

普通高等教育“十三五”规划教材

# 水力学

(第二版)

刘亚坤 主编



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

(第二版)

刘亚坤 主编



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书是根据教育部高教司制定的水力学课程教学基本要求编写的。全书共 14 章。其内容为：液体的主要物理性质及作用力，水静力学，液体一元运动基本理论，相似原理与量纲分析，液体的流动型态及水头损失，恒定有压管流，明渠恒定流，堰流及闸孔出流，泄水建筑物下游水流的衔接与消能，液体运动的三元分析，渗流，波浪理论，管渠非恒定流，挟沙水流理论基础。各章均有例题、思考题和习题，习题附参考答案。本书注意加强基础理论和拓宽知识面；将控制体概念贯彻到全书的始终，使推演方法达到全书统一；压缩专业内容，充实共性内容；同时也注意内容的编排和讲述方法以便于教与学。

本书可作为水利类各专业（水利水电工程、水工结构工程、水文与水资源、港口航道与海岸工程、海洋工程、海洋资源开发技术、农田水利工程等）的教材，也可作为其他相近专业（土木工程、工程管理、交通工程、道路与桥梁工程、工业与民用建筑工程、建筑环境与能源应用工程等）的教材或参考书。本书对于从事水利水电工程和道路、桥梁、土木、矿业等相关工程的专业技术人员也有一定的参考作用。

### 图书在版编目（CIP）数据

水力学 / 刘亚坤主编. -- 2版. -- 北京：中国水利水电出版社，2016.2

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5170-4107-8

I. ①水… II. ①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(2016)第026944号

|      |   |
|------|---|
| 书 名  | 普通高等教育“十三五”规划教材<br><b>水力学（第二版）</b>  |
| 作 者  | 刘亚坤 主编  |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址：www.waterpub.com.cn<br>E-mail：sales@waterpub.com.cn<br>电话：(010) 68367658（发行部） |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心（零售）<br>电话：(010) 88383994、63202643、68545874<br>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 26.75印张 634千字  |
| 版 次  | 2008年3月第1版 2008年3月第1次印刷<br>2016年2月第2版 2016年2月第1次印刷  |
| 印 数  | 0001—2000册  |
| 定 价  | <b>55.00元</b>   |

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

## 第二版前言

本书自2008年3月由中国水利水电出版社出版以来，主要作为本科生的水力学教材，也作为硕士研究生水力学入学考试的主要参考书。对工科院校的水利和土木有关专业，如水利水电工程、水工结构工程、水文与水资源、港口航道与海岸工程、海洋工程、农田水利工程、海洋资源开发技术、土木工程等专业，水力学是一门重要的技术基础课。全国各院校已编有多种水力学教材，这些教材在已往的教学中都发挥了重要作用。随着科学技术的不断发展，水力学学科也要补充、更新内容；同时通过多年教学实践，水力学教材也需要进一步修改及完善，因此决定出版《水力学（第二版）》。

本书的结构体系及主要内容承传了李鉴初、杨景芳主编的《水力学教程》（1995年高等教育出版社出版），在2008年重编而成《水力学》（中国水利水电出版社出版）。这次再版，我们注意吸收国内外教材的长处，使教材具有较高的思想性、科学性、启发性、先进性和适用性。此外，我们还注意加强基础理论和拓宽知识面；推演方法力求全书统一，将控制体概念贯彻全书的始终；为便于学生复习，每章增加了一定量的思考题；对例题、习题和图表进行了校核修正。

本书包含以下内容：液体的主要物理性质及作用力，水静力学，液体一元运动基本理论，相似原理与量纲分析，液体的流动型态及水头损失，恒定有压管流，明渠恒定流，堰流及闸孔出流，泄水建筑物下游水流的衔接与消能，液体运动的三元分析，渗流，波浪理论，管渠非恒定流，挟沙水流理论基础。

