

高等学校教材

# 水力学

李炜 徐孝平 主编

武汉水利电力大学出版社

高 等 学 校 教 材

# 水 力 学

李 炜 徐孝平 主编

武汉水利电力大学出版社

(鄂) 新登字 15 号

### 内 容 提 要

根据国家教委关于高等学校工科基础课教材建设规划的原则精神和作者们多年来的教学实践,本书编写工作注重对教材内容进一步提炼并增加水环境保护有关的基础知识,以期满足专业面日益拓宽的需要和为培养 21 世纪高素质建设人才服务。

本书包括导论、水静力学、水动力学基础、层流和紊流、水流阻力及水头损失、量纲分析和液流相似原理、恒定管流、明槽恒定流动、孔口(管嘴)出流、堰顶溢流和闸孔出流、泄水建筑物下游的水流衔接与消能、有压管道和明槽非恒定流、渗流、紊动射流和紊动扩散等 12 章。

本书可作为高等工科院校水利水电类、土建类、水环境保护类专业及其他有关专业大学本科的教材,也可作为教师及研究生使用的教学参考书。并可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水力学/李 炜, 徐孝平主编. —武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.6  
ISBN 7-81063-081-4

I. 水… II. ①李… ②徐… III. 水力学—高等学校—教材 IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 21257 号

责任编辑: 杨照萍 责任校对: 徐 虹 封面设计: 涂 驰

武汉水利电力大学出版社出版发行

(武汉市武昌东湖南路 8 号, 邮编 430072)

湖北省国营人民大垸印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 1/16 印张: 30.125 字数: 768 千字  
2000 年 6 月第 1 版 2000 年 6 月第 1 次印刷 印数: 0001—4000 册  
ISBN 7-81063-081-4/TV·13 定价: 35.00 元

# 前 言

本书是以高等工业院校水利水电及河流工程类专业为主要对象而编写的水力学教材。其他专业,例如土建及路桥类专业和水资源环境保护专业,可以根据教学需要对内容进行一定的取舍后使用。

本书编写原则是:在保证理论基础的前提下,精选内容,基本原理和物理概念阐述得更明确,重点突出,更有利于教学;在着眼于提高学生分析和解决问题能力的基础上,适当增加学科前沿内容,为培养21世纪宽基础、高素质的专业人才服务。

水力学是一门技术基础课程,有些章节的内容,例如波浪理论和动床水力学,留到有关专业课程中去,在此不作叙述,以适应减少课内学时的需要。为了便于教学安排,使全书结构更紧凑,表述更流畅,将原分在两章论述的内容合为一章,如流态及水头损失、明槽均匀流及恒定非均匀流、管道及明槽非恒定流等。

水环境保护日益成为全球关注的问题。为此,在主要阐述传统水力学理论和方法的基础上,增加了水流传质和传热的基本理论——不可压缩变密度流动及异质混合扩散理论。与此同时,在方法上以总流分析法为主,适当补充了流场分析法。

为了适应电子计算机在水力计算中的应用这一发展趋势,书中对管网、明槽恒定流水面曲线、管道及明槽非恒定流动等部分都介绍了应用电算的例题,并安排了相应的习题。各章按照教学需要,选编了一定数量的例题和习题。全书的参考文献一并置于书末,并按作者拼音和年序排列。

本书编写工作采取先由主编提出编写大纲,集体磋商,最后由主编定稿。全书由李炜、徐孝平主编。各章的具体分工是:第一章徐孝平、李炜;第二章张晓元;第三章杨小亭、李炜;第四章徐孝平;第五章黄纪忠;第六章赵明登;第七章赵昕;第八章李大美;第九章霍耀东、李炜;第十章齐鄂荣;第十一章童汉毅;第十二章槐文信、李炜。

在本书的编写过程中,得到了武汉水利电力大学出版社的关心和支持,兄弟院校的同行也提供了很多宝贵意见和建议。在此我们表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中缺点和错误在所难免,恳切希望读者给予指正。

编者 1999年6月于武昌

EAB04107

## 目 录

## 第一章 导 论

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第一节 水力学的任务及发展概况       | 1  |
| 第二节 流体的基本特征和连续介质假设    | 3  |
| 一、流体与固体               | 3  |
| 二、连续介质假设              | 3  |
| 第三节 流体的主要物理性质及作用于流体的力 | 4  |
| 一、惯性、质量和密度            | 4  |
| 二、流体的重量和重度            | 5  |
| 三、粘滞性、粘度或粘性系数         | 6  |
| 四、液体的压缩性              | 9  |
| 五、液体的表面张力             | 10 |
| 六、作用于流体的力             | 11 |
| 第四节 水的异常特性            | 11 |
| 一、水的异常特性              | 11 |
| 二、水的异常特性与水分子结构的关系     | 12 |
| 第五节 水力学的研究方法          | 13 |
| 习 题                   | 14 |

