

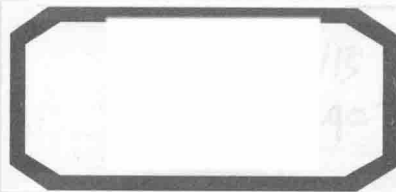
高等学校教材

# 水力学

齐清兰 编



高等教育出版社



高等学校教材

# 水力学

齐清兰 编



高等教育出版社·北京

内容提要

本书是根据高等院校土建类的铁道、道路、桥梁、隧道与地下工程、市政工程、工业与民用建筑、给水排水等专业的水力学课程教学基本要求而编写的。本书内容精练、体系完整、实用性强、力求创新。全书共分十章，系统地阐述了水静力学，水动力学理论基础，流动形态及水头损失，孔口、管嘴出流和有压管路，明渠均匀流，明渠非均匀流，堰流及闸孔出流，渗流，水力学中非线性方程的求根问题等内容。每章正文前有导读，除正文中包括大量的例题外，每章后都附有针对性较强的思考题及习题。

本书包含了本课程重要知识点的 82 个微视频，有助于学习者全面掌握课程的重点、难点及工程应用。

本书可作为高等院校土建类各专业的教材，也可以作为全国注册土木工程师考试的参考书，同时也可供有关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

水力学 / 齐清兰编. -- 北京 : 高等教育出版社, 2019. 8

ISBN 978-7-04-052213-6

I. ①水… II. ①齐… 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 (2019) 第 134493 号



|      |     |      |     |      |     |      |     |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 策划编辑 | 赵向东 | 责任编辑 | 赵向东 | 封面设计 | 王凌波 | 版式设计 | 王艳红 |
| 插图绘制 | 于博  | 责任校对 | 刘莉  | 责任印制 | 耿轩  |      |     |

|      |                   |      |                                                                   |
|------|-------------------|------|-------------------------------------------------------------------|
| 出版发行 | 高等教育出版社           | 网 址  | <a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>         |
| 社 址  | 北京市西城区德外大街4号      |      | <a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>         |
| 邮政编码 | 100120            | 网上订购 | <a href="http://www.hepmall.com.cn">http://www.hepmall.com.cn</a> |
| 印 刷  | 北京市科星印刷有限责任公司     |      | <a href="http://www.hepmall.com">http://www.hepmall.com</a>       |
| 开 本  | 787mm×1092mm 1/16 |      | <a href="http://www.hepmall.cn">http://www.hepmall.cn</a>         |
| 印 张  | 19.25             | 版 次  | 2019 年 8 月第 1 版                                                   |
| 字 数  | 430 千字            | 印 次  | 2019 年 8 月第 1 次印刷                                                 |
| 购书热线 | 010-58581118      | 定 价  | 37.50 元                                                           |
| 咨询电话 | 400-810-0598      |      |                                                                   |

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 52213-00

# 水力学

齐清兰 编

- 1 计算机访问<http://abook.hep.com.cn/1255201>, 或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录, 进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号(20 位密码, 刮开涂层可见), 或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码, 完成课程绑定。
- 4 单击“进入课程”按钮, 开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制, 部分内容无法在手机端显示, 请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题, 请发邮件至[abook@hep.com.cn](mailto:abook@hep.com.cn)。



扫描二维码  
下载 Abook 应用

<http://abook.hep.com.cn/1255201>

# 前言

本书是根据高等院校土建类的铁道、道路、桥梁、隧道与地下工程、市政工程、工业与民用建筑、给水排水等专业的水力学课程教学基本要求而编写的。本书坚持基本理论以必需、够用为度，突出重点、难点并讲究实用。在总体编排上考虑知识的系统全面，而在知识点的介绍上又有相对的独立性，语言通俗易懂，例证丰富。主要特点如下：

1. 遵循必需、够用的原则：搭建最基础的理论体系，以能够满足一般的实际工程需要为基本宗旨。有些理论性较强的内容，与实际工程应用联系不密切，例如三维液体平衡微分方程、N-S 方程等，这些内容过于理论化，土建类的本科生不需要进一步学习，本书不再介绍。

2. 坚持简明推导的原则：本书的理论公式均采用最简明直接的形式导出，更加通俗易懂，便于掌握。传统教材的知识体系大都建立在三元流基础之上，因此一些基本方程式的推导也必须由三元流入手，例如：传统教材中水静力学基本方程由三维液体平衡微分方程导出，而本书是直接由柱状隔离体的平衡关系导出的。