本书由大连理工大学刘亚坤主编。第1、第3、第5、第7、第9、第14章及附图由杨景芳、刘亚坤编写；第2、第4章由崔莉编写；第6、第11章由赵君编写；第8、第13章由李鉴初、刘亚坤编写；第10章由杨景芳、艾丛芳、张运良编写；第12章由崔莉、张运良编写。水力学研究所的研究生为本书绘制全部插图。本书在编写过程中，曾得到校内外有关同志和专家的热情

鼓励和支持，并吸收了他们的许多宝贵经验、意见和建议，尤其是倪汉根教授在本书的编写过程中曾提出了许多宝贵意见。在此一并致以衷心的感谢！

由于水平和时间所限，书中疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2015年11月于大连

# 第一版前言

水力学是研究以水为主的液体的平衡和运动规律及其工程应用的一门学科。对工科院校的水利和土木相关专业，如水利水电工程、水工结构工程、水文与水资源、港口海岸与近海工程、海洋工程、农田水利工程、土木建筑工程等，本课程是一门重要的技术基础课。全国各院校已编有多种水力学教材，这些教材在以往的教学中都发挥了重要作用。随着科学技术的不断发展，水力学学科也要补充、更新内容。为了适应不断变化的社会需要，根据教育部水力学及流体力学课程指导小组审定的水力学课程教学基本要求，结合我们长期积累的教学实践，编写了本书。

本书的结构体系及主要内容传承了李鉴初、杨景芳主编的《水力学教程》教材（1995年，高等教育出版社）。这次重编，我们注意吸收国内外教材的长处，使本教材具有较高的思想性、科学性、启发性、先进性和适用性。此外，我们还注意了加强基础理论和拓宽知识面；推演方法力求全书统一，将控制体概念贯彻全书的始终；为便于学生复习，每章增加了一定量的思考题；对例题、习题和图表进行了校核修正。

本书包含下列内容：液体的主要物理性质及作用力，水静力学，液体一元运动基本理论，相似原理与量纲分析，液体的流动型态及水头损失，恒定有压管流，明渠恒定流，堰流及闸孔出流，泄水建筑物下游水流的衔接与消能，液体运动的三元分析，渗流，波浪理论，管渠非恒定流动，挟沙水流理论基础等。

本书由大连理工大学刘亚坤主编。第1、第3、第5、第7、第9、第10、第14章及附录由杨景芳、刘亚坤编写；第2、第4章由崔莉编写；第6、第11章由赵君编写；第8、第13章由李鉴初、刘亚坤编写；第12章由崔莉、金生、张运良编写。大连理工大学水力学教研室的研究生为本书绘制了全部插图。

本书在编写过程中，曾得到校内外有关同志和专家的热情鼓励和支持，

并吸收了他们的许多宝贵经验、意见和建议，尤其是倪汉根教授在本书的编写过程中曾提出许多宝贵意见。在此，一并谨向他们表示衷心的感谢。

由于水平和时间所限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

**编者**

2007年11月  
于大连理工大学

# 目录

第二版前言

第一版前言

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| <b>第 1 章 液体的主要物理性质及作用力</b> ..... | 1  |
| 1.1 水力学的任务与研究的对象 .....           | 1  |
| 1.2 量纲和单位 .....                  | 2  |
| 1.3 液体的主要物理性质 .....              | 2  |
| 1.4 连续介质和理想液体的概念 .....           | 9  |
| 1.5 作用在液体上的力 .....               | 9  |
| 1.6 水力学的研究方法 .....               | 10 |
| 思考题 1 .....                      | 11 |
| 习题 1 .....                       | 11 |
| <b>第 2 章 水静力学</b> .....          | 13 |
| 2.1 静水压强及其特性 .....               | 13 |
| 2.2 液体平衡微分方程及其积分 .....           | 15 |
| 2.3 重力作用下静水压强的分布规律 .....         | 17 |
| 2.4 压强的量测 .....                  | 21 |
| 2.5 作用在平面上的静水总压力 .....           | 24 |
| 2.6 作用在曲面上的静水总压力 .....           | 29 |
| 2.7 浮体的平衡与稳定 .....               | 31 |
| 2.8 在重力与惯性力同时作用下液体的相对平衡 .....    | 37 |
| 思考题 2 .....                      | 39 |
| 习题 2 .....                       | 41 |
| <b>第 3 章 液体一元运动基本理论</b> .....    | 47 |
| 3.1 液体运动的若干基本概念 .....            | 47 |
| 3.2 描述液体运动的两种方法 .....            | 52 |
| 3.3 用控制体概念分析液体运动的基本方程 .....      | 56 |
| 3.4 连续方程 .....                   | 60 |



