的微分方程 .....      | 192 |
| 8.5 棱柱体明渠中恒定非均匀渐变流水面曲线分析 ..... | 194 |
| 习题 .....                       | 198 |
| <b>第9章 堰流</b> .....            | 200 |
| 9.1 堰流的类型及计算公式 .....           | 200 |
| 9.2 薄壁堰流的水力计算 .....            | 203 |
| 9.3 实用堰流的水力计算 .....            | 206 |
| 9.4 宽顶堰流的水力计算 .....            | 214 |
| 习题 .....                       | 217 |
| <b>参考文献</b> .....              | 219 |
| <b>后记</b> .....                | 221 |

# 第1章 绪论

## 1.1 水力学的任务及研究对象

水力学是用实验和理论分析的方法研究以水为代表的液体的平衡和机械运动规律及其在工程中应用的一门学科。

自然界的物质以三种形式存在,即固体、液体和气体,液体和气体统称为流体。从力学分析的意义上看,水作为一种流体,在其运动的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,所以它能保持一定的形状和体积,能抵抗一定量的拉力、压力和剪切力。而流体则由于分子间距离较大、内聚力很小而几乎不能承受拉力;运动的液体具有一定的抗剪切的能力,但静止的液体则不能抵抗剪切力,即使在很小的剪切力作用下,静止的液体都将发生连续不断的变形运动,直到剪切力消失为止,这称为流体的易流动性。液体与气体两者的差别在于液体分子内聚力比气体分子内聚力大得多,因此,气体易于压缩,而液体难于压缩。但是,当所讨论的气流流速远小于声速时,气体的密度变化很小,气流的运动规律与水流相同,因而水力学的基本原理也适用于气体。

本课程的主要内容包括三大部分:水静力学,研究液体平衡的规律,即液体处于静止状态时作用于液体上各种力之间的关系;水动力学,研究液体处于运动状态时作用于液体上的力与各运动要素(例如速度、加速度等)之间的关系、液体的运动特性以及能量转换规律等;土建工程中的水力计算问题,例如管流、明渠流、堰流以及地下水的水力计算问题等。

水力学是力学的一个分支,在研究水力学问题时,需要应用物理学和理论力学中关于物体平衡及运动规律的理论,如力系的平衡理论、动量定理和动能定理等。液体处于平衡状态时,各液体质点间不存在相对运动,作用于液体上的各种力(包括惯性力)满足力系的平衡条件;一般来说,液体运动时其动量及动能均发生变化,这些变化遵循物理学和理论力学中的动量定理和动能定理。因此,物理学和理论力学是学习水力学必要的基础课。

水力学在许多工程问题中都有着广泛的应用,在土建工程中也会碰到大量与液体平衡及运动规律有关的工程技术问题。例如:城市生活及工业用水的给排水问题,涉及需要解决诸如取水口的布置、管路布置、水管直径及水塔高度的计算、水泵功率及井的产水量等一系列水力学的问题;在铁路、公路、桥梁、航道及港口建设中,又需要讨论桥涵孔径设计、路基排水、隧道通风及排水等水力学的计算问题;在房屋建筑工程中,还会遇到地下水的运动、基础和围堰的渗流等问题。在风程中,会遇到风载荷对构筑物的作用以及风的运动规律及其特性等问题,由于风属于低速气流运动(12级台风风速仅约30 m/s),所以,除注意气体与液体的物理参数不同外,可以应用水力学的知识来讨论。因此,水力学是高等工科院校土建类专业的一门重要的技术基础课。

## 1.2 连续介质模型和理想液体的概念

液体是由大量的不断做无规则热运动的分子所组成的,从微观的角度看,分子之间的空隙随机地变化,并且其尺度远大于分子本身的尺度,因此,液体分子运动的物理量(如流速、压强等)的空间分布是不连续的。由于液体分子运动的随机性,致使其运动物理量在时间分布上也是不连续的。但从宏观的角度看,液体分子的体积极小,在标准状态下,每  $1\text{ cm}^3$  的水,约有  $3.34 \times 10^{22}$  个水分子,分子之间的间距约为  $3 \times 10^{-8}\text{ cm}$ 。如此众多而密集的水分子,各自做不规则的随机运动,导致分子之间不断地发生碰撞,从而进行充分的能量和动量的交换。因此,液体的宏观运动体现了众多液体分子微观运动的统计平均状况,而明显地呈现出均匀性、连续性和确定性。