3. 科学设计学习体系：每章之前有导读，可帮助读者理清本章学习内容与前后章节的关系，以及本章的知识脉络，把握本章的重点、难点内容。每章后有大量的思考题和习题，思考题和习题不只局限于对基础理论的简单理解，更侧重于理论联系实际，进一步培养学习者用基本理论解决实际工程问题的能力。

4. 引入 MATLAB 数值计算方法：传统教材只介绍用图解法和试算法解决复杂的高次方程求解问题，过程繁琐且精度较低。MATLAB 作为一个高效的数值计算平台被引入到本书中，实现了理论计算与数值计算的对接。

5. 纳入微视频资源：将本课程的重要知识点（共 82 个）录制成微视频收入教材中，对于学习者全面掌握课程的重点、难点，以及运用课程内容指导实际工程具有重要意义。

本书共分十章，内容包括绪论，水静力学，水动力学理论基础，流动形态及水头损失，孔口、管嘴出流和有压管路，明渠均匀流，明渠非均匀流，堰流及闸孔出流，渗流，水力学中非线性方程的求根问题。

本书由石家庄铁道大学齐清兰主编，石家庄铁道大学霍倩、张少雄、李强，河北省水利工程局高翔参加编写工作。具体分工：第一、三章由齐清兰编写，第二、四章由李强编写，第五、九章由张少雄编写，第六、八章由高翔编写，第七、十章由霍倩

编写，全书由齐清兰统稿。

书稿承蒙天津大学高学平教授审阅并提出宝贵修改意见，在此，表示衷心感谢。由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

## 前 言

编者

2018 年 11 月

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一章 绪论                 | 1  |
| 1.1 概述                 | 1  |
| 1.2 液体的连续介质模型          | 3  |
| 1.3 液体的主要物理性质          | 3  |
| 1.4 作用在液体上的力           | 9  |
| 本章小结                   | 10 |
| 思考题                    | 10 |
| 计算题                    | 10 |
| 第二章 水静力学               | 11 |
| 2.1 静水压强及其特性           | 11 |
| 2.2 重力作用下静水压强的分布规律     | 14 |
| 2.3 测量压强的仪器            | 20 |
| 2.4 作用在平面上的静水总压力       | 25 |
| 2.5 作用在曲面上的静水总压力       | 32 |
| 本章小结                   | 36 |
| 思考题                    | 37 |
| 计算题                    | 38 |
| 第三章 水动力学理论基础           | 43 |
| 3.1 描述液体运动的两种方法        | 43 |
| 3.2 欧拉法的几个基本概念         | 45 |
| 3.3 恒定一元流的连续性方程        | 53 |
| 3.4 理想液体及实际液体恒定元流的能量方程 | 55 |
| 3.5 实际液体恒定总流的能量方程      | 60 |
| 3.6 总水头线和测压管水头线的绘制     | 69 |
| 3.7 实际液体恒定总流的动量方程      | 71 |
| 本章小结                   | 77 |