## 第二章 水静力学

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一节 静水压强及其特性           | 15 |
| 第二节 液体平衡微分方程           | 17 |
| 一、液体平衡微分方程             | 17 |
| 二、力的势函数和有势力            | 18 |
| 三、等压面                  | 19 |
| 第三节 重力作用下的液体平衡         | 19 |
| 一、重力作用下静水压强的基本公式       | 20 |
| 二、压强的量度                | 21 |
| 三、水头和单位势能              | 22 |
| 四、压强的量测                | 23 |
| 第四节 几种质量力同时作用下的液体平衡    | 26 |
| 一、液体与容器一道作直线等加速运动的情况   | 27 |
| 二、液体随容器绕铅直轴作等角速旋转运动的情况 | 28 |
| 第五节 平面上的静水总压力          | 31 |
| 一、静水压强分布图              | 31 |
| 二、利用压强分布图求矩形平面上的静水总压力  | 31 |

|                    |    |
|--------------------|----|
| 三、用分析法求任意平面上的静水总压力 | 33 |
| 第六节 曲线上的静水总压力      | 35 |
| 第七节 浮力及浮体与潜体的稳定性   | 38 |
| 一、浮力与物体的沉浮         | 38 |
| 二、潜体的平衡及其稳定性       | 40 |
| 三、浮体的平衡及其稳定性       | 40 |
| 习 题                | 43 |

### 第三章 水动力学基础

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一节 描述液体运动的两种方法         | 49 |
| 一、拉格朗日法                 | 49 |
| 二、欧拉法                   | 51 |
| 第二节 液体运动的一些基本概念         | 53 |
| 一、恒定流和非恒定流              | 53 |
| 二、迹线与流线                 | 54 |
| 三、流管、元流和总流              | 55 |
| 四、一维流、二维流和三维流           | 56 |
| 五、均匀流和非均匀流              | 56 |
| 第三节 液流的连续性方程            | 57 |
| 一、液流的连续性微分方程            | 57 |
| 二、元流和总流的连续性方程           | 59 |
| 第四节 理想液体的运动方程           | 60 |
| 一、理想液体的运动微分方程           | 61 |
| 二、理想液体运动的伯努利积分和伯努利方程    | 62 |
| 三、理想液体的伯努利方程的意义         | 63 |
| 四、相对运动的能量方程             | 63 |
| 第五节 实际液体总流的能量方程         | 64 |
| 一、实际液体元流的伯努利方程          | 65 |
| 二、渐变流过水断面上动水压强的分布规律     | 65 |
| 三、实际液体恒定总流的能量方程         | 66 |
| 第六节 恒定总流的动量方程和动量矩方程     | 74 |
| 一、恒定总流的动量方程             | 74 |
| 二、动量方程应用举例              | 76 |
| 三、恒定总流的动量矩方程            | 79 |
| 第七节 空化和空蚀现象             | 79 |
| 第八节 液体微团运动的基本形式，有旋流与无旋流 | 80 |
| 一、液体微团运动的基本形式           | 80 |
| 二、有旋流与无旋流               | 83 |
| 三、理想液体势流的拉格朗日—柯西积分      | 86 |
| 第九节 恒定平面势流              | 87 |
| 一、恒定平面势流的速度势和流函数        | 87 |
| 二、流网及其绘制                | 90 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第十节 实际液体运动微分方程        | 93  |
| 一、液体质点上的应力            | 93  |
| 二、液体质点变形和应力的关系        | 94  |
| 三、不可压缩实际液体运动微分方程      | 95  |
| 第十一节 实际液体的能量方程        | 98  |
| 第十二节 不可压缩实际液体变密度流基本方程 | 101 |
| 一、液流传热变密度流基本方程        | 101 |
| 二、液流传质变密度流基本方程        | 102 |
| 三、小结                  | 104 |
| 习 题                   | 107 |