|              |                     |            |
|--------------|---------------------|------------|
| 3.5          | 元流的能量方程             | 64         |
| 3.6          | 实际液体恒定总流的能量方程       | 67         |
| 3.7          | 实际液体恒定总流能量方程的应用     | 69         |
| 3.8          | 恒定总流的动量方程与动量矩方程     | 78         |
|              | 思考题 3               | 84         |
|              | 习题 3                | 85         |
| <b>第 4 章</b> | <b>相似原理与量纲分析</b>    | <b>92</b>  |
| 4.1          | 流动的相似               | 92         |
| 4.2          | 相似准则                | 93         |
| 4.3          | 模型试验                | 95         |
| 4.4          | 量纲分析                | 100        |
|              | 思考题 4               | 107        |
|              | 习题 4                | 107        |
| <b>第 5 章</b> | <b>液体的流动型态及水头损失</b> | <b>110</b> |
| 5.1          | 水头损失产生的原因及分类        | 110        |
| 5.2          | 均匀流中沿程水头损失的计算公式     | 112        |
| 5.3          | 液体流动的两型态            | 114        |
| 5.4          | 圆管层流运动沿程水头损失的计算     | 117        |
| 5.5          | 紊流的特征               | 119        |
| 5.6          | 紊流中的流速分布            | 123        |
| 5.7          | 圆管紊流沿程水头损失的计算       | 128        |
| 5.8          | 计算沿程水头损失的谢才公式       | 131        |
| 5.9          | 局部水头损失              | 134        |
|              | 思考题 5               | 141        |
|              | 习题 5                | 142        |
| <b>第 6 章</b> | <b>恒定有压管流</b>       | <b>145</b> |
| 6.1          | 概述                  | 145        |
| 6.2          | 短管的水力计算             | 146        |
| 6.3          | 长管的水力计算             | 154        |
| 6.4          | 管网的水力计算             | 166        |
|              | 思考题 6               | 172        |
|              | 习题 6                | 173        |
| <b>第 7 章</b> | <b>明渠恒定流</b>        | <b>178</b> |
| 7.1          | 明渠均匀流               | 178        |
| 7.2          | 明渠恒定流的流动类型及其判别      | 188        |
| 7.3          | 水跌与水跃               | 195        |
| 7.4          | 明渠渐变流的基本微分方程        | 199        |

