

水力学

(I)

[日]椿 東一郎 著 杨景芳 译

612

高等教育出版社

水 力 学

(I)

[日] 椿 東一郎 著

杨景芳 译

高等教育出版社

本书系根据日本森北出版株式会社出版的椿东一郎著《水理学》1973年第一版译出。

作者撰写本书的意图是鉴于水力学教科书和水力学专门著作之间有较大差异,为学习过一般水力学的人阅读专门著作搭个桥梁,起过渡作用。

本书分两册出版。在第I册里讲述了流体的基本性质,理想流体力学,粘性和紊动作用,一元渐变流的基本方程,管路与明渠的恒定流以及堰、溢流坝顶和水闸水力学。在第II册里讲述了管路和明渠的非恒定流,绕流阻力及边界层,波浪,以及紊流与风浪的统计性质、紊流扩散与对流分散、异重流、泥沙运动及河床演变等新发展起来的领域的基本概要,地下水及渗流等。

本书可作为高等院校水利、土木类专业高年级学生、研究生及有关工程技术人员和教师的参考书。

本书第I册由大连工学院杨景芳翻译,第II册由武汉水利电力学院徐正凡主译。译稿由西安交通大学江宏俊校订。

ZW57/3018

水 力 学

(I)

〔日〕椿 东一郎 著

杨景芳 译

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

青浦任屯印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张8.25 字数197,000

1982年8月第1版 1983年12月第1次印刷

印数 00,001—5,300

书号 15010-0424 定价 1.25 元

译者前言

本书作者日本九州大学椿東一郎教授，是专门研究应用水力学和河流海洋工程学的。他在序言中谈到，编写本书的目的是尝试在一般水力学教科书和水力学专门著作之间搭个桥梁，以减少学过一般水力学的人在阅读水力学专门著作时的困难。我们认为本书体现了作者这一意图，故将本书译出介绍给国内读者。

本书内容全面，讲述系统，推理严谨而简练。在内容的深广度上均超出了一般水力学教科书，为阅读有关专著提供了理论基础。本书第Ⅰ册讲述水力学的基本原理及一般水力学问题，第Ⅱ册介绍管路、河流、海洋及地下渗流等方面的专门水力学问题，涉及紊流与风浪的统计性质、紊流扩散与对流分散以及异重流等内容。书中还反映了一些新近的研究成果。为了培养读者思考能力和加深对学科内容的理解，书中有相当数量的例题和习题，对较难的习题还给出解题顺序或提示，所有习题均附有答案。

本书可作为水利、土木类高年级学生、研究生、水利土木工程技术人员及教师的参考书。

本书第Ⅰ册由大连工学院杨景芳翻译。本书第Ⅱ册由武汉水利电力学院徐正凡翻译第七、八、九及第十二章，由大连工学院钟炳盛翻译第十、十一及第十三章，由武汉水利电力学院胡诚义翻译第十四章及第十五章。

本书第Ⅰ册译稿承大连工学院董毓新同志审阅，第Ⅱ册部分译稿承武汉水利电力学院李鸿恩同志审阅，译者对审阅者及对本书翻译工作中给予指导和支持的同志表示感谢。

由于译者水平所限，译本中疏漏错误之处在所难免，希读者给以批评指正。

译 者

1982年8月

序

在土木工程学的领域中，水力学对于河流工程学、海岸工程学、卫生工程学、水质污染、水力发电工程学、水利资源学和灌溉工程学等水利工程学的各个门类，是构成其数理基础的一门学科，它以水流的运动作为研究对象。同样，在研究流体运动的学科方面还有所谓流体动力学(hydrodynamics)这一分科。迄今为止，流体动力学着重于纯理论方面的研究，而水力学(hydraulics)则大多取用经验数据而偏重于实用上的解法，所以两者有所区别。但是，水力学常采用流体动力学的成果，尤其是有关粘性和紊动方面的知识，这些知识促进了水力学这门学科急剧地向前发展。其后，两者在方法论上的区别也几乎消失。这就是为什么水力学常被称为应用流体力学的一个分科，或者就被称为流体力学(fluid mechanics)的原因。