水力学从宏观的角度去研究液体的机械运动。由于在工程实际问题中所涉及的液体运动的特征尺度及特征时间远远大于分子间距及分子碰撞时间,个别分子的行为几乎不影响大量液体分子统计平均后的宏观物理量(如质量、速度、压力等),因此,从宏观角度去研究液体运动能够满足工程问题所要求的精度。在水力学中假定液体属连续介质,即认为液体所占据的空间完全由液体质点所充满而没有任何空隙,液体质点在时间分布上做连续运动。

液体质点,是指微观上足够大而宏观上又充分小的液体分子团。微观上足够大是指液体分子团内包含足够多的分子,从而它们的运动物理量的统计平均值是一个稳定的数值;宏观上充分小是指分子团的宏观尺寸远远小于所研究问题的特征尺度,使得分子团内各分子的物理量可以看成是均匀分布的。因此,可将它近似地看成是一个几何上没有维度的点。

例如,当讨论液体特征尺度的密度时,以  $L_1$  表示分子运动的尺度,以  $L_2$  表示分子团的尺度,以  $L_3$  表示所讨论问题的特征尺度。若分子团的尺度  $L_2$  取得太小,小到与  $L_1$  同数量级时,分子团中就只有少数几个分子,由于分子运动会使分子团内的分子数目随机变化,分子数目的微小增减都会使分子团的密度值产生明显的变化;反之,若分子团的尺度  $L_2$  取得太大,大到与  $L_3$  同数量级时,则物质分布的不均匀性也将使分子团内各处密度不同。因而,这两种情形都得不到分子团密度的稳定统计平均值。只有当分子团的尺度  $L_2$  小于  $L_3$  大于  $L_1$ ,即保证其微观上足够大而宏观上充分小时,其密度值才是稳定不变的。

采用连续介质假设,就可以应用连续函数的数学分析工具有效地描述液体的平衡和运动的规律。连续介质假设是水力学中第一个基本假设,本书的所有论述均以该假设为基础。顺便指出,对大多数气体运动问题的讨论,也采用了连续介质假设。

## 1.3 液体的主要物理性质

液体机械运动的规律不仅与作用于液体的外部因素及边界条件有关,而更主要的是取决于液体本身所具有的物理性质。在水力学中常常涉及的液体的主要物理性质有惯性、万有引力特性、黏性、压缩性及表面张力特性等。下面分别讨论这些物理性质。

1.3.1 惯性、质量与密度

液体与任何物体一样,具有惯性。惯性是指物体保持其原有运动状态的特性。惯性的大小以质量来度量,质量越大的物体,惯性也越大。液体密度是指单位体积液体所含有的质量,以符号  $\rho$  表示。若一均质液体质量为  $M$ , 体积为  $V$ , 则其密度为

$$\rho=\frac{M}{V} \tag{1.1}$$

密度的量纲为  $\dim\rho=ML^{-3}$ , 国际单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。液体的密度随温度和压强而变化, 在压强变化不太大时, 密度主要随温度而变化, 但这种变化很小。在土建工程中的大多数水力计算问题中, 通常视密度为常数, 采用在一个标准大气压下, 温度为  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的蒸馏水密度来计算, 此时  $\rho=1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

纯净的水在一个标准大气压条件下, 其密度随温度而变化的值如表 1-1 所示, 几种常见液体的密度如表 1-2 所示。

表 1-1 水的密度(标准大气压下)

|                                         |        |         |        |        |        |
|-----------------------------------------|--------|---------|--------|--------|--------|
| $t/^{\circ}\text{C}$                    | 0      | 4       | 10     | 20     | 30     |
| 密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 999.87 | 1 000.0 | 999.73 | 998.23 | 995.67 |
| $t/^{\circ}\text{C}$                    | 40     | 50      | 60     | 80     | 100    |
| 密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 992.24 | 988.07  | 983.24 | 971.83 | 958.38 |

表 1-2 几种常见液体的密度值(标准大气压下)

|                                     |     |        |         |     |       |             |
|-------------------------------------|-----|--------|---------|-----|-------|-------------|
| 流体名称                                | 空气  | 水银     | 汽油      | 酒精  | 四氯化碳  | 海水          |
| 密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 1.2 | 13 600 | 700~750 | 799 | 1 590 | 1 020~1 030 |
| 测定温度/ $^{\circ}\text{C}$            | 20  | 0      | 15      | 15  | 20    | 15          |