|               |                        |            |
|---------------|------------------------|------------|
| 7.5           | 棱柱形渠道中渐变流水面曲线的定性分析     | 200        |
| 7.6           | 明渠渐变流水面曲线的定量计算         | 208        |
| 7.7           | 天然河道的水面曲线计算            | 212        |
|               | 思考题 7                  | 215        |
|               | 习题 7                   | 216        |
| <b>第 8 章</b>  | <b>堰流及闸孔出流</b>         | <b>221</b> |
| 8.1           | 概述                     | 221        |
| 8.2           | 堰流的基本公式                | 225        |
| 8.3           | 闸孔出流的基本公式              | 234        |
| 8.4           | 堰流、闸孔出流的典型问题           | 239        |
|               | 思考题 8                  | 241        |
|               | 习题 8                   | 242        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>泄水建筑物下游水流的衔接与消能</b> | <b>245</b> |
| 9.1           | 概述                     | 245        |
| 9.2           | 底流衔接形式的判别              | 247        |
| 9.3           | 消力池的水力计算               | 251        |
| 9.4           | 挑流衔接与消能                | 259        |
|               | 思考题 9                  | 264        |
|               | 习题 9                   | 264        |
| <b>第 10 章</b> | <b>液体运动的三元分析</b>       | <b>267</b> |
| 10.1          | 液体微团运动的基本形式            | 267        |
| 10.2          | 无涡流与有涡流                | 272        |
| 10.3          | 液体三元运动的连续方程            | 276        |
| 10.4          | 理想液体的运动微分方程            | 278        |
| 10.5          | 理想液体运动微分方程的积分          | 281        |
| 10.6          | 恒定平面势流                 | 283        |
| 10.7          | 实际液体的运动微分方程            | 291        |
|               | 思考题 10                 | 296        |
|               | 习题 10                  | 296        |
| <b>第 11 章</b> | <b>渗流</b>              | <b>300</b> |
| 11.1          | 概述                     | 300        |
| 11.2          | 渗流的基本定律                | 301        |
| 11.3          | 地下水的渐变渗流               | 304        |
| 11.4          | 井和井群                   | 308        |
| 11.5          | 均质土坝的渗流计算              | 313        |
| 11.6          | 渗流的基本微分方程              | 316        |
| 11.7          | 平面渗流的流网解法              | 320        |

|  |            |
|--|------------|
| 思考题 11 .....   | 325        |
| 习题 11 .....  | 325        |
| <b>第 12 章 波浪理论</b> .....                                     | <b>330</b> |
| 12.1 概述 .....  | 330        |
| 12.2 微幅势波运动的基本方程和定解条件 .....                                  | 334        |
| 12.3 微幅平面势波的流速势函数 .....                                      | 338        |
| 12.4 波浪运动特性 .....  | 342        |
| 思考题 12 .....   | 350        |
| 习题 12 .....  | 351        |
| <b>第 13 章 管渠非恒定流</b> .....                                   | <b>352</b> |
| 13.1 有压管路非恒定流 .....  | 352        |
| 13.2 明渠非恒定流 .....  | 368        |
| 思考题 13 .....   | 382        |
| 习题 13 .....  | 383        |
| <b>第 14 章 挟沙水流理论基础</b> .....                                 | <b>385</b> |
| 14.1 概述 .....  | 385        |
| 14.2 泥沙的基本特性 .....   | 385        |
| 14.3 泥沙的起动 .....   | 389        |
| 14.4 推移质运动 .....   | 394        |
| 14.5 悬移质运动 .....   | 397        |
| 思考题 14 .....   | 403        |
| 习题 14 .....  | 403        |
| <b>习题参考答案</b> .....  | <b>405</b> |
| 附图 I 梯形、矩形断面明渠的正常水深 $h_0$ 求解图 .....                          | 412        |
| 附图 II 梯形、矩形、圆形断面明渠的临界水深 $h_c$ 求解图 .....                      | 413        |
| 附图 III 矩形断面渠道收缩断面水深及水跃共轭水深的求解图 .....                         | 414        |
| 附图 IV 矩形断面渠道的收缩断面水深、共轭水深、消能池深度和长度、<br>消能墙高度及综合式消能池的求解图 ..... | 415        |
| <b>参考文献</b> .....  | <b>416</b> |