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| 思考题                     | 78         |
| 计算题                     | 80         |
| <b>第四章 流动形态及水头损失</b>    | <b>84</b>  |
| 4.1 水头损失的物理概念及其分类       | 84         |
| 4.2 实际液体流动的两种形态         | 86         |
| 4.3 均匀流沿程水头损失与切应力的关系    | 91         |
| 4.4 圆管中的层流运动            | 93         |
| 4.5 液体的紊流运动             | 95         |
| 4.6 圆管中的紊流运动            | 99         |
| 4.7 圆管中沿程阻力系数的变化规律及影响因素 | 102        |
| 4.8 计算沿程水头损失的经验公式——谢才公式 | 107        |
| 4.9 局部水头损失              | 109        |
| 本章小结                    | 117        |
| 思考题                     | 118        |
| 计算题                     | 119        |
| <b>第五章 孔口、管嘴出流和有压管路</b> | <b>122</b> |
| 5.1 薄壁小孔口的恒定出流          | 122        |
| 5.2 管嘴的恒定出流             | 125        |
| 5.3 短管计算                | 128        |
| 5.4 长管的水力计算             | 141        |
| 5.5 管网水力计算基础            | 150        |
| 本章小结                    | 156        |
| 思考题                     | 157        |
| 计算题                     | 158        |
| <b>第六章 明渠均匀流</b>        | <b>163</b> |
| 6.1 概述                  | 163        |
| 6.2 明渠均匀流的计算公式          | 166        |
| 6.3 明渠水力最优断面和允许流速       | 167        |
| 6.4 明渠均匀流水力计算的基本问题      | 171        |
| 6.5 无压圆管均匀流的水力计算        | 177        |
| 6.6 复式断面渠道的水力计算         | 182        |
| 本章小结                    | 184        |
| 思考题                     | 185        |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 计算题                      | 186        |
| <b>第七章 明渠非均匀流</b>        | <b>188</b> |
| 7.1 概述                   | 188        |
| 7.2 断面单位能量和临界水深          | 189        |
| 7.3 缓流、急流、临界流及其判别准则      | 193        |
| 7.4 水跃                   | 196        |
| 7.5 明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程    | 203        |
| 7.6 棱柱形渠道恒定非均匀渐变流水面曲线的分析 | 204        |
| 7.7 明渠水面曲线的计算            | 214        |
| 本章小结                     | 222        |
| 思考题                      | 222        |
| 计算题                      | 224        |
| <b>第八章 堰流及闸孔出流</b>       | <b>228</b> |
| 8.1 堰流的特点及其分类            | 228        |
| 8.2 堰流的基本公式              | 230        |
| 8.3 薄壁堰                  | 231        |
| 8.4 实用堰                  | 234        |
| 8.5 宽顶堰                  | 235        |
| 8.6 小桥孔径的水力计算            | 240        |
| 8.7 闸孔出流的水力计算            | 244        |
| 本章小结                     | 247        |
| 思考题                      | 248        |
| 计算题                      | 248        |
| <b>第九章 渗流</b>            | <b>249</b> |
| 9.1 概述                   | 249        |
| 9.2 渗流基本定律               | 250        |
| 9.3 地下水的均匀流和非均匀流         | 254        |
| 9.4 集水廊道和井               | 259        |
| 本章小结                     | 265        |
| 思考题                      | 266        |
| 计算题                      | 266        |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第十章 水力学中非线性方程的求根问题       | 268 |
| 10.1 非线性方程数值计算方法         | 269 |
| 10.2 水力学中的高次方程求解         | 273 |
| 10.3 fzero 函数求解广义非线性方程的根 | 283 |
| 本章小结                     | 291 |
| 附录                       | 292 |
| 参考文献                     | 297 |
| 第一章 绪论                   | 1   |
| 1.1 水力学的发展概况             | 1   |
| 1.2 水力学研究的对象和任务          | 1   |
| 1.3 水力学的研究方法             | 1   |
| 1.4 水力学的学科分类             | 1   |
| 本章小结                     | 1   |
| 思考题                      | 1   |
| 习题一                      | 1   |
| 第二章 流体静力学                | 2   |
| 2.1 流体静力学的基本概念           | 2   |
| 2.2 流体静力学基本方程            | 2   |
| 2.3 流体静力学在工程中的应用         | 2   |
| 2.4 流体静力学在工程中的应用         | 2   |
| 2.5 流体静力学在工程中的应用         | 2   |
| 2.6 流体静力学在工程中的应用         | 2   |
| 2.7 流体静力学在工程中的应用         | 2   |
| 2.8 流体静力学在工程中的应用         | 2   |
| 2.9 流体静力学在工程中的应用         | 2   |
| 2.10 流体静力学在工程中的应用        | 2   |