#### 第四章 层流和紊流及水流阻力和水头损失

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第一节 实际流体的两种流动型态       | 115 |
| 一、雷诺试验                | 115 |
| 二、雷诺数和临界雷诺数           | 117 |
| 三、雷诺数的物理意义            | 118 |
| 第二节 紊流运动              | 119 |
| 一、紊流的形成               | 119 |
| 二、紊流的主要特征及表示法         | 121 |
| 三、紊流的半经验理论            | 123 |
| 第三节 边界层理论简介和水头损失分类    | 128 |
| 一、边界层基本概念             | 128 |
| 二、层流边界层和紊流边界层         | 129 |
| 三、边界层的分离              | 130 |
| 四、流动阻力及水头损失的种类        | 131 |
| 第四节 恒定均匀流水力坡度与切应力的关系  | 132 |
| 一、恒定均匀总流平均切应力与水力坡度的关系 | 132 |
| 二、圆管断面切应力的分布          | 134 |
| 三、宽矩形明槽断面切应力的分布       | 134 |
| 四、均匀流沿程水头损失公式         | 136 |
| 第五节 圆管和宽矩形明槽中的层流      | 136 |
| 一、圆管中的均匀层流            | 136 |
| 二、宽矩形明槽的层流运动          | 138 |
| 第六节 紊流的流速分布和水头损失      | 140 |
| 一、粘性底层和壁面粗糙           | 141 |
| 二、尼古拉兹试验曲线            | 142 |
| 三、光滑区的流速分布及水头损失系数     | 144 |
| 四、粗糙区的流速分布及水头损失系数     | 146 |
| 五、紊流过渡区               | 146 |
| 六、实用管道的当量粗糙和穆迪图       | 147 |
| 七、明槽流动的水头损失系数         | 149 |
| 八、计算沿程水头损失的经验公式       | 152 |
| 第七节 局部水头损失            | 156 |

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 一、圆管突然扩大的局部水头损失 | 157 |
| 二、断面突然收缩        | 158 |
| 三、管路进口          | 158 |
| 四、圆断面缓弯管        | 159 |
| 五、截门和闸阀         | 160 |
| 六、急转弯管          | 161 |
| 七、圆形渐扩管和渐缩管     | 161 |
| 八、闸门槽及方形喇叭口     | 162 |
| 九、叉管和管内渐变段      | 162 |
| 第八节 绕流阻力        | 165 |
| 习 题             | 168 |

## 第五章 量纲分析和液流相似原理

|                  |     |
|------------------|-----|
| 第一节 量纲、单位和无量纲数   | 172 |
| 一、量纲和单位          | 172 |
| 二、有量纲量和无量纲数      | 174 |
| 第二节 量纲和谐原理及量纲分析法 | 174 |
| 一、量纲和谐原理         | 174 |
| 二、量纲分析法          | 175 |
| 第三节 液流相似原理       | 179 |
| 一、液流相似的意义        | 179 |
| 二、液流相似的特征        | 180 |
| 三、牛顿相似原理         | 181 |
| 第四节 模型相似准则       | 182 |
| 一、重力(弗劳德)相似准则    | 183 |
| 二、粘滞力(雷诺)相似准则    | 184 |
| 三、弹性力(柯西)相似准则    | 186 |
| 四、表面张力(韦伯)相似准则   | 186 |
| 五、流动非恒定性的相似准则    | 186 |
| 六、压力相似准则         | 187 |
| 七、紊流阻力相似准则       | 187 |
| 八、由基本方程推求各项相似准则  | 189 |
| 第五节 相似原理的应用举例    | 190 |
| 习 题              | 192 |

## 第六章 恒定管流

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 第一节 概述          | 194 |
| 第二节 短管水力计算      | 195 |
| 一、输水能力和作用水头的计算  | 195 |
| 二、管道直径的设计计算     | 197 |
| 三、压强沿程变化及水头线的绘制 | 199 |
| 四、计算实例          | 201 |

|               |     |
|---------------|-----|
| 第三节 串联管道与并联管道 | 206 |
| 一、串联管道        | 206 |
| 二、并联管道        | 206 |
| 第四节 枝状管网与环状管网 | 207 |
| 一、枝状管网        | 208 |
| 二、环状管网        | 208 |
| 第五节 沿程均匀泄流    | 212 |
| 习 题           | 213 |

## 第七章 明槽恒定流动

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第一节 概述               | 217 |
| 一、明槽的底坡              | 217 |
| 二、明槽的横断面             | 218 |
| 第二节 明槽恒定均匀流          | 219 |
| 一、明槽均匀流的特性和形成条件      | 219 |
| 二、明槽恒定均匀流的水力计算       | 220 |
| 三、明槽均匀流水力计算中的几个问题    | 223 |
| 第三节 明槽恒定渐变流          | 229 |
| 一、明槽恒定流动的基本方程与断面比能   | 229 |
| 二、明槽流动的三种流态          | 231 |
| 三、微幅扰动波与明槽流态的物理意义    | 232 |
| 四、临界水深及其计算           | 233 |
| 五、临界底坡               | 234 |
| 六、小结                 | 236 |
| 第四节 明槽恒定急变流          | 237 |
| 一、水跌                 | 237 |
| 二、水跃                 | 238 |
| 三、弯道水流               | 244 |
| 第五节 明槽恒定渐变流水面曲线的定性分析 | 247 |
| 一、棱柱形渠道水面曲线的定性分析     | 247 |
| 二、非棱柱形人工渠道水面曲线定性分析   | 254 |
| 第六节 明槽恒定渐变流水面曲线的计算   | 256 |
| 一、人工渠道水面曲线的计算        | 256 |
| 二、天然河流水面曲线计算         | 263 |
| 习 题                  | 265 |