1.3.2 万有引力特性、重量与容重

液体还具有万有引力特性。在水力学中所涉及的万有引力就是重力。一质量为  $M$  的液体, 所受重力的大小为

$$G=Mg \tag{1.2}$$

式中  $g$  为重力加速度, 在本课程中  $g$  取  $9.8\text{ m}/\text{s}^2$ 。

液体的容重(又称重度)是指单位体积液体所具有的重量, 以  $\gamma$  表示。一质量为  $M$ 、体积为  $V$  的均质液体, 其容重为

$$\gamma=Mg/V \tag{1.3}$$

$$\gamma=\rho g \tag{1.4}$$

在土建工程中的水力计算问题常视容重为常数, 取在一个标准大气压下,  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  的蒸馏水容重  $\gamma=\rho g=9\,800\text{ N}/\text{m}^3$ , 水银容重则为  $\gamma_{\text{汞}}=\rho_{\text{汞}} g=133\,280\text{ N}/\text{m}^3$ 。

### 1.3.3 黏性与黏性系数

#### 1. 黏性

水具有易流动性,这说明静止的液体没有抵抗剪切变形的能力。但是对于运动的液体,当液体质点之间存在着相对运动时,则质点之间会产生内摩擦力抵抗其相对运动,即运动的液体具有一定的阻抗剪切变形的能力,这种特性称为液体的黏性或黏滞性。运动液体的内摩擦力由分子间内聚力和分子间的动量交换产生,液体分子间的内聚力随温度增高而减小,分子的动量交换则随温度升高而增大。但是,液体分子的动量交换对液体黏性的影响不大,所以,液体的温度增高时黏性减小。

气体的黏性则主要由分子间的动量交换产生,温度增高时,动量交换加剧,因此,气体黏性随温度增高而增大。

#### 2. 黏性对液体运动的影响

如图 1-1 所示,液体沿一个固体平面壁做平行的直线运动,设液体质点是有规则地一层一层向前运动而不相互混掺(这种运动称为层流运动,在后面的章节中将详述层流运动及其特性)。由于液体具有黏性,因而各个液层的流速不相等,最底层的液体分子由于黏性的作用而粘在固体边界上不动,以后各层的质点离开固体边界越远,受固壁的约束作用越小,因而流速越大,但在液体的表面,液体质点与空气接触,空气阻力的作用使得液层表面质点的流速略为减小,如图 1-1(a)所示,在垂直于固壁边界的  $y$  方向上,液体的速度分布是不均匀的。设距离固壁边界为  $y$  处的流速为  $u$ ,在相邻的  $y+dy$  处的流速为  $u+du$ ,由于两相邻液层的流速不同,在两液层之间将成对出现切向阻力,如图 1-1(b)所示(为便于清楚地标示两切向阻力的作用面,图中将相邻两液层拉开一定距离画出)。阻碍两相邻流层之间相对运动的切向阻力称为黏滞力或黏性力,或称为内摩擦力。下面一层液体对上面一层液体作用了一个与流速方向相反的内摩擦力,而上面一层液体对下面一层液体则作用了一个与流速方向一致的内摩擦力,这两个内摩擦力大小相等、方向相反。作用在上面一层液体上的内摩擦力有减缓其流动的趋势,作用在下面一层液体上的内摩擦力有加速其流动的趋势。在流动过程中,由于内摩擦力要做功,因此,必然会有机械能的损失。这将在后面的章节中详细讨论。

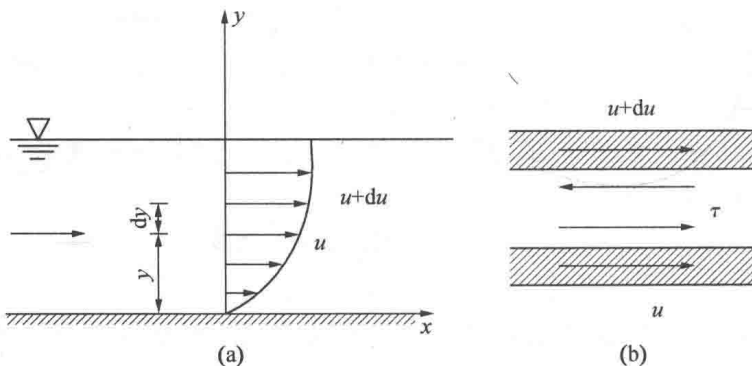


图 1-1

### 3. 黏滞力

由对液体所做的实验知,相邻液层接触面的单位面积上所产生的黏滞力(或内摩擦力) $\tau$ 的大小与两液层之间的速度差  $du$  成正比,与两液层之间的距离  $dy$  成反比,且与液体的种类及物理性质有关,可表示为