| 本章小结                     | 2   |
| 思考题                      | 2   |
| 习题二                      | 2   |
| 第三章 流体运动学                | 3   |
| 3.1 流体运动学的基本概念           | 3   |
| 3.2 流体运动学的基本方程           | 3   |
| 3.3 流体运动学在工程中的应用         | 3   |
| 3.4 流体运动学在工程中的应用         | 3   |
| 3.5 流体运动学在工程中的应用         | 3   |
| 3.6 流体运动学在工程中的应用         | 3   |
| 3.7 流体运动学在工程中的应用         | 3   |
| 3.8 流体运动学在工程中的应用         | 3   |
| 3.9 流体运动学在工程中的应用         | 3   |
| 3.10 流体运动学在工程中的应用        | 3   |
| 本章小结                     | 3   |
| 思考题                      | 3   |
| 习题三                      | 3   |
| 第四章 流体动力学                | 4   |
| 4.1 流体动力学的基本概念           | 4   |
| 4.2 流体动力学的基本方程           | 4   |
| 4.3 流体动力学在工程中的应用         | 4   |
| 4.4 流体动力学在工程中的应用         | 4   |
| 4.5 流体动力学在工程中的应用         | 4   |
| 4.6 流体动力学在工程中的应用         | 4   |
| 4.7 流体动力学在工程中的应用         | 4   |
| 4.8 流体动力学在工程中的应用         | 4   |
| 4.9 流体动力学在工程中的应用         | 4   |
| 4.10 流体动力学在工程中的应用        | 4   |
| 本章小结                     | 4   |
| 思考题                      | 4   |
| 习题四                      | 4   |
| 第五章 明渠恒定流                | 5   |
| 5.1 明渠恒定流的基本概念           | 5   |
| 5.2 明渠恒定流的基本方程           | 5   |
| 5.3 明渠恒定流在工程中的应用         | 5   |
| 5.4 明渠恒定流在工程中的应用         | 5   |
| 5.5 明渠恒定流在工程中的应用         | 5   |
| 5.6 明渠恒定流在工程中的应用         | 5   |
| 5.7 明渠恒定流在工程中的应用         | 5   |
| 5.8 明渠恒定流在工程中的应用         | 5   |
| 5.9 明渠恒定流在工程中的应用         | 5   |
| 5.10 明渠恒定流在工程中的应用        | 5   |
| 本章小结                     | 5   |
| 思考题                      | 5   |
| 习题五                      | 5   |
| 第六章 堰流                   | 6   |
| 6.1 堰流的基本概念              | 6   |
| 6.2 堰流的基本方程              | 6   |
| 6.3 堰流在工程中的应用            | 6   |
| 6.4 堰流在工程中的应用            | 6   |
| 6.5 堰流在工程中的应用            | 6   |
| 6.6 堰流在工程中的应用            | 6   |
| 6.7 堰流在工程中的应用            | 6   |
| 6.8 堰流在工程中的应用            | 6   |
| 6.9 堰流在工程中的应用            | 6   |
| 6.10 堰流在工程中的应用           | 6   |
| 本章小结                     | 6   |
| 思考题                      | 6   |
| 习题六                      | 6   |
| 第七章 闸流                   | 7   |
| 7.1 闸流的基本概念              | 7   |
| 7.2 闸流的基本方程              | 7   |
| 7.3 闸流在工程中的应用            | 7   |
| 7.4 闸流在工程中的应用            | 7   |
| 7.5 闸流在工程中的应用            | 7   |
| 7.6 闸流在工程中的应用            | 7   |
| 7.7 闸流在工程中的应用            | 7   |
| 7.8 闸流在工程中的应用            | 7   |
| 7.9 闸流在工程中的应用            | 7   |
| 7.10 闸流在工程中的应用           | 7   |
| 本章小结                     | 7   |
| 思考题                      | 7   |
| 习题七                      | 7   |
| 第八章 孔口出流和有压管路            | 8   |
| 8.1 孔口出流的基本概念            | 8   |
| 8.2 孔口出流的基本方程            | 8   |
| 8.3 孔口出流在工程中的应用          | 8   |
| 8.4 孔口出流在工程中的应用          | 8   |
| 8.5 孔口出流在工程中的应用          | 8   |
| 8.6 孔口出流在工程中的应用          | 8   |
| 8.7 孔口出流在工程中的应用          | 8   |
| 8.8 孔口出流在工程中的应用          | 8   |
| 8.9 孔口出流在工程中的应用          | 8   |
| 8.10 孔口出流在工程中的应用         | 8   |
| 本章小结                     | 8   |
| 思考题                      | 8   |
| 习题八                      | 8   |
| 第九章 管嘴出流和有压管路            | 9   |
| 9.1 管嘴出流的基本概念            | 9   |
| 9.2 管嘴出流的基本方程            | 9   |
| 9.3 管嘴出流在工程中的应用          | 9   |
| 9.4 管嘴出流在工程中的应用          | 9   |
| 9.5 管嘴出流在工程中的应用          | 9   |
| 9.6 管嘴出流在工程中的应用          | 9   |
| 9.7 管嘴出流在工程中的应用          | 9   |
| 9.8 管嘴出流在工程中的应用          | 9   |
| 9.9 管嘴出流在工程中的应用          | 9   |
| 9.10 管嘴出流在工程中的应用         | 9   |
| 本章小结                     | 9   |
| 思考题                      | 9   |
| 习题九                      | 9   |
| 第十章 水力学中非线性方程的求根问题       | 10  |
| 10.1 非线性方程数值计算方法         | 10  |
| 10.2 水力学中的高次方程求解         | 10  |
| 10.3 fzero 函数求解广义非线性方程的根 | 10  |
| 本章小结                     | 10  |
| 附录                       | 10  |
| 参考文献                     | 10  |