水力学从水工建筑物的水流运动开始，直到自然现象中广泛存在的水流运动，作为研究对象，近来，还以水中掺气，不同密度的其它流体或者混杂固体颗粒时的水流运动作为研究对象。至于研究方法，由于水具有粘性、压缩性、紊动等复杂特性，为了得到理论解而作适当的近似和模型化是必要的。对于那些理论上还不能解的问题，为达到实用上的目的，则必须用实验的方法弄清其现象并加以定量化。所以在水力学的有关书籍中，对各种问题的处理，方法不尽相同，有些是理论的，有些是半理论的，有些则是实验性的，这些方法相当复杂地混在一起。

象这样复杂的研究对象和有多种多样的逼近方法，常在青年学生和技术人员中造成紊乱，因而产生水力学难以着手这一不太恰当的印象。然而相反，正是因为水力学具有多样性这一本质，所以水力学才成为人们真正感兴趣的研究流体运动的一门学科。

为此，本书分为I、II两册，在第I册里，讲述流体的基本性质，理想流体力学，粘性和紊动作用，并推导出一元渐变流的基本方程式。接着讲述恒定管流、明渠流的力学及堰、溢流坝顶等急变流的水力原理。虽然这些从来都是水力学的主要问题，但在书中都尽量归纳了它们的特性，并力求以简明的形式阐述它们的物理意义。在第II册中首先讲述了一元渐变非恒定流，接着就波浪，紊动的内部机构和紊流扩散，混相流，异重流及泥沙水力学等近来正在迅速发展的领域，则只讲述了它们的基本概要。鉴于水力学教科书和专门著作之间有相当大的差异，所以本书试图起到向专门著作过渡的作用。

为了理解水力学并能适应其进一步发展，以什么样的思想方法来掌握各式各样的水流运动现象，怎样使之成为数理公式，以及明确这些现象所具有的物理意义是特别重要的。本书在这些地方都给以足够的注意，为了不至于因数学方法上的深奥难懂而妨碍物理意义上的理解，本书尽可能简明易懂地论述问题。进而列举了许多例题以求对这些问题能透彻理解，通过各节末尾的习题和在各章末附有较详细提示的习题，力图借以培养实际工作的能力，并对现职的工程技术人员也有所裨益。

本书是否已达到上述要求，心中尚无把握，但正如以上所述，既然水力学的特征在于其多样性，所以按理应该是具有一定程度的经验(熟练)并作出努力是必要的。读者如果在学习中遇到不懂的地方，不要裹足不前，无论如何，希望通读下去。

在撰写本书过程中，参考了许多有关著作和论文，这些著作名

称列于书后,论文名称记于脚注。

最后,由于作者对问题的理解不足,在阐述时表达方面恐有不够充分和错误之处。希能得到读者指正。

著 者

1973年1月

第 II 册 目 录

- 第 七 章 管路非恒定流——压力波动和水击作用
- 第 八 章 明渠非恒定流
- 第 九 章 绕流中物体上的流体作用力和边界层
- 第 十 章 波浪
- 第十一章 水力学中的不规则现象——紊流与风浪的统计性质
- 第十二章 紊流扩散与对流分散
- 第十三章 异重流
- 第十四章 泥沙运动及河床演变
- 第十五章 地下水和渗流

目 录

第一章 流体的基本性质和因次分析

1.1 流体的物理性质	1
(1) 密度·容重	1
(2) 粘性和紊动	3
(3) 压缩性	6
(4) 表面张力	7
1.2 静水压力	8
(1) 静水压力分布	8
(2) 作用在平面上的静水总压力	12
(3) 作用在曲面上的静水总压力	16
1.3 因次分析	20
(1) 因次和单位变换	20
(2) 因次分析	23
1.4 向量和向量分析	27
(1) 向量	27
(2) 向量算子, 梯度, 散度和旋度	30
(3) 格林-高斯定理	31