运动、河渠中的泥沙运动、海洋中的波浪运动、高速水流中的气蚀与掺气问题等。

水力学研究的对象是液体，以水为主，但它的某些规律也可以应用到低黏性的油和不可压缩的气体运动中去。

## 1.2 量纲和单位

### 1.2.1 量纲

从物理学中知道，描述物理现象的物理量有两种：基本物理量和导出物理量。基本物理量是独立的，不能由其他物理量导出；而导出物理量可以由其他物理量导出。一般用量纲表示物理量的性质和类别。在国际单位制（SI）中，水力学中用到的基本物理量有长度、质量、时间，它们的相应量纲分别为 L、M、T。导出物理量可以由定义和物理公式导出，如速度定义为物体单位时间所走的距离，即速度=长度/时间，相应的量纲为  $\dim v = LT^{-1}$ ，类推加速度的量纲为  $\dim a = LT^{-2}$ ；由牛顿第二运动定律得，力=质量×加速度，相应的量纲为  $\dim F = MLT^{-2}$ 。因此，任何一个导出物理量的量纲可以表示为基本物理量量纲的指数乘积形式，即

$$\dim A = L^l M^m T^t \quad (1.2.1)$$

式中： $l$ 、 $m$ 、 $t$  为量纲指数。

以上用长度、质量、时间作为基本物理量所表示的量纲称为 LMT 量纲系统，也称为理论量纲系统。然而，在以往的水力学中，也有用以力（F）代替质量（M）的 LFT 量纲系统，称为实用量纲系统。

### 1.2.2 单位

单位是量度物理量的基准。某物理量与该物理量的单位量之比值称为该物理量的大小。在 LMT 量纲系统中的单位制称为绝对单位制，它又包括两种单位制，即：①国际单位制（SI），其长度、质量、时间的单位分别为 m（米）、kg（千克）、s（秒），而力的单位为 N（牛顿）， $1N = 1kg \cdot m/s^2$ ；②CGS 单位制，其长度、质量、时间的单位分别为 cm（厘米）、g（克）、s（秒），而力的单位为 dyn（达因）， $1dyn = 1g \cdot cm/s^2$ 。

水力学中也曾采用过工程单位制，其长度、力、时间的单位分别为 m、kgf（千克力）、s。

在水力学中主要采用国际单位制，国际单位制和工程单位制中力的换算关系为

$$1kgf = 1kg \times 9.8m/s^2 = 9.8N$$

或者

$$1N = 0.102kgf \quad (1.2.2)$$

## 1.3 液体的主要物理性质

液体的主要物理性质有以下几方面。

### 1.3.1 惯性与万有引力特性

物体所具有保持运动速度和方向不变或在特殊情况下保持静止状态的性质称为惯性。

惯性的大小用物体的质量来量度。质量愈大惯性也愈大。惯性力则是物体抵抗改变其静止或匀速直线运动状态的一种反作用力。当质量为  $m$  的物体以加速度  $a$  运动时，它所具有的惯性力为

$$F_i = -ma \quad (1.3.1)$$

式 (1.3.1) 中的负号说明惯性力的方向与物体加速度的方向相反。

质量为  $m$  的物体在地球上受到的万有引力称为重力，用  $G$  表示。设液体的体积为  $V$ ，质量为  $m$ ，则液体有下面三种密度。

#### 1. 质量密度

单位体积液体的质量称为质量密度，简称为密度，用  $\rho$  表示，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ，对均质液体，则