# 第一章 绪 论

**本章导读：**水力学是研究液体平衡和机械运动的规律及其实际应用的一门科学。在日常生活中，水力学问题随处可见，例如：水在自来水管中的流动、游泳时感受到的浮力作用、由于排水不畅而导致的城市内涝，等等。

本章首先简要介绍液体的一般特征及水力学的发展历史，然后详细阐述液体的若干物理性质，如黏滞性、压缩性等，在忽略某些特性的基础上，引出水力学的三大基本模型：连续介质模型、理想液体模型、不可压缩液体模型。本章最后一节讨论作用在液体上的力。

## 1.1 概 述

### 1.1.1 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来研究液体平衡和机械运动的规律及其实际应用的一门科学。在一定的条件下，液体的运动规律也适用于气体。本书的研究对象主要是液体。

在地球上，物质存在的主要形式是固体、液体和气体。由于同体积内固体、液体、气体的分子数目、分子间距、分子内聚力等物质内部微观属性存在差异，导致它们的宏观表象也不同：固体有一定的体积和一定的形状；液体有一定的体积而无一定的形状，但有自由表面；气体无一定的体积也无一定的形状。液体和气体统称为流体。

从力学分析意义上看，流体和固体的主要差别在于它们对外力抵抗的能力不同。固体有能力抵抗一定的拉力、压力和剪切力，相应的学科是材料力学、弹性力学等；而流体几乎不能承受拉力，处于静止状态下的流体还不能抵抗剪切力，即流体在很小剪切力的作用下将发生连续不断的变形，直到剪切力消失为止，流体的这种特性称为易流动性。流体可承受压力，但气体与液体压缩性不同，气体易于压缩，而液体难于压缩。由于液体所具有的物理、力学特性与固体和气体的不同，在历史的发展中，逐渐形成了水力学这一门独立学科。

### 1.1.2 水力学的发展历史

对于水力学的萌芽，人们认为是从距今 2 000 多年前西西里岛上的希腊学者阿基米德（Archimedes，公元前 287—公元前 212）写的《论浮体》一文开始的。他对静止液体的力学性质作了第一次科学总结。

15 世纪中叶至 18 世纪下半叶, 生产力有了很大的发展, 遇到许多水力学问题, 但由于科学水平的限制, 人们主要用经验或实验的方法来解决。

1738 年, 瑞士数学家伯努利 (D. Bernoulli, 1700—1782) 出版了著名的《流体力学》, 建立了表达流体位置势能、压强势能和动能之间能量转换关系的伯努利方程。1755 年, 瑞士数学家欧拉 (L. Euler, 1707—1783) 提出了流体的连续介质模型及流体运动的解析方法。这些成就为研究流体运动的规律奠定了理论基础, 在此基础上形成了一门属于数学的古典“流体力学”。

在古典“流体力学”的基础上, 纳维和斯托克斯提出了著名的实际黏性流体的基本运动方程, 为流体力学的长远发展奠定了理论基础。但由于古典“流体力学”所用数学求解的复杂性和流体模型的局限, 不能很好地解决工程问题, 因此科学家与工程技术人员试图通过实验研究的途径制定一些经验公式, 以满足工程需要, 从而形成了“实验流体力学”。虽然有些经验公式缺乏理论基础, 且应用范围狭窄, 但却为后人留下不少宝贵的资源。

从 19 世纪起, 纯理论研究或单独用实验方法研究流体运动规律已不能适应高速发展的生产力需要, 从而形成了理论分析与实验研究并重的现代水力学。1876 年, 英国物理学家雷诺 (O. Reynolds, 1842—1912) 在系统实验的基础上, 揭示了液体运动的两种形态——层流和紊流 (湍流), 于次年又提出了紊流运动的基本方程式——雷诺方程; 1933 年, 尼古拉兹 (J. Nikuradze, 1894—1979) 通过对人工粗糙管的系统实验揭示了沿程阻力系数的变化规律及影响因素; 法国工程师达西 (H. Darcy, 1803—1858)、爱尔兰工程师曼宁 (Robert Manning, 1816—1897)、英国工程师弗劳德 (W. Froude, 1810—1879) 及德国工程师普朗特 (L. Prandtl, 1875—1953) 都进行了大量的实验研究和理论分析, 促进了水力学的新发展。

我国是文明古国, 人们在长期实践中逐步加深了对流体运动规律的认识。例如: 4 000 多年前的大禹治水, 就已经认识到治水应顺水之性, 需引导和疏通; 秦朝在公元前 256—公元前 210 年间修建了都江堰、郑国渠和灵渠, 隋朝在公元 587—610 年完成了南北大运河的修建, 说明当时对明渠水流和堰流的认识已达到相当高的水平; 距今 1 000 多年前的计时工具“铜壶滴漏”, 是根据孔口出流原理使盛水容器水位发生变化来计算时间, 表明当时对孔口出流的规律已有相当的认识; 清朝雍正年间, 何梦瑶在《算迪》一书中提出了流量等于过水断面面积乘以断面平均流速的计算方法。