## 第八章 孔口(管嘴)出流、堰顶溢流和闸孔出流

|        |     |
|--------|-----|
| 第一节 概述 | 270 |
| 一、孔口出流 | 270 |
| 二、管嘴出流 | 270 |
| 三、堰顶溢流 | 271 |
| 四、闸孔出流 | 271 |

|                |     |
|----------------|-----|
| 第二节 孔口出流       | 271 |
| 一、薄壁小孔口恒定出流    | 271 |
| 二、孔口非恒定出流      | 273 |
| 第三节 管嘴出流       | 274 |
| 一、圆柱形外管嘴恒定出流   | 274 |
| 二、圆柱形外管嘴的真空    | 275 |
| 三、其它形式管嘴       | 276 |
| 第四节 堰顶溢流       | 277 |
| 一、堰流的基本公式      | 277 |
| 二、矩形薄壁锐缘堰      | 278 |
| 三、三角形薄壁堰       | 279 |
| 四、实用堰溢流        | 280 |
| 五、宽顶堰溢流        | 288 |
| 六、侧堰溢流         | 295 |
| 第五节 闸孔出流       | 297 |
| 一、闸底坎为宽顶堰的闸孔出流 | 297 |
| 二、曲线形实用堰上的闸孔出流 | 303 |
| 三、闸孔流与堰流的转化    | 304 |
| 习 题            | 305 |

## 第九章 泄水建筑物下游的水流衔接与消能

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第一节 概述               | 309 |
| 一、泄水建筑物下游的水流特性       | 309 |
| 二、泄水建筑物下游水流衔接消能的主要方式 | 310 |
| 第二节 底流型衔接与消能         | 311 |
| 一、底流型水流衔接            | 311 |
| 二、消能池的水力计算           | 313 |
| 第三节 挑流型衔接与消能         | 319 |
| 一、挑流射程计算             | 320 |
| 二、冲刷坑的估算             | 322 |
| 三、挑流鼻坎的型式与尺寸         | 324 |
| 习 题                  | 326 |

## 第十章 有压管道和明槽非恒定流

|                  |     |
|------------------|-----|
| 第一节 一维非恒定流动的基本方程 | 328 |
| 一、连续性方程          | 328 |
| 二、运动方程           | 330 |
| 第二节 水击现象         | 331 |
| 一、水击特征和水击波速      | 331 |
| 二、水击波的传播过程       | 335 |
| 三、水击波的分类         | 338 |
| 第三节 水击基本方程       | 339 |

|                  |     |
|------------------|-----|
| 一、水击连续性方程        | 339 |
| 二、水击运动方程         | 340 |
| 第四节 水击简化方程的解析法   | 341 |
| 一、水击简化方程组的通解     | 341 |
| 二、水击的连锁方程        | 342 |
| 三、定解条件           | 344 |
| 四、求解水击压强的解析法     | 345 |
| 第五节 明槽非恒定流的特性    | 348 |
| 一、明槽非恒定流的特性      | 348 |
| 二、明槽非恒定流波动的分类    | 350 |
| 第六节 明槽非恒定渐变流基本方程 | 351 |
| 一、连续性方程          | 351 |
| 二、运动方程           | 352 |
| 三、明槽非恒定渐变流圣维南方程组 | 354 |
| 四、圣维南方程组解法综述     | 355 |
| 第七节 明槽非恒定流的直接差分法 | 356 |
| 一、显式差分格式         | 358 |
| 二、隐式差分格式         | 359 |
| 第八节 非恒定流的特征线法    | 361 |
| 一、特征线法的基本思想      | 361 |
| 二、水击基本方程组的特征线解法  | 362 |
| 三、圣维南方程组的特征线解法   | 367 |
| 第九节 明槽非恒定急变流基本方程 | 372 |
| 一、连续性方程及波流量      | 373 |
| 二、动量方程           | 373 |
| 三、断波波速           | 374 |
| 第十节 计算实例         | 376 |
| 一、管道非恒定流计算实例     | 376 |
| 二、明槽非恒定流计算实例     | 379 |
| 习 题              | 386 |