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.3.2)$$

#### 2. 重量密度

单位体积液体具有的重量称为重量密度，简称为重度或容重，用  $\gamma$  表示，单位为  $\text{N}/\text{m}^3$ ，对均质液体，则

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1.3.3)$$

或者

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1.3.4)$$

#### 3. 相对密度

液体的重量与和它同体积的  $4^\circ\text{C}$  水的重量之比称为相对密度，也称为比重，用  $s$  表示，无单位，即

$$s = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1.3.5)$$

式中： $\gamma_w$ 、 $\rho_w$  为  $4^\circ\text{C}$  时水的重度、密度。

在国际单位制中

$$\rho_w = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$$

$$\gamma_w = 9.8 \text{kN}/\text{m}^3$$

$$s_w = 1$$

不同温度下纯水的密度和重度见表 1.3.1。

表 1.3.1 水的物理性质

| 温度<br>/ $^\circ\text{C}$ | 重度 $\gamma$<br>/ $(\text{kN}/\text{m}^3)$ | 密度 $\rho$<br>/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 动力黏度 $\mu \times 10^{-3}$<br>/ $(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$ | 运动黏度 $\nu \times 10^{-6}$<br>/ $(\text{m}^2/\text{s})$ | 弹性系数 $E \times 10^9$<br>/ $(\text{N}/\text{m}^2)$ | 表面张力系数 $\sigma$<br>/ $(\text{N}/\text{m})$ |
|--------------------------|---|---|---|--|---|--|
| 0                        | 9.805                                     | 999.8                                   | 1.781   | 1.785  | 2.02  | 0.0756                                     |
| 5                        | 9.807                                     | 1000.0                                  | 1.518   | 1.519  | 2.06  | 0.0749                                     |
| 10                       | 9.804                                     | 999.7                                   | 1.307   | 1.306  | 2.10  | 0.0742                                     |
| 15                       | 9.798                                     | 999.1                                   | 1.139   | 1.139  | 2.15  | 0.0735                                     |

续表

| 温度 /℃ | 重度 $\gamma$ / (kN/m <sup>3</sup> ) | 密度 $\rho$ / (kg/m <sup>3</sup> ) | 动力黏度 $\mu \times 10^{-3}$ / (N · s/m <sup>2</sup> ) | 运动黏度 $\nu \times 10^{-6}$ / (m <sup>2</sup> /s) | 弹性系数 $E \times 10^9$ / (N/m <sup>2</sup> ) | 表面张力系数 $\sigma$ / (N/m) |
|-------|------------------------------------|----------------------------------|---|---|--|-------------------------|
| 20    | 9.789                              | 998.2                            | 1.002   | 1.003   | 2.18                                       | 0.0728                  |
| 25    | 9.777                              | 997.0                            | 0.890   | 0.893   | 2.22                                       | 0.0720                  |
| 30    | 9.764                              | 995.7                            | 0.798   | 0.800   | 2.25                                       | 0.0712                  |
| 40    | 9.730                              | 992.2                            | 0.653   | 0.658   | 2.28                                       | 0.0696                  |
| 50    | 9.689                              | 988.0                            | 0.547   | 0.553   | 2.29                                       | 0.0679                  |
| 60    | 9.642                              | 983.2                            | 0.466   | 0.474   | 2.28                                       | 0.0662                  |
| 70    | 9.589                              | 977.8                            | 0.404   | 0.413   | 2.25                                       | 0.0644                  |
| 80    | 9.530                              | 971.8                            | 0.354   | 0.364   | 2.20                                       | 0.0626                  |
| 90    | 9.466                              | 965.3                            | 0.315   | 0.326   | 2.14                                       | 0.0608                  |
| 100   | 9.399                              | 958.4                            | 0.282   | 0.294   | 2.07                                       | 0.0589                  |

### 1.3.2 黏性

液体具有流动性，流动着的液体各流层间可产生内摩擦力以抵抗剪切变形，使各层流动速度不同，这种特性就是黏性。

现在考察如图 1.3.1 所示的一平面固体边壁处液体的流动。由实验发现，在固体壁上液体流动的速度为零，随着离开固体壁面距离的增加，速度也增大。取  $x$  轴正向沿流动方向，取  $y$  轴垂直于  $x$  轴。考虑流动中相距为  $dy$  的两个液体层，下层的流动速度为  $u$ ，上层的流动速度为  $u+du$ 。由于上下两层间存在着速度差，因此开始在同一条铅垂线上的两个液体质点 1、点 2 经过  $dt$  时间后移动的距离分别为  $d_1 = udt$ ， $d_2 = (u+du)dt$ 。由图 1.3.1 可知，液体微团产生的角变形为