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

式中: $\tau$  为单位面积上的内摩擦力,称为内摩擦切应力; $\mu$  称为动力黏滞系数,其值随液体种类及温度、压强的不同而异; $\frac{du}{dy}$  称为流速梯度,是两液层流速差与距离的比值。

#### (1) 流速梯度的物理意义、牛顿内摩擦定律

在层流中取出一高度为  $dy$  的矩形微元体来研究,如图 1-2 所示。

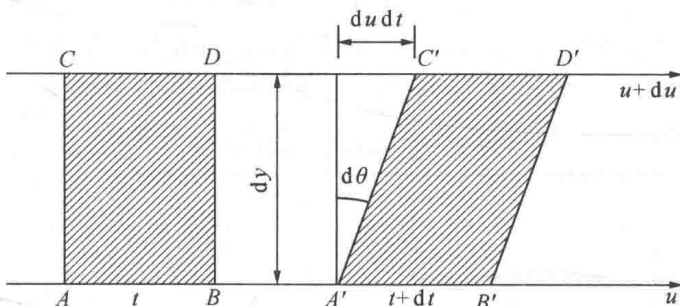


图 1-2

设在瞬时  $t$ , 矩形微元体位于  $ABCD$  处, 经过  $dt$  时段, 运动到新的位置  $A'B'C'D'$ , 由于该液层的上、下两表面流速差  $du$ , 微元体在新位置由原来的矩形变为平行四边形, 即产生了剪切变形(或角变形),  $AC$  与  $BD$  边都转动了  $d\theta$  角, 以  $dt$  除  $d\theta$ , 可得剪切变形速度为  $d\theta/dt$ 。在  $dt$  时段内,  $C$  点较  $A$  点多移动了距离  $du dt$ 。因为  $dt$  为微分时段, 角变形  $d\theta$  亦为微量, 故

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

所以

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

即流速梯度的大小反映了角变形速度, 单位为  $1/\text{秒}(1/\text{s})$ 。于是公式(1.5)又可写为

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.7)$$

式(1.5)及式(1.7)均为牛顿内摩擦定律的表达式, 它表明液体做层流运动时, 相邻液层之间所产生的内摩擦切应力的大小与剪切变形速度成正比。

#### (2) 动力黏滞系数 $\mu$

动力黏滞系数  $\mu$  又称为黏性系数或动力黏度。由式(1.5)可得

$$\mu = \tau / \left( \frac{du}{dy} \right)$$

即  $\mu$  表示单位剪切变形速度所引起的内摩擦切应力。

液体的黏性以黏性系数  $\mu$  度量。黏性大的液体  $\mu$  值大, 黏性小的液体  $\mu$  值小。 $\mu$  的国

际制单位为  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$  或  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(3) 运动黏性系数

为能综合反映液体的黏性和惯性性质,引入运动黏性系数  $\nu$ ,  $\nu$  是动力黏性系数  $\mu$  和液体密度  $\rho$  的比值,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.8}$$

因为  $\nu$  不包含力的量纲,而仅有运动量的量纲( $\text{L}^2 \cdot \text{T}^{-1}$ ),故称  $\nu$  为运动黏性系数,它的国际制单位  $\text{m}^2/\text{s}$ 。对于同一种液体, $\mu$  和  $\nu$  通常是压力和温度的函数,压力的影响很小,主要是对温度的变化较为敏感。

水的运动黏性系数一般按下列经验公式计算:

$$\nu = \frac{0.017\,75}{1 + 0.033\,7t + 0.000\,221t^2} \tag{1.9}$$

式中: $t$  为水温,以 $^{\circ}\text{C}$ 计; $\nu$  的单位为  $\text{cm}^2/\text{s}$ 。工程上应用可直接查表 1-3 所列的不同温度时水的  $\nu$  值。

表 1-3 不同水温时的  $\nu$  值

|                                         |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 温度/ $^{\circ}\text{C}$                  | 0        | 2        | 4        | 6        | 8        | 10       | 12       |
| $\nu/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | 0.017 75 | 0.016 74 | 0.015 68 | 0.014 73 | 0.013 87 | 0.013 10 | 0.012 39 |
| 温度/ $^{\circ}\text{C}$                  | 14       | 16       | 18       | 20       | 22       | 24       | 26       |
| $\nu/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | 0.011 76 | 0.011 80 | 0.010 62 | 0.010 10 | 0.009 89 | 0.009 19 | 0.008 77 |
| 温度/ $^{\circ}\text{C}$                  | 28       | 30       | 35       | 40       | 45       | 50       | 60       |
| $\nu/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | 0.008 39 | 0.008 03 | 0.007 25 | 0.006 59 | 0.006 03 | 0.005 56 | 0.004 78 |