## 第十一章 渗 流

|              |     |
|--------------|-----|
| 第一节 渗流的基本概念  | 388 |
| 一、水在土壤中的状态   | 388 |
| 二、土的渗流特性     | 388 |
| 三、渗流模型       | 389 |
| 第二节 渗流的达西定律  | 391 |
| 一、达西试验和达西定律  | 391 |
| 二、达西定律的适用范围  | 392 |
| 三、渗透系数及其确定方法 | 393 |
| 第三节 渗流基本原理   | 393 |
| 一、渗流的连续性方程   | 394 |
| 二、渗流的运动方程    | 394 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 三、恒定渗流的流速势和拉普拉斯方程 | 395 |
| 四、初始条件和边界条件       | 398 |
| 五、渗流解法简述          | 399 |
| 第四节 一维恒定渐变渗流      | 400 |
| 一、一维恒定渐变渗流的一般公式   | 400 |
| 二、地下明槽渐变渗流        | 401 |
| 三、井及井群            | 405 |
| 第五节 均质土坝的渗流       | 410 |
| 一、上游段(AA'B'IC)的计算 | 411 |
| 二、下游段(CIE)的计算     | 411 |
| 三、浸润线             | 412 |
| 第六节 水工建筑物透水地基中的渗流 | 412 |
| 一、流网法             | 413 |
| 二、数解法             | 416 |
| 第七节 水电比拟法         | 420 |
| 一、水电比拟法的原理        | 420 |
| 二、水电比拟法的设备和试验方法   | 421 |
| 习 题               | 422 |

## 第十二章 紊动射流和紊动扩散

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 第一节 紊流的基本方程       | 426 |
| 一、雷诺时均运算法则        | 426 |
| 二、紊流的连续性方程        | 427 |
| 三、紊流的运动方程         | 427 |
| 第二节 平面紊动射流和圆形紊动射流 | 429 |
| 一、紊动射流的一般特性       | 430 |
| 二、平面紊动射流的积分解      | 433 |
| 三、圆形紊动射流的积分解      | 435 |
| 四、圆形射流的相似解        | 437 |
| 五、平面射流的相似解        | 441 |
| 第三节 圆形羽流和平面羽流     | 444 |
| 一、羽流的两个不变量        | 444 |
| 二、点源羽流和平面羽流的积分解   | 445 |
| 第四节 分子扩散与紊动扩散     | 451 |
| 一、分子扩散方程          | 452 |
| 二、分子扩散方程的若干解析解    | 453 |
| 三、随流扩散            | 460 |
| 四、紊动扩散            | 462 |
| 习 题               | 466 |
| 参考文献              | 468 |
| 附 录               | 469 |

# 第一章 导 论

## 第一节 水力学任务及发展概况

水力学是力学的一个重要分支,也是许多工程技术领域的技术基础学科。它研究液体(主要是水)处于平衡状态和流动状态时机械运动规律及其在工程技术领域中的应用。

水力学的基础理论由两部分组成。一是液体处于相对平衡状态时,各种作用于液体上的力之间关系的理论,称为水静力学;二是液体处于流动状态时,作用于液体上的力和流动之间关系的理论,称为水动力学。水力学的范畴是将液体流动作为宏观机械运动进行研究,而不是研究液体的微观分子运动。因而在水动力学部分将主要研究液体流动的质量守恒、动量守恒和能量守恒及转换等基本规律。液体处于流动状态时,其流动的形态及内部结构(称为流态)比较复杂,对能量转换、热量和异质的扩散输运起着重要作用,因而研究液体流动的流态也是水动力学的重要内容。

在水利、土木、建筑、给排水、环保、能源、交通、航运、机械、化工、采矿、冶金等工程技术领域的设计、施工、运营和管理诸方面都涉及到许多水力学问题。虽然不同的工程技术领域中的水力学问题,有其各自的特点,但可将其概括为有压管流、明槽水流、孔口管嘴出流、射流、闸孔出流、堰流、水流衔接和消能、渗流、水波和流动的传质传热等各类流动现象。应用水力学的基础理论分析这些流动现象的基本规律,给出其普遍适用的基本分析和计算方法,这就构成了水力学的应用部分,也可称为专门水力学部分。

同其他自然科学一样,水力学的发展,既依赖于生产实践和科学试验,又受到社会诸因素影响。我国在防止水患、兴修水利方面有着悠久的历史。相传 4000 多年前的禹治水,就表明我国古代进行过大规模的防洪工作。秦代在公元前 256 年至前 210 年间修建的都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程,都说明当时对明槽水流和堰流的认识已达到相当高的水平。陕西兴平出土的西汉时期的计时工具实物——铜壶滴漏,就是利用孔口出流让容器的水位发生变化来计算时间的。据《周礼·夏官》记载,早在周代已开始使用漏壶测定时间。北宋时期,在运河上修建的真州复闸,与 14 世纪末在荷兰出现的同类船闸相比约早 300 多年。明朝潘季驯提出的“筑堤束水、以水攻沙”的治河方针,在 400 年前的历史条件下,确实是十分杰出的。清朝雍正年间,何梦瑶在《算迪》一书中提出了流量为过水断面上平均流速乘以过水断面面积的计算方法。14 世纪以前,我国的科学技术在世界上是处于领先地位的。但是,近几百年来由于闭关锁国使我国的科学得不到应有的发展,水力学也始终处于概括的定性阶段而未能形成严密的科学理论。