第二章 流动的代表和理想流体力学

2.1 流动的代表	35
(1) 流动的种类	35
(2) 研究流体运动的方法	38
(3) 流线和迹线	39
2.2 流体运动的连续方程式	41
(1) 流量	41
(2) 连续方程式	42

2.3 理想流体的运动方程式	44
(1) 欧拉运动方程式	44
(2) 边界条件	48
(3) 流体静力学	50
2.4 运动方程式的积分和伯诺里定理	53
(1) 运动方程式的变形	53
(2) 理想流体恒定流的伯诺里定理	54
(3) 无旋运动的能量方程	55
(4) 伯诺里定理的应用例题	57
(5) 二元无旋运动的简单例题	64
2.5 动量定理	68

第三章 粘性和紊动作用

3.1 粘性流体的纳维埃-斯托克斯方程式	76
(1) 粘性的作用	76
(2) 粘性流体中应力的表示	78
(3) 纳维埃-斯托克斯运动方程式	83
(4) 管路和明渠中的均匀层流	88
(5) 层流向紊流的过渡	91
3.2 紊动作用	93
(1) 紊动和雷诺应力	93
(2) 紊动的传递理论	96
3.3 紊流的流速分布和摩擦损失系数	100
(1) 摩擦损失系数	100
(2) 圆管内紊流的流速分布	102
(3) 光滑圆管内的水流	103
(4) 粗糙圆管内的水流	105
(5) 当量粗糙度 k_s 和光滑到粗糙的过渡区	108
(6) 宽矩形断面明渠的均匀流	113
3.4 一元渐变流的基本方程式	113
(1) 一元渐变流的连续方程式	115
(2) 一元渐变流的运动方程式	117
(3) 一元渐变流的动量方程式	119

(4) 一元渐变流的能量方程式.....	122
(5) 对能量方程和动量方程的补充说明.....	125

第四章 管路恒定流

4.1 管路恒定流的基本关系.....	130
(1) 管路恒定流的基本公式.....	130
(2) 摩擦损失系数 f 的实用公式.....	131
(3) 局部损失.....	136
4.2 简单管路的计算.....	140
(1) 流量、能线的计算.....	140
(2) 虹吸管.....	145
(3) 空泡现象.....	146
(4) 包括水轮机和水泵的管路计算.....	147
4.3 复杂管路的计算.....	151
(1) 合流管和分流管的计算.....	151
(2) 并联管的计算.....	154
(3) 管网的计算.....	154

第五章 明渠恒定流

5.1 明渠水流的基本关系.....	160
(1) 明渠恒定流的基本公式.....	160
(2) 缓流和急流, 临界水深.....	162
(3) 流态的过渡.....	167
(4) 明渠均匀流.....	173
(5) 均匀流的计算.....	175
(6) 临界坡度.....	180
5.2 棱柱形渠道的非均匀流.....	181
(1) 水面曲线的分类.....	183
(2) 棱柱形渠道的非均匀流计算.....	185
5.3 非棱柱形渠道中的非均匀流.....	193
(1) 数值计算法.....	195
(2) 控制断面的水力原理.....	195
(3) 复式断面渠道、河道的非均匀流计算.....	199

5.4 恒定变量流	204
5.5 明渠中的局部水流	208
(1) 渠道突变处的水流	208
(2) 弯道水流	213
(3) 明渠急流中的冲击波和交叉波	217

第六章 堰、溢流坝顶和水闸的水力学

6.1 薄壁堰	223
(1) 无侧收缩矩形堰的水舌形状和流量系数	223
(2) 有侧收缩矩形堰和三角堰	227
6.2 溢流坝顶和宽顶堰	230
(1) 溢流坝顶上的水流	231
(2) 标准堰顶的设计和流量系数	233
(3) 宽顶堰	235
(4) 淹没堰	237
6.3 水闸	239
习题的解答及提示	243
参考书	248