$$d\theta \approx \tan d\theta = \frac{d_2 - d_1}{dy} = \frac{du dt}{dy}$$

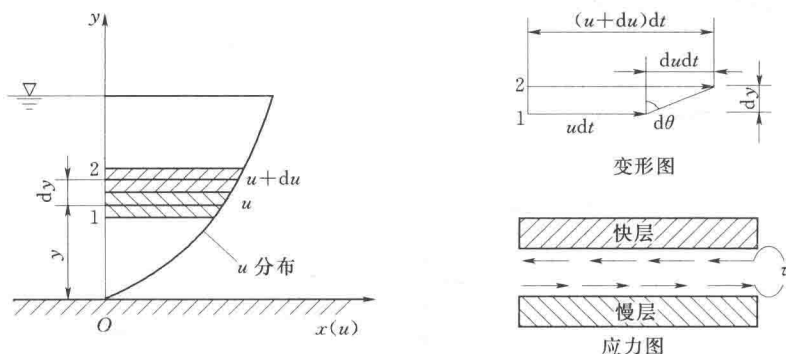


图 1.3.1

单位时间产生的角变形称为剪切变形速度，记为  $\dot{\theta}$ ，则

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1.3.6)$$

由此可见，上述液流中的剪切变形速度等于速度梯度。又由于变形是与应力相关的，所以液层间存在着与剪切变形相应的剪切应力，这是由于运动快的上层带动运动慢的下层向前运动，运动慢的下层阻滞运动快的上层运动所引起的。

牛顿 (I. Newton) 首先提出计算相邻液层间切应力  $\tau$  的公式为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.3.7)$$

式 (1.3.7) 也称为牛顿内摩擦定律。

作用在相邻液层接触面积  $A$  上的总切力  $T$  为

$$T = \tau A = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1.3.8)$$

式中： $\mu$  为液体的动力黏度（简称“黏度”），其大小与液体的种类和温度有关，其单位为  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。 $\text{Pa}$  是压强单位帕斯卡（简称“帕”）的单位符号， $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。 $\text{Pa} \cdot \text{s}$  中文为“帕斯卡秒”。对于  $20^\circ\text{C}$  的水， $\mu = 1.002 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

在水力学中，还常用运动黏度  $\nu$  来表示液体的黏性，定义为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.3.9)$$

式中： $\nu$  的单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ 。因为  $\nu$  具有运动学的量纲，因此称为运动黏度。

水的运动黏度  $\nu$  可以按下式计算

$$\nu = \frac{0.01775 \times 10^{-4}}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1.3.10)$$

式中： $t$  为摄氏温度， $^\circ\text{C}$ 。

温度对于流体的黏性有较大的影响。液体的黏性随温度的增加而减小，而气体的黏性则随温度的增加而增加。这是因为液体的黏性力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，因此液体的黏性随温度的增加而减小。但是，气体分子的间距很大，内聚力极小，而分子运动非常剧烈，气体的黏性力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。在图 1.3.2 中给出了水和空气的运动黏度与温度之间的关系曲线。

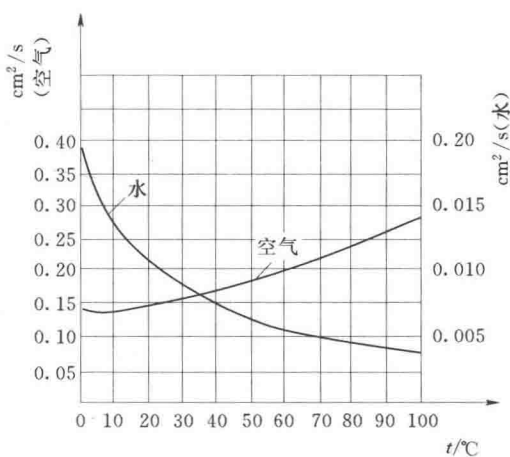


图 1.3.2

在水力学中，将不考虑黏性作用的液体称为理想液体，否则称为实际液体。在图 1.3.3 中水平线  $OE$  表示理想液体。

符合牛顿内摩擦定律，即  $\tau$  与  $du/dy$  成正比且温度不变时， $\mu$  为常数的液体称为牛顿液体，如水、酒精、汽油及水银等。这时切应力与速度梯度之间呈线性关系，如图 1.3.3 中  $OA$  线所示。非牛顿液体有下面三种：