有明确记载的最早的水力学原理是公元前 250 年左右由出生于叙拉古(今西西里)的阿基米德(Archimedes)提出的浮体定律,但以后直到 15 世纪文艺复兴时期,尚未能形成系统

的理论。16世纪以后,在城市建设、航海和机械工业发展需要的推动下,逐步形成近代的自然科学,水力学也随之得到发展。意大利的达·芬奇(Vinci, L. da)是文艺复兴时期出类拔萃的美术家、科学家兼工程师,他倡导用实验方法了解水流性态,并通过实验描绘和讨论了许多水力现象,如自由射流、旋涡形成,水跃和连续原理等等。帕斯卡(Pascal, B.)提出液体中压力传递的定理;托里拆利(Torricelli, E.)给出了孔口泄流的公式。

牛顿(Newton, I.)于1686年发表了他的名著《自然哲学的数学原理》对普通流体的粘性性状作了这样的描述:“由于流体各部分缺乏润滑而产生的阻力,在其他条件不变的情况下,正比于使该流体各部分相互分离的速度。”\* 用现代常用的表达方式即为粘性切应力与剪切应变变化率成正比。这就是牛顿提出的流体内摩擦定律。

18世纪~19世纪,水力学及古典流体力学(古典水动力学)得到了较大的发展,形成了两门独立的学科。古典流体力学的奠基人是瑞士数学家伯努利(Bernoulli, D.)和他的亲密朋友欧拉(Euler, L.)。1738年,伯努利提出了水动力学能量方程,欧拉于1755年建立了理想流体运动的微分方程,以后纳维(Navier, C. -L. -M. -H.)和斯托克斯(Stokes, G. G.)建立了粘性流体运动的微分方程。但是,由于理论的假设与实际不尽相符或求解上的数学困难,当时难以解决各种实际问题。为了适应工程技术迅速发展的需要,采用实验和观测手段,直接寻求水力参数间的定量关系的水力学得到蓬勃发展。这一时期在水力学上有卓越成就的多数是工程师。其中著名的法国工程师谢才(Chezy, A. de)于1769年总结出明槽均匀流公式,一直沿用至今。此外还有管流(即有压流)、堰流和孔流等许多经验公式和系数。但由于理论指导不足,其成果往往有局限性,难以解决复杂的问题。

19世纪末以来,现代工业突飞猛进,新技术不断涌现,生产实践要求理论与实际密切结合才能解决问题。雷诺(Reynolds, O.)对实际流体指出存在层流和紊流两种流态,并建立了紊流时均化的运动方程——雷诺方程。1904年普朗特(Prandtl, L.)创立的边界层理论,使流体力学进入了一个新的历史阶段。迅速发展的现代实验技术和建立在相似理论及量纲分析基础上的实验理论,大大提高了探索水流运动规律和对实验资料进行理论概括的水平。尤其是最近半个世纪以来,电子计算机的广泛应用使许多过去不能求解的问题通过数值计算得到解决。水力学的研究范围从一维流动为主扩展到二维、三维流动;从等密度流动扩展到变密度、变温度流动;从单相流动扩展到多相流动;从主要关心水量扩展到水量水质同等重要。目前,水力学在理论分析、实验研究和数值计算技术紧密结合的条件下,正展现出广阔的前景,分支学科不断涌现,除传统的水力学以外,又崛起一批新的学科分支,如计算水力学、环境水力学、随机水力学、多相流体力学和工业水力学等等。随着社会的发展和科学技术的进步,水力学学科的内容正在不断变化和充实。

新中国成立以来,随着工农业建设特别是水利水电事业的迅速发展,水力学的研究工作也取得了很大的进展,科研队伍不断扩大。20多年来在邓小平理论的指导下,我国水力学工作在实验技术、数值计算、基础研究等方面又取得了巨大成绩。完全可以相信在今后社会主义现代化建设事业中,通过水力学工作者的辛勤劳动,我国水力学学科必将有更大的发展。

\* 摘自伊萨克·牛顿(1686):《自然哲学的数学原理》,王克迪译,袁江洋校,武汉出版社,1992

## 第二节 流体的基本特征和连续介质假设

### 一、流体与固体

物质通常有三种存在状态：固体、液体和气体，后两种合称为流体。从宏观特征讲，流体和固体的主要区别在变形方面。固体能保持其固定的形状和体积。在外力作用下，固体会发生变形，但只要不超出弹性限度，在去掉外力后，固体可恢复原形。流体则不然。流体在静止状态下只能承受压力，一般不能承受拉力\*，同时也不能承受切力。在微小切力的作用下，会使原先处于静止的流体发生连续不断的变形，即流动，这种特性就是流体的易流动性。