例 1.1 试求水温为  $21^{\circ}\text{C}$  时水的运动黏性系数  $\nu$  和动力黏性系数  $\mu$ 。

解:求  $\nu$  和  $\mu$ ,可采用式(1.9)计算或者查表 1-3,进行线性内插求得水温为  $21^{\circ}\text{C}$  时的  $\nu$  和  $\mu$ 。

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{0.017\,75}{1 + 0.033\,7t + 0.000\,221t^2} = \frac{0.017\,75}{1 + 0.033\,7 \times 21 + 0.000\,221 \times 21^2} \\ &\approx 0.009\,83\,\text{cm}^2/\text{s} = 9.83 \times 10^{-7}\,\text{m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

$$\mu = \rho\nu = 998\,\text{kg}/\text{m}^3 \times 9.83 \times 10^{-7}\,\text{m}^2/\text{s} \approx 9.81 \times 10^{-4}\,\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

或查表 1-3,  $t=20^{\circ}\text{C}$  时,  $\nu=0.010\,10\,\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $t=22^{\circ}\text{C}$  时,  $\nu=0.009\,89\,\text{cm}^2/\text{s}$ ,由线性内插得  $t=21^{\circ}\text{C}$  时,  $\nu=0.009\,995\,\text{cm}^2/\text{s} = 9.995 \times 10^{-7}\,\text{m}^2/\text{s}$ ,相应的

$$\mu = \rho\nu = 998\,\text{kg}/\text{m}^3 \times 9.995 \times 10^{-7}\,\text{m}^2/\text{s} \approx 9.975 \times 10^{-4}\,\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2。$$

4. 牛顿流体与非牛顿流体

牛顿内摩擦定律仅适用于一般流体(例如水、空气等),而对于某些特殊流体是不适用的。根据流体的内摩擦力是否符合牛顿内摩擦定律,流体划分牛顿流体与非牛顿流体两类。内摩擦力符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体,否则为非牛顿流体,其主要差别如图 1-3 所示。

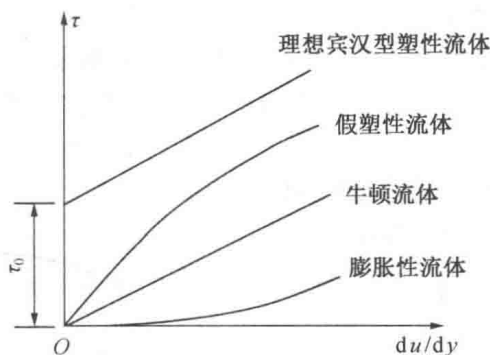


图 1-3

从图中可知,在温度不变的条件下,牛顿流体的  $\tau$  与  $du/dy$  为一斜率不变的直线,说明其剪切应力与剪切变形速度成正比,并且,当剪切变形速度为零时,内摩擦切应力也为零。其余的曲线都表示非牛顿流体,其中理想宾汉型流体(这类流体包括泥浆、血浆等)只有当切应力达到某一值时,才开始剪切变形,但  $\tau$  与  $du/dy$  的关系为线性的;假塑性流体(这类流体包括尼龙、橡胶溶液、颜料、油漆等)及膨胀性液体(如生面团、浓淀粉糊等)的  $\tau$  与  $du/dy$  的关系均是非线性的。本书只讨论牛顿流体。

### 5. 理想液体模型

黏性是实际流体所固有的物理属性,它对流体运动有着不容忽视的重要影响。由于流体运动的复杂性,理论分析和数学求解非常困难。为简化分析工作,提出“理想流体”的概念。理想流体是指无黏性的流体的简化模型,即设  $\mu=0$  的流体。水力学首先对理想液体的运动进行理论分析,然后再用实验研究去检验并修正由于没有考虑黏性所引起的理论分析结果的误差。

### 1.3.4 液体的压缩性和不可压缩液体模型

液体不能承受拉力,但可以承受压力。液体受压宏观体积减小,密度增大,去掉压力则能消除变形而恢复原有体积和密度,这种性质称为液体的压缩性。当温度升高时,液体体积增大,这称为液体的膨胀性。