(1) 理想宾汉液体，如泥浆、油漆、牙膏等，切应力与速度梯度之间的关系如图



1.3.3 中  $O'B$  线所示, 这种液体只有当切应力达到初始屈服应力  $\tau_y$  以后才产生变形, 之后  $\tau \propto du/dy$ ,  $\mu$  为常数。

(2) 拟塑性液体, 如黏土和石灰的悬浊液、血液及高分子化合物溶液等。随  $du/dy$  的增加  $\mu$  值减小, 如图 1.3.3 中  $OC$  线所示。

(3) 膨胀性液体, 如淀粉浆糊及浓糖溶液等。随  $du/dy$  的增加,  $\mu$  值亦增加, 如图 1.3.3 中  $OD$  线所示。

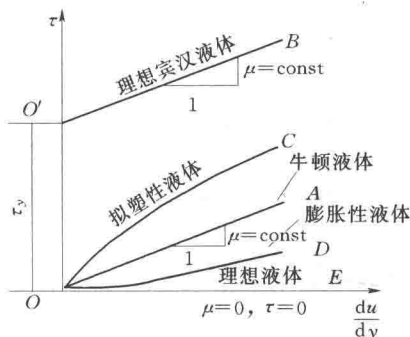


图 1.3.3

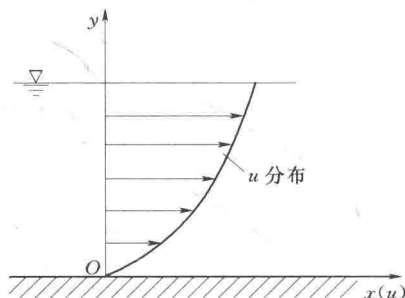


图 1.3.4

水力学中只研究理想液体和牛顿液体。非牛顿液体在化学工程、生物工程中较常遇到。

**【例 1.3.1】** 液体在平板上流动, 如图 1.3.4 所示, 速度  $u$  与距平板的垂直距离  $y$  的关系为  $u=2y^{2/3}$ 。假设液体的动力黏度  $\mu=1.14 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 试求: 距平板 1cm 和 10cm 处的速度梯度 ( $du/dy$ ) 及切应力  $\tau$ 。

解: 由  $u=2y^{2/3}$ , 得

$$\frac{du}{dy} = \frac{4}{3} \frac{1}{y^{1/3}}$$

代入已知数据  $y_1=0.01\text{m}$ ,  $y_2=0.1\text{m}$ , 得

$$\left. \frac{du}{dy} \right|_{y_1} = \frac{4}{3} \times \frac{1}{\sqrt[3]{0.01}} = 6.18 (\text{s}^{-1})$$

$$\left. \frac{du}{dy} \right|_{y_2} = \frac{4}{3} \frac{1}{\sqrt[3]{0.1}} = 2.87 (\text{s}^{-1})$$

由牛顿内摩擦定律

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

所以

$$\tau|_{y_1} = 1.14 \times 10^{-3} \times 6.18 = 7.05 \times 10^{-3} (\text{N/m}^2)$$

$$\tau|_{y_2} = 1.14 \times 10^{-3} \times 2.87 = 3.27 \times 10^{-3} (\text{N/m}^2)$$

### 1.3.3 压缩性

液体在密闭的容器中受压后体积减小, 撤消压力后又恢复原状的性质称为压缩性。液体的压缩性可用压缩系数  $k$  表示。如图 1.3.5 所示, 设活塞上的压强为  $p$  时液体的体积为