20 世纪 60 年代以后, 由于计算机的发展与普及, 水力学的应用更是日益广泛。在建筑工程中的应用, 如地基降水、路基排水、地下水渗流、水下与地下建筑物水力荷载的计算、围堰修建等; 在市政工程中的应用, 如桥涵孔径的设计、给水管网计算、排水管路设计、泵站和水塔的设计、隧道通风等; 在城市防洪工程中的应用, 如河道的过流能力计算, 堤、坝的作用力与渗流问题, 防洪闸坝的过流能力问题等; 在建筑环境与设备工程中的应用, 如供热、通风与泵站设计等; 在安全工程中的应用, 如室内自喷消防系统设计等。

### 1.1.3 本课程的基本要求

1. 具有较为完整的理论基础, 包括:

- (1) 掌握水力学的基本概念;
- (2) 掌握液体的总流分析方法;
- (3) 掌握液体运动过程中能量转化与能量损失的规律。

2. 具有对一般流动问题的分析和计算能力, 包括:

- (1) 水力荷载的计算;
- (2) 水头损失的计算;
- (3) 有压管道及明渠的计算;
- (4) 堰、闸过流能力及小桥孔径的计算;
- (5) 工程中渗流问题的计算。

3. 掌握应用水力学实验验证理论的基本方法。

## 1.2 液体的连续介质模型

从分子结构的观点来看, 物质都是由分子组成的, 组成物质的分子是不连续的, 彼此间有空隙。由于分子间有空隙存在, 所以严格说来液体是不连续的。但是, 水力学的任务并不是研究个别分子的微观运动, 而是研究大量分子“集体”所显示的特性, 也就是所谓的宏观特性或宏观量。因此, 可以设想把所讨论的液体无限制地分割成为无限小的微元体, 相当于微小的分子集团, 它的尺度大小同一切流动空间相比微不足道, 却含有大量分子, 并具有一定的质量, 叫做流体的“质点”(或微团)。从而认为, 液体就是由这样一个紧挨着一个的连续质点所组成, 其中再也没有任何空隙的连续体, 即所谓的“连续介质”。同时又认为液体的物理、力学特性, 如密度、速度、压力和能量等, 也具有随同位置而连续变化的性质。这样就忽略了分子运动的复杂性, 而把物理量视为时空连续函数, 可应用数学分析中的连续函数理论来分析液体运动。根据长期的生产和科学实验证明: 利用连续介质模型所得出的有关液体运动规律与客观实际十分符合。

## 1.3 液体的主要物理性质

力对液体的作用, 都是通过液体自身的物理性质来表现的。因此, 从宏观角度来探讨液体的物理性质是研究液体运动的出发点。

在水力学中常常出现的液体主要物理性质有重度和黏性, 在某些情况下还要涉及液体的压缩性、表面张力和汽化压强等。

1.3.1 密度和重度

液体和固体一样，也具有质量和重量。

均质液体的密度  $\rho$  是单位体积液体所具有的质量，即

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1.3.1}$$

其国际单位制单位是  $\text{kg/m}^3$ 。

均质液体的重度  $\gamma$  是单位体积液体所具有的重量，即

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \tag{1.3.2}$$

其国际单位制单位是  $\text{N/m}^3$ 。在水力学计算中一般采用  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

纯净的水在一个标准大气压条件下，其密度和重度随温度的变化见表 1.3.1。几种常见流体的重度见表 1.3.2。

表 1.3.1 水的密度和重度

| 温度 / $^{\circ}\text{C}$ | 重度 / $(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$ | 密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 温度 / $^{\circ}\text{C}$ | 重度 / $(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$ | 密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ |
|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 0                       | 9 798.73                            | 999.87                               | 40                      | 9 723.95                            | 992.24                               |
| 4                       | 9 800.00                            | 1 000.00                             | 50                      | 9 683.09                            | 988.07                               |
| 10                      | 9 797.35                            | 999.73                               | 60                      | 9 635.75                            | 983.24                               |
| 20                      | 9 782.65                            | 998.23                               | 80                      | 9 523.94                            | 971.83                               |
| 30                      | 9 757.57                            | 995.67                               | 100                     | 9 392.12                            | 958.38                               |

表 1.3.2 几种常见流体的重度

| 流体名称                                | 空气    | 水银      | 汽油          | 酒精      | 四氯化碳   | 海水           |
|-------------------------------------|-------|---------|-------------|---------|--------|--------------|
| 重度 / $(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$ | 11.82 | 133 280 | 6 664~7 350 | 7 778.3 | 15 600 | 9 996~10 084 |
| 温度 / $^{\circ}\text{C}$             | 20    | 0       | 15          | 15      | 20     | 15           |