第一章 流体的基本性质和因次分析

1.1 流体的物理性质

物质一般分为固体、液体和气体三种。固体不容易改变形状和体积,相对于固体而言,各种液体是容易改变形状而难于改变体积的物质,气体是既容易改变形状也容易改变体积的物质。但是,液体和气体具有的共同性质是容易改变形状,两者统称为**流体**(fluid)。

在物理学的处理中,不只限于流体,所有的物质都是分子和原子的集合体,而在流体力学和水力学里,都将流体看作为连续体来研究它的运动。在本书中多次使用所谓流体质点或流体微团来描述问题,而在质点的微小体积中包含着大量的分子,这个就是连续体内点的意义。

(1) 密度·容重

某物质单位体积内的质量称为**密度**(density),单位体积内的重量称为**容重**(unit weight)或称为**重度**(specific weight)。在水力学中,前者习惯用 ρ 表示,后者用 w 表示。假设重力加速度为 g ,这就存在如下关系

$$w = \rho g \quad (1.1)$$

在物理学里学习一般力学时,把长度 $[L]$,质量 $[M]$,时间 $[T]$ 作为基本量,用单位为 cm 、 $\text{g}_0^{1)}$ 、 s 的CGS单位制。但是,在工程问题里,因为推求力 F 最重要,所以用力 $[F]$ 来代替质量 $[M]$,主要

1) 为了与工程单位制中的力 g 相区别,质量克用 g_0 表示。

采用长度 $[L]$ 、力 $[F]$ 、时间 $[T]$ 作为基本量的 $L-F-T$ 系统,作为单位,主要用工程单位 m, kg, s 。工程单位制中的 $1kg$ 是质量 $1000g_0$ 的重量,所以

$$\begin{aligned} 1kg &= 1000g_0 \times 980cm/s^2 \\ &= 0.98 \times 10^6 g_0 cm/s^2 \quad (1dyn = 1g_0 \cdot cm \cdot s^{-2}) \\ &= 0.98 \times 10^6 dyn \end{aligned} \quad (1.2)$$

根据这个关系,就能知道 CGS 单位制和工程单位制之间的关系。

例如,在 CGS 单位制中,摄氏 4 度水的密度为 $1g_0/cm^3$, 容重为

$$w = \rho g = 1g_0/cm^3 \cdot 980cm/s^2 = 980g_0 \cdot cm^{-2} \cdot s^{-2}$$

而在工程单位制中,变成如下关系

$$\left. \begin{aligned} \rho &= 1 \frac{g_0}{cm^3} = 1 \frac{g_0 cm}{s^2} \cdot \frac{s^2}{cm^4} = 1 dyn \cdot \frac{s^2}{cm^4} \\ &= 1 \frac{kg}{0.98 \times 10^6} \cdot \frac{s^2}{\left(\frac{1}{10^2}m\right)^4} = 102 \frac{kg \cdot s^2}{m^4} \\ w &= \rho g = 102 \frac{kg \cdot s^2}{m^4} \times 9.8 \frac{m}{s^2} \\ &= 1000 \frac{kg}{m^3} = 1 \frac{t}{m^3} = 1 \frac{g}{cm^3} \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

液体的密度一般是随温度和压力而变化的。水的密度在普通 1 个气压下,温度 $4^\circ C$ 时为最大,在 CGS 单位制中,密度随温度变化如下表所示。

表 1.1 水温与密度的关系 (1 个气压, CGS 单位制)

温度($^\circ C$)	0 冰	0 水	4	10	15	20	30	40	50
密度(g_0/cm^3)	0.9167	0.9997	1.0000	0.9997	0.9991	0.9982	0.9957	0.9922	0.9881

