

面向21世纪给水排水工程专业系列教材

# 水力学

金建华 王 烽 主编

湖南大学出版社

面向 21 世纪给水排水工程专业系列教材

# 水 力 学

金建华 王 烽 主编

湖南大学出版社

2004 年·长沙

## 内 容 简 介

本书内容包括绪论、水静力学、水动力学基础、水溶阻力与水头损失、孔口、管嘴出流和有压管路、明渠流动、堰流、渗流、相似原理与量纲分析等。各章附有思考题和习题,并附有习题参考答案。

本书为给水排水工程专业教学用书,也可供建筑工程、交通土建工程、岩土工程、环境工程、水利水电工程等专业师生及工程施工、设计、管理人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水力学/金建华,王烽主编.长沙:湖南大学出版社,2004.1

(面向 21 世纪给水排水工程专业系列教材)

ISBN 7-81053-710-5

I. 水... II. ①金... ②王... III. 水力学—高等学校—教材 IV. TV.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 120993 号

## 水 力 学

Shuili Xue

金建华 王烽 主编

- 
- |                          |      |                 |              |  |
|--------------------------|------|-----------------|--------------|--|
| <input type="checkbox"/> | 责任编辑 | 卢 宇             |              |  |
| <input type="checkbox"/> | 封面设计 | 张 毅 易 健         |              |  |
| <input type="checkbox"/> | 出版发行 | 湖南大学出版社         |              |  |
|                          |      | 社址 长沙市岳麓山       | 邮码 410082    |  |
|                          |      | 电话 0731-8821691 | 0731-8821315 |  |
| <input type="checkbox"/> | 经 销  | 湖南省新华书店         |              |  |
| <input type="checkbox"/> | 印 装  | 湖南省地质测绘印刷厂      |              |  |
- 

- |                          |    |                         |                          |    |                   |                          |    |       |
|--------------------------|----|-------------------------|--------------------------|----|-------------------|--------------------------|----|-------|
| <input type="checkbox"/> | 开本 | 787×1092 16 开           | <input type="checkbox"/> | 印张 | 17                | <input type="checkbox"/> | 字数 | 435 千 |
| <input type="checkbox"/> | 版次 | 2004 年 1 月第 1 版         | <input type="checkbox"/> |    | 2004 年 1 月第 1 次印刷 |                          |    |       |
| <input type="checkbox"/> | 印数 | 1-4 000 册               |                          |    |                   |                          |    |       |
| <input type="checkbox"/> | 书号 | ISBN 7-81053-710-5/TV·2 |                          |    |                   |                          |    |       |
| <input type="checkbox"/> | 定价 | 27.00 元                 |                          |    |                   |                          |    |       |
- 

(湖南大学版图书凡有印装差错,请向承印厂调换)

主任委员 施 周

副主任委员(以姓氏笔画为序)

邓德全 刘康怀 杨 开 张朝升

姜应和 俞 涛

委 员(以姓氏笔画为序)

卢 宇 许仕荣 任伯帜 刘晏平

何少华 余 健 吴学伟 陈治安

张克峰 金建华 柯水洲 袁玉梅

曹国凭 谢水波

## 前 言

本书是根据全国高等学校给水排水工程学科专业指导委员会关于教材编写的要求,以给水排水工程专业为主要对象而编写的水力学教材。其他专业,如土木工程专业和环境工程专业,可以根据教学需要对内容进行一定的取舍后使用。

本书编写的原则是:注意加强基础理论,适当反映学科的新发展,力求理论联系实际,培养学生分析问题和解决问题的能力,为培养 21 世纪宽基础、高素质的专业人才服务。

为适应高等教育改革的需要,各门课程教学时数大大减少,专业基础课和专业课的教学内容进行了重新整合。有些原属于水力学的內容,如管网水力计算基础,本教材不再纳入范围,留到给水管网中讲授。离心泵部分,只讲授基本概念和简单计算。明渠均匀流和明渠非均匀流两部分內容则合为一章,使全书结构更紧凑,表述更流畅。

考虑到电子计算机在工程实际中的应用越来越普及,本书在明渠水面曲线计算一节中介绍了应用电子计算机计算的方法和实例,并给出了相应的 BASIC 语言程序。各章按照教学需要,选编了一定数量的例题和思考题、习题,书末附有习题参考答案和参考文献。

本书编写工作采用由主编提出编写大纲,分工执笔,主编审定的方式。全书由金建华、王烽主编。第 1 章由张翔凌编写;第 2 章由王烽;彭文波编写;第 3 章、第 4 章由王烽编写;第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章由金建华编写;第 9 章由吴弼编写。

本书的编写工作,得到了湖南大学出版社的关心和支持,兄弟院校的同行也提出了许多宝贵意见,另外书面引用了许多作者的成果,在此一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点或错误,恳请读者批评指正。

编著者

2004 年 1 月

# 目 次

## 第 1 章 绪论

- 1.1 概述 ..... (1)
- 1.2 液体的主要物理性质 ..... (6)
- 1.3 作用在液体上的力 ..... (12)
- 思考题 ..... (13)
- 习 题 ..... (14)

## 第 2 章 水静力学

- 2.1 静水压强及其特性 ..... (15)
- 2.2 重力作用下静水压强的分布规律 ..... (17)
- 2.3 压强的计算基准和量度单位 ..... (21)
- 2.4 测量压强的仪器 ..... (23)
- 2.5 静水压强分布图 ..... (25)
- 2.6 作用在平面壁上的静水总压力 ..... (25)
- 2.7 作用在曲面壁上的静水总压力 ..... (29)
- 2.8 液体平衡微分方程 ..... (33)
- 2.9 重力和惯性力同时作用下的液体的相对平衡 ..... (35)
- 思考题 ..... (38)
- 习 题 ..... (39)

## 第 3 章 水动力学基础

- 3.1 描述液体运动的两种方法 ..... (43)
- 3.2 欧拉法的基本概念 ..... (45)
- 3.3 恒定总流连续性方程 ..... (49)
- 3.4 恒定元流能量方程(元流伯诺里方程) ..... (51)
- 3.5 恒定总流能量方程(伯诺里方程) ..... (54)
- 3.6 总水头线与测压管水头线 ..... (59)
- 3.7 恒定气流的能量方程 ..... (61)
- 3.8 恒定总流动量方程 ..... (63)
- 3.9 恒定总流动量矩方程 ..... (69