液体的压缩性以体积压缩系数  $\beta$  度量。若压缩前液体的体积为  $V$ ,压强增加  $\Delta p$  后,体积增量为  $-\Delta V$ ,则其体积应变为  $-\Delta V/V$ 。体积压缩系数定义为

$$\beta = -\frac{\Delta V/V}{\Delta p} \quad (1.10)$$

$\beta$  越大,表明液体越容易压缩。因液体的体积随压强增大而减小, $\Delta V$  与  $\Delta p$  的符号相反,故式(1.10)右端有一负号,而  $\beta$  保持为正值。 $\beta$  的单位为  $\text{m}^2/\text{N}$ 。

体积弹性系数(弹性模量) $K$  是体积压缩系数的倒数,即

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V} \quad (1.11)$$

$K$  的单位为  $\text{N}/\text{m}^2$ 。

不同种类的液体具有不同的  $\beta$  值和  $K$  值。同一种液体, $\beta$  值和  $K$  值随温度和压强略有变化。

水的压缩性很小,当压强在1~100个大气压范围内, $\beta=0.52 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$ ,即每增加一个大气压,水体积相对压缩量只有1/200 00。工程上一般都忽略水的压缩性,视水的密度为常数。但在某些特殊情况下,如讨论管道中的水击问题时,由于压强变化很大,则要考虑水的压缩性。

水的膨胀性也很小,水温每增加1℃,体积相对膨胀率小于1/1 000。因此,在温度变化不大的情况下,一般不考虑水的膨胀性。

忽略其压缩性的液体称为不可压缩液体,这又是一种简化分析模型,称为不可压缩液体模型。

### 1.3.5 表面张力与表面张力系数

液体自由表面在分子作用半径一薄层内,由于分子引力大于斥力而在表层沿表面方向产生的拉力,称为表面张力,液体在表面张力作用下具有尽量缩小其表面的趋势。表面张力很小,一般情况下可忽略不计,仅当研究某些特殊问题时,如微小液滴的运动、水深很小的明渠水流和堰流等,其影响才不能忽略。

表面张力的大小,用表面张力系数 $\sigma$ 度量。 $\sigma$ 是指自由表面单位长度上所受的拉力,单位为N/m。 $\sigma$ 的值随液体种类和温度而变化,在20℃时,对于水 $\sigma=0.074 \text{ N/m}$ ,对于水银 $\sigma=0.54 \text{ N/m}$ 。

细口径管子中的液体表面张力的影响十分显著,可从图1-4所示水力学试验中看到。将直径很小、两端开口的管子插入盛水或水银的容器中,由于表面层液体分子的表面张力作用,以及液体分子与固体壁的附着力的相互作用而发生毛细现象。

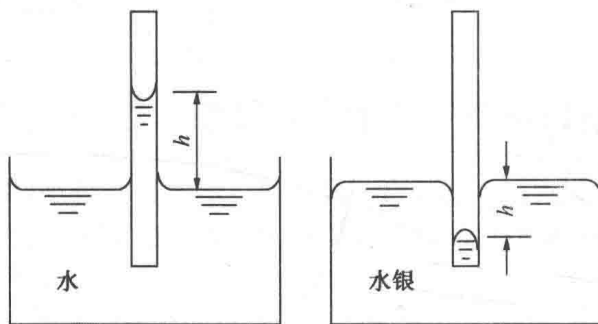


图 1-4

毛细管升高值 $h$ 的大小与管径大小以及液体的性质有关。在20℃的情况下,直径为 $d$ 的玻璃管中的水面高出容器水面的高度

$$h \approx \frac{29.8}{d} (\text{mm})$$

对于水银,玻璃管中汞面低于容器汞面的高度

$$h \approx \frac{10.15}{d} (\text{mm})$$

由此可见,管径越小,则毛细管升高值 $h$ 越大。为避免由于毛细现象影响而使测压管读数产生误差,所选用的测压管直径不应小于1 cm。

## 1.4 作用在液体上的力

无论是处于静止状态或运动状态的液体,都受到各种力的作用。作用于液体上的力,按其物理性质可以分为重力、惯性力、内摩擦力和表面张力等。在水力学中,通常把这些力分为表面力和质量力两大类。

### 1.4.1 表面力

水力学中讨论问题往往需要从液体中分离出一封闭表面所包围的液体作为隔离体进行分析。作用在隔离体表面上的力称为表面力,它是相邻液体或其他介质的作用结果。由连续介质假设,表面力连续分布在隔离体的表面上,表面力的大小与作用面面积成正比。常常采用单位面积上所受的表面力,即应力的概念进行分析。通常,将表面力分解为垂直于作用面和相切于作用面的法向力和切向力两类。