液体和气体的主要区别在于压缩性（膨胀性）。液体的压缩性极小，所以能保持一定的体积，虽然其形状随容器而变，但可以有自由表面。气体有比固体和液体大得多的压缩性和膨胀性，可充满整个容器，没有一定的形状和体积，无自由表面。

这三种物质的存在状态有共同的属性，即都是由大量分子组成，分子不断地作随机热运动，分子与分子之间存在分子力的作用。但是，从定性的意义上说，这些属性在这三种物质状态有量上的差异。同样体积内的分子数目，气体少于液体，液体少于固体；同样分子距上的分子力，气体小于液体，液体小于固体。所以气体的分子运动有较大的自由程和随机性，液体则较小，而固体分子只能围绕自身位置作微小的振动。

### 二、连续介质假设

流体是由大量作随机运动的分子所组成。从微观角度看，流体物理量的分布在空间上和时间上都是不连续的。如果以流体分子为对象来研究流动，则问题的复杂性大为增加，任何一个物理参数都在急剧的变化中。然而，在我们所关心的流动中，且不说大气、海洋、大江大河的流动，就是在实验室的水槽或管路中的流动，其几何尺寸也是不算小的，与这种流动的尺寸相比，一个 $10^{-3}\text{cm}$ 的长度已是很小很小。以 $10^{-3}\text{cm}$ 为边长的小立方体的容积( $10^{-9}\text{cm}^3$ )在上述各种流动中已是小到可以忽略它的尺度，而看作为没有体积的一个点。如果不以分子作为流动的基本单元，而以一个体积( $\Delta V$ )小到与整个流动的尺度相比，即以宏观标准来衡量，这个 $\Delta V$ 体积是如此之小，相对于所关心的尺度来讲，它的几何尺寸已可忽略，这个流动的基本单元被称为流体质点（在必须考虑其内部的变形运动或旋转时，流体质点又被称为流体微团）。但从微观的尺度标准来衡量，即与分子相比，这个容积 $\Delta V$ 可以容纳足够多的分子数目。 $10^{-9}\text{cm}^3$ 体积的气体内，在标准状态（ $0^\circ\text{C}$ ， $1\text{atm}$ ）下，仍包含 $2.69 \times 10^{20}$ 个分子；如果是水，则容纳的分子数目还将更多。在 $10^{-6}$ 秒时间尺度中，在 $10^{-3}\text{cm}^3$ 体积内的气体分子互相碰撞的次数是 $10^{20}$ 次。对这样多的分子进行平均，完全可以取得有代

\* 实验证明：不存在任何空泡或杂质的“纯”水有很大的抗拉强度。然而，自然界大量存在的实际水体，因为含有空气核和固体微粒等异相物质，其抗拉强度很小，一般可忽略。但是在研究空化问题，高速水流和多相流动等特殊问题时要考虑水的抗拉强度。

表性的物理量的平均值了。换句话说, 如果所研究问题的空间尺度远大于流体分子的平均自由程, 时间尺度远大于分子碰撞的时间尺度, 就可以把流体看作一种连续介质。

在连续介质概念的基础上, 流体的密度  $\rho$  就定义为

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

式中  $\Delta m$  是体积为  $\Delta V$  中的流体质量。

由于水力学是研究整个流体的宏观机械运动, 引入连续介质假设后, 可认为流体质点充满整个流动的空间, 没有空隙, 其物理量都是连续分布的。以密度  $\rho$  为例, 可写为

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (1-2-2)$$

即密度  $\rho$  是空间点  $(x, y, z)$  和时间  $t$  的连续可微函数。其他的宏观物理量也可作类似的分析和表述。将流体视为由流体质点组成的连续介质, 可以充分利用连续函数的分析方法。长期的大量的科学实验和工程实际应用证明, 应用连续介质假设建立的水力学基本理论和方法是符合客观液体运动实际的。

### 第三节 流体的主要物理性质及作用于流体的力

#### 一、惯性、质量和密度

惯性就是物体所具有的反抗改变原有运动状况的物理性质。当不受外力或所受外力的合力为零时, 惯性表现为物体保持原来运动状态不变, 即保持静止或匀速直线运动。在相同外力作用下, 惯性表现为不同物体的运动状况有不同的改变, 惯性较大的物体, 运动状况较难改变。惯性的量度是质量。当物体受施力物体的作用力而改变运动状况时, 此物体反抗改变原有运动状况而作用于施力物体的反作用力称为惯性力。若受力物体的质量为  $m$ , 加速度为  $a$ , 则惯性力  $F$  的数值为