从上表可明显地看出, 水的密度和容重随温度的变化是非常

小的。在实际计算中,都可认为它们是常数¹⁾。这一数值由上面的式(1.3)求出。又因为海水含有盐分,所以容重 $w = (1020 \sim 1030) \text{ kg/m}^3$ 。

由于气体的密度随压力、温度变化大,就空气而言,相对于理想气体,下面的式子可较好地近似成立

$$p = \rho RT \quad (1.4)$$

式中 p ——压力(对于气体为绝对压力);

T ——绝对温度;

R ——气体常数,干燥空气的 $R = 287.0 \text{ m}^2/\text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

气体在进行等温变化时, $T = \text{const}$,所以上式变成

$$\frac{p}{\rho} = \text{const} \quad (1.5)$$

实际上,往往不允许与外部交换热量,这样的变化称为绝热变化(adiabatic change),其变化过程按如下的绝热法则

$$\frac{p}{\rho^n} = \text{const} \quad (1.6)$$

式中 n ——定压比热与定容比热之比,对于干燥空气 $n = 1.40$ 。

标准状态(1个气压, 15°C)下,空气的密度和容重为

$$\rho = 0.125 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4, \quad w = 12.5 \text{ N/m}^3 \quad (1.7)$$

对空气那样的气体, ρ 与压力 p 之间的关系可由式(1.6)求出,对于水则 $\rho = \text{const}$ 。在流体力学里,这些关系往往概括为下面形式

$$\rho = f(p) \quad (1.8)$$

这个关系称为流体的状态方程式(characteristic equation)。

(2) 粘性和紊动

1) 高温的水流向冷水水域时,由于微小的密度差可能引起特殊的流动。在这样的温度密度流问题中,当然 w 不是常数。关于这些内容在本书第二册第十三章讲述。

在如图 1.1 所示的流体中,假想一个面,分析通过这个面两侧的流体作用在单位面积上的力,这个力称为**应力**(stress)。流体处于静止状态时的应力只是作用于垂直该面的**压力**(pressure),而流体在运动的时候,除了垂直于面的压力之外,还有沿着接触面方

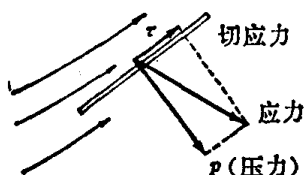


图 1.1 作用在面上的应力

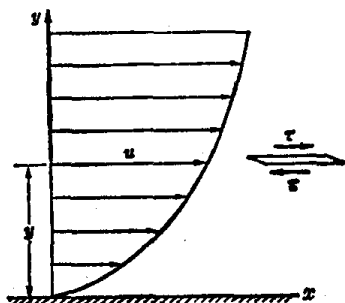


图 1.2 切应力

向的**切应力**(shear stress)作用。即,在象图 1.2 那样的速度梯度的流动中,由于有减小流体的速度差进而使流动均匀化的倾向,因此出现切应力。又如假设在流体中有一物体,接触物体边界的流体质点具有附着于壁面的性质。这些性质称为流体的**粘性**(viscosity)。关于粘性在第三章详细讲述,而根据牛顿(Newton)实验可知,作用于垂直 y 轴单位面积上的切应力 τ 与速度梯度 du/dy 成正比,所以

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.9)$$

这称为**牛顿的粘性法则**¹⁾。又式(1.9)中的比例系数 μ 称为**粘性系数**(coefficient of viscosity),是根据流体的性质决定的物质常数。在水力学和流体力学中,用 ρ 去除 μ 得

$$\frac{\mu}{\rho} = \nu \quad (1.10)$$

1) 如水和空气,服从式(1.9)的流体称为**牛顿流体**。如高粘度的流体及血浆等, τ 与 du/dy 的关系不是线性关系的流体也是很多的,这些称为**非牛顿流体**。非牛顿流体虽然是新的研究领域,但在本书中不做介绍。