#### 1. 法向力

法向力是指垂直于隔离体表面的表面力。由于液体不能承受拉力,故法向力只能是压力,单位面积上的压力称为压应力或压强。如图 1-5 所示,在隔离体表面上取包含  $a$  点的微小面积  $\Delta A$ ,作用在  $\Delta A$  上的法向力为  $\Delta P$ ,则在微小面积  $\Delta A$  上的平均压强为

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

$p^*$  反映了受压面  $\Delta A$  上压强的平均值。根据连续介质的概念,令  $\Delta A \rightarrow 0$ ,对式(1.12)取极限,则得  $a$  点处的压强为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1.13)$$

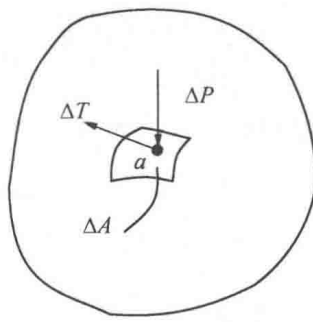


图 1-5

#### 2. 切向力

切向力指与作用面平行的力,切向力与液体的黏性有关,对于层流而言,切向力就是内摩擦力。如图 1-5 所示,作用在  $\Delta A$  上的切向力为  $\Delta T$ ,则  $a$  点的切应力为

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1.14)$$

对于静止液体,液体间没有相对运动,而对于理想液体,忽略黏性,即  $\mu=0$ 。所以,切向力均为零,即  $\tau=0$ 。这两种情况下,作用在  $\Delta A$  上的表面力都只有法向力  $\Delta P$ 。

表面力的国际单位是牛顿(N),压强  $p$  及切应力的国际单位是牛顿/平方米( $\text{N}/\text{m}^2$ )或称为帕(Pa)。

### 1.4.2 质量力

质量力是指作用在隔离体内每个液体质点上的力,其大小与液体的质量成正比。重力、惯性力等都是质量力。若所取的隔离体内的液体是均质的,其质量为  $M$ ,总质量力为  $F$ ,则

$$f = \frac{F}{M} \quad (1.15)$$

$f$  称为单位质量力, 具有与加速度相同的量纲( $L \cdot T^{-2}$ )。设总质量力在直角坐标轴上的投影分别为  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ , 记单位质量力  $f$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标轴上的投影分别为  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$ , 则

$$\begin{cases} f_x = F_x/M, f_y = F_y/M, f_z = F_z/M \\ \mathbf{f} = f_x \mathbf{i} + f_y \mathbf{j} + f_z \mathbf{k} \end{cases} \quad (1.16)$$

水力学中常采用的是单位质量力。

## 1.5 水力学研究方法

现代水力学研究方法通常有理论分析、数值计算和科学实验三种。由于流体运动的多样性和复杂性, 针对不同流体运动问题需采用不同的研究方法。有时同一问题应同时采用不同方法, 以便相互补充、相互验证。

### 1.5.1 理论分析方法

理论分析方法是建立在流体连续介质假定的基础上的, 通过研究作用于流体上的力, 引用经典力学基本原理(如牛顿定律、动量定理、动能定理等), 来建立流体运动的基本方程(如连续性方程、能量方程和动量方程等), 利用数学手段分析求解。由于流体运动的多样性, 对于某些复杂流体运动, 若完全用理论分析方法来解决, 目前还存在许多困难。

### 1.5.2 数值计算方法

数值计算方法是近似求解流体运动的控制方程(如连续性方程、N-S 方程等), 是把描述流体运动的控制方程离散成代数方程组, 在计算机上求解的方法。它是以理论流体力学和计算数学为基础的。数值计算方法可分为有限差分法、有限元法和边界元法等。随着计算机的发展, 数值计算方法已成为研究流体运动的一种重要手段, 并得到了广泛的应用。

### 1.5.3 科学实验方法

科学实验方法是研究流体运动的一种重要手段。它可以检验理论分析或数值计算成果的正确性与合理性, 亦可以直接对理论或数值计算暂时还不能完全求解的流体运动进行研究。科学实验方法可归纳为以下三种方式:

(1) 原型观测。对工程中的实际流体直接进行观测, 收集第一手资料, 进行分析研究, 为检验理论分析、数值计算成果或总结某些基本规律提供依据。

(2) 模型试验。在实验室内, 以相似理论为指导, 把实际工程缩小为模型, 在模型上模拟相应的流体运动, 得出模型流体运动的规律。然后, 再把模型试验结果按照相似关系还原为原型的结果, 以满足实际的工程需要。