在工程计算中，通常将水的密度和重度看作常量，取  $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ t/m}^3$ ，重度  $\gamma = 9\,800 \text{ N/m}^3$ 。

1.3.2 黏滞性和理想液体模型

液体是具有黏滞性的。当液体处在运动状态时，即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



摩擦力又称为黏滞力。黏滞性是液体的基本特性之一，只有在相对运动时才显示出来，静止液体是不显示黏滞性的。

如图 1.3.1 所示，液体沿着一个固体平面壁作平行的直线流动，且液体质点是有规则的一层一层向前运动而不互相混掺（这种各液层间互不干扰的运动称为“层流运动”，后面将详细讨论这种运动的特性）。由于液体具有黏滞性，使得靠近壁面附近流速较小，远离壁面处流速较大，因而各不同液层的流速大小是不相同的。若距固体边界为  $y$  处的流速为  $u$ ，则在相邻的  $y + dy$  处的流速为  $u + du$ ，由于两相邻液层的流速不同（即存在着相对运动），在两液层之间将成对地产生内摩擦力。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摩擦力，这两个力大小相等，方向相反，都具有抵抗其相对运动的性质。

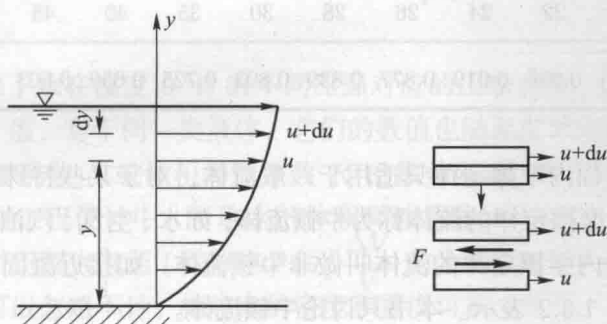


图 1.3.1 黏性液体的相对运动

1686 年，牛顿 (Isaac Newton) 提出并经后人实验证明：内摩擦力  $F$  与液体的性质有关，并与流速梯度  $\frac{du}{dy}$  及接触面积  $\omega$  成正比，而与接触面上的正压力无关。则内摩擦力可表示为

$$F \propto \omega \frac{du}{dy} \quad (1.3.3)$$

引入比例系数  $\mu$ ，并以  $\tau$  表示单位面积上的内摩擦力（即黏滞切应力），则

$$\tau = \frac{F}{\omega} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.3.4)$$

上式就是著名的“牛顿内摩擦定律”，它可表述为：作层流运动的液体，相邻流层间单位面积上所作用的内摩擦力（或黏滞力），与流速梯度成正比，同时与液体的性质有关。式中的  $\mu$  是与液体的物理性质有关的比例系数，称为动力黏度（或动力黏滞系数）。黏性大的液体  $\mu$  值大，黏性小的液体  $\mu$  值小。 $\mu$  的国际单位制单位为  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$  或  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

液体的黏滞性还可以用  $\nu$  来表示， $\nu$  称为运动黏度或运动黏滞系数，与动力黏滞系数的关系为  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ，其国际单位制单位是  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

液体的黏滞系数主要随温度变化。水的运动黏滞系数  $\nu$  随温度变化的经验公式为

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1.3.5)$$

其中  $t$  为水温，以  $^{\circ}\text{C}$  计， $\nu$  以  $\text{cm}^2/\text{s}$  计，为了使用方便，在表 1.3.3 中列出不同水温时的  $\nu$  值。

表 1.3.3 不同水温时的  $\nu$  值

| 温度 / $^{\circ}\text{C}$                                  | 0     | 2     | 4     | 6     | 8     | 10    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    |
|----------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\nu / (10^{-2} \times \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | 1.775 | 1.674 | 1.568 | 1.473 | 1.387 | 1.310 | 1.239 | 1.176 | 1.118 | 1.062 | 1.010 |
| 温度 / $^{\circ}\text{C}$                                  | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    | 55    | 60    |
| $\nu / (10^{-2} \times \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | 0.989 | 0.919 | 0.877 | 0.839 | 0.803 | 0.725 | 0.659 | 0.603 | 0.556 | 0.515 | 0.478 |

必须指出，牛顿内摩擦定律只适用于一般流体，对于某些特殊流体是不适用的。一般把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，如水、空气、汽油、煤油、甲苯、乙醇等。不符合牛顿内摩擦定律的流体叫做非牛顿流体，如接近凝固的石油、泥浆等。它们的差别可用图 1.3.2 表示。本书只讨论牛顿流体。