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

负号表示惯性力的方向与受力物体的加速度方向相反。

流体单位体积内所具有的质量称为密度  $\rho$ 。对于均质液体设其体积为  $V$ , 质量为  $m$ , 则

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-3-2)$$

对于非均质流体, 可按公式(1-2-1)计算流体质点的密度。国际单位制 (SI) 中, 密度的单位是  $\text{kg/m}^3$ , 质量用  $\text{kg}$ , 长度用  $\text{m}$ , 时间用  $\text{s}$ 。力的单位是  $\text{N}$  (牛顿),  $\text{N}$  是导出单位, 在  $1\text{N}$  力的作用下, 质量为  $1\text{kg}$  的物体, 得到的加速度为  $1\text{m/s}^2$ , 即  $1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ 。

工程界以往惯用工程单位制, 如力的单位是公斤力 ( $\text{kgf}$ )。常用物理量的两种单位制的换算数值, 列于书末的附录, 供参考。

液体的密度随压强和温度而变化, 但这种变化一般极微小, 故液体的密度可视为常数。

例如水的密度, 实用上就以在一个大气压强下, 温度为 4℃ 时的最大密度值作为计算值, 其数值为 1000 kg/m<sup>3</sup>。其他物体的密度与 4℃ 下水的密度之比称为比重, 又叫相对密度。不同温度下水的密度值见表 1-3-1。

表 1-3-1 不同水温下水的物理性质

| 水温<br>$T$<br>℃ | 密度<br>$\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 重度<br>$\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 粘度<br>$\mu$<br>(10 <sup>-3</sup> Pa·s) | 运动粘度<br>$\nu$<br>(10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s) | 体积模量<br>$K$<br>(10 <sup>9</sup> Pa) | 表面张力系数<br>$\sigma$<br>(N/m) |
|----------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| 0              | 999.9                                | 9.805                                  | 1.781                                  | 1.785                                                 | 2.02                                | 0.075 6                     |
| 5              | 1 000.0                              | 9.807                                  | 1.518                                  | 1.519                                                 | 2.06                                | 0.074 9                     |
| 10             | 999.7                                | 9.804                                  | 1.307                                  | 1.306                                                 | 2.10                                | 0.074 2                     |
| 15             | 999.1                                | 9.798                                  | 1.139                                  | 1.139                                                 | 2.15                                | 0.073 5                     |
| 20             | 998.2                                | 9.789                                  | 1.002                                  | 1.003                                                 | 2.18                                | 0.072 8                     |
| 25             | 997.0                                | 9.777                                  | 0.890                                  | 0.893                                                 | 2.22                                | 0.072 0                     |
| 30             | 995.7                                | 9.764                                  | 0.798                                  | 0.800                                                 | 2.25                                | 0.071 2                     |
| 40             | 992.2                                | 9.730                                  | 0.653                                  | 0.658                                                 | 2.28                                | 0.069 6                     |
| 50             | 988.0                                | 9.689                                  | 0.547                                  | 0.553                                                 | 2.29                                | 0.067 9                     |
| 60             | 983.2                                | 9.642                                  | 0.466                                  | 0.474                                                 | 2.28                                | 0.066 2                     |
| 70             | 977.8                                | 9.589                                  | 0.404                                  | 0.413                                                 | 2.25                                | 0.064 4                     |
| 80             | 971.8                                | 9.530                                  | 0.354                                  | 0.364                                                 | 2.20                                | 0.062 6                     |
| 90             | 965.3                                | 9.466                                  | 0.315                                  | 0.326                                                 | 2.14                                | 0.060 8                     |
| 100            | 958.4                                | 9.399                                  | 0.282                                  | 0.294                                                 | 2.07                                | 0.058 9                     |

## 二、流体的重量和重度

地球上的物体, 不论是运动着的还是静止的, 都要受到地心引力的作用, 这个引力就是重力, 用重量  $G$  表示。设物体的质量为  $m$ , 重力加速度为  $g$ , 则重量为

$$G = mg \quad (1-3-3)$$

采用国际单位制, 重量的单位是 N。重力加速度  $g$  的数值大小与地球的纬度有关, 一般可看作常数, 本书采用 9.8 m/s<sup>2</sup>。

流体单位体积内所具有的重量称为重度, 或称容重、重率, 以  $\gamma$  表示。即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-3-4)$$

重度的单位是 N/m<sup>3</sup>, 重度与密度有如下关系

$$\gamma = \rho g \quad \text{或} \quad \rho = \gamma/g \quad (1-3-5)$$