(3) 系统试验。由于原型观测受到某些条件局限或因某种流体运动的相似理论还未建立, 因而既不能进行原型观测又不能进行室内模拟试验, 则可在实验室内小规模地造成某种流体运动, 用以进行系统的试验观测, 从中找出规律。

理论分析、数值计算、科学实验这三种方法各有利弊,互为补充、相互促进。理论分析能对某些流体运动进行分析求解,并能指导数值计算和科学实验,但对一些复杂的流体运动的求解还存在着相当大的困难。数值计算能对一些复杂的流动现象进行近似求解,便于改变计算条件,具有灵活、经济等优点,但同时也有它本身的困难和局限性,如解的稳定性、收敛性等。科学实验是研究流动的重要手段,它能检验理论分析和数值计算结果的正确性和可靠性,并为简化理论模型提供依据,其作用是理论分析和数值计算方法所不可替代的。

## 习 题

1.1 体积为  $4 \text{ m}^3$  的水,温度不变,当压强从  $98 \text{ kPa}$  增加到  $490 \text{ kPa}$  时,体积减小  $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。求该水的体积压缩系数及弹性系数。

1.2 要使水的体积缩小  $1\%$ ,该加多大的压强?

1.3 水在温度  $18^\circ\text{C}$  时,如密度  $\rho$  取  $998 \text{ kg/m}^3$ 。求该水的动力黏滞系数  $\mu$  以及运动黏滞系数  $\nu$ 。

1.4 图 1-6 所示为一平板在油面上做水平运动,已知运动速度  $u=1 \text{ m/s}$ ,板与固定边界的距离  $\delta=1 \text{ mm}$ ,油的动力黏性系数  $\mu$  值为  $1.15 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ,由平板所带动的油的运动速度在板的垂直线方向上呈直线分布。求:作用在平板单位面积上的黏滞阻力为多少?

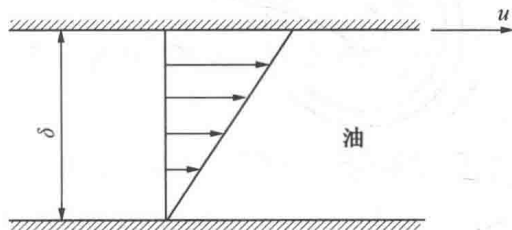


图 1-6 题 1.4

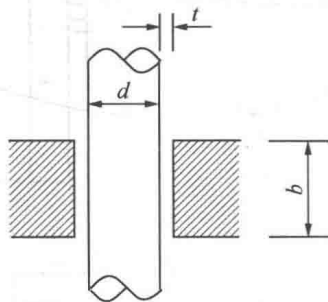


图 1-7 题 1.5

1.5 如图 1-7 所示,一滑动轴承,轴的直径  $d=15 \text{ cm}$ ,轴承宽度  $b=25 \text{ cm}$ ,间隙  $t=0.1 \text{ cm}$ ,其中充满润滑油。已知润滑油的阻力损耗功率为  $12.7 \text{ W}$ ,当轴承以转速  $n=180 \text{ r/min}$  正常转动时,求润滑油的黏性系数  $\mu$ 。

1.6 上端开口的玻璃管,直径为  $1 \text{ cm}$ ,试计算管中毛细水在  $20^\circ\text{C}$  时的上升高度  $h$ ;若玻璃管中改盛汞,试计算因毛细作用而下降的高度  $h$ 。

1.7 两个平行边壁间距为  $25 \text{ mm}$ ,中间为黏滞系数为  $\mu=0.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  的油,有一  $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$  的平板,在距一个边壁  $6 \text{ mm}$  的距离处以  $150 \text{ mm/s}$  的速度拖行。设平板与边壁完全平行,并假设平板两边的流速分布均为线性,求拖行平板的力。

1.8 如图 1-8 所示,有一面积为  $0.16 \text{ m}^2$  的平板在油面上做水平运动,已知运动速度  $v=1 \text{ m/s}$ ,平板与固定边界的距离  $\delta=1 \text{ mm}$ ,油的动力黏度  $\mu=1.15 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,由平板所带动的油的速度成直线分布。试求平板所受的阻力。

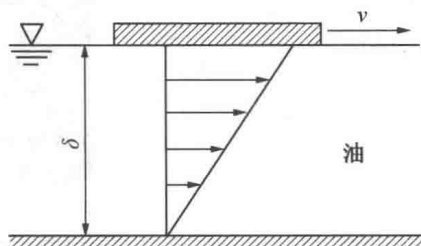


图 1-8 题 1.8