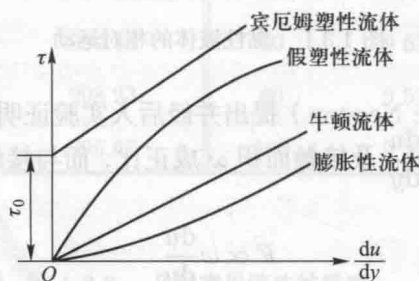


图 1.3.2 牛顿流体和非牛顿流体图示

当考虑液体的黏滞性后，将使液体运动的分析变得很复杂。在水力学中，为了简化分析，可以对液体的黏滞性暂不考虑，而引出没有黏滞性的理想液体模型。在理想液体模型中，黏滞系数  $\mu = 0$ 。由理想液体模型分析所得的结论应用到实际液体中时，必须对没有考虑黏滞性而引起的偏差进行修正。

### 1.3.3 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。液体受压后体积减小，同时其内部将产生一种企图恢复原状的内力（弹性力）与所受压力维持平衡，撤除压力后，液体可立即恢复原状，这种性质称为液体的压缩性或弹性。

液体的压缩性可用体积压缩系数  $\beta$  或体积弹性系数  $K$  来量度。设压缩前的体积为  $V$ ，密度为  $\rho$ ，压强增加  $\Delta p$  后，体积减小  $\Delta V$ ，密度增加  $\Delta \rho$ ，其体积压缩系数为

(01.5.1)

$$\beta = -\frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{\Delta p} \tag{1.3.6}$$

由于当  $\Delta p$  为正时， $\Delta V$  必为负值，故上式右端加一负号，保持  $\beta$  为正值。 $\beta$  的单位为  $\text{m}^2/\text{N}$ 。体积压缩系数又可表示为：

表面力是指作用在所研究的液体表面上，且垂直于该表面的力。因液体内部各点均受到周围液体的压力，故又称面压力。因液体内部各点均受到周围液体的压力，故又称面压力。

$$\beta = \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot \frac{1}{\Delta p} \tag{1.3.7}$$

体积弹性系数  $K$  是体积压缩系数的倒数，即

用于  $\Delta p$  上应取绝对值。

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}} = \frac{\Delta p}{\frac{\Delta \rho}{\rho}} \tag{1.3.8}$$

$K$  的单位为  $\text{N}/\text{m}^2$ 。

表 1.3.4 列出了水在温度  $0^\circ\text{C}$  时不同压强对应的压缩系数。不同种类的液体具有不同的  $\beta$  和  $K$  值，对于同一类液体，它们的数值也随温度和压强而变化。一般来说，水的体积压缩系数  $\beta$  或体积弹性系数  $K$  的数值随温度和压强的变化不大，可近似看作常数。在工程设计中，可取水的体积弹性系数  $K \approx 2.1 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。此值说明，若  $\Delta p$  为 1 个工程大气压（约  $98 \text{ kPa}$ ）， $\frac{\Delta V}{V}$  约为  $1/20\,000$ ，所以水的压缩性很小，一般情况下可以忽略不计，相应水的密度和重度可视为常数。只有在某些特殊情况下，才考虑水的压缩性，如输水管路中的水击现象，就必须考虑水的压缩性，否则将会导致错误的结果。总之，在可以忽略液体压缩性时，引出“不可压缩液体模型”，使分析简化。

表 1.3.4 水的压缩系数 ( $0^\circ\text{C}$ )

| 压强 /at <sup>①</sup>                             | 5     | 10    | 20    | 40    | 80    |
|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\beta/(10^{-9}\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$ | 0.538 | 0.536 | 0.531 | 0.528 | 0.515 |

① at 为工程大气压，在国家标准《量和单位》（GB 3100~3102—93）中为不赞成使用的非法定计算单位，与 SI 单位的换算关系为  $1 \text{ at}=98\,066.5 \text{ Pa}$ 。考虑到行业的具体情况，本书对 at 予以保留。

1.3.4 表面张力及表面张力系数

液体表面上的液体分子由于所受两侧分子引力不平衡，而承受极其微小的拉力，这种拉力称为表面张力。它可使水滴成半球状悬在水龙头出口而不下滴。当细管子插入液体中时，表面张力会使管中的液体自动上升或下降一个高度，形成所谓的毛细现象。如图 1.3.3 所示，对于  $20^\circ\text{C}$  的水，玻璃管中的水面高出容器水面的高度  $h$  约为

$$h = \frac{29.8}{d} \tag{1.3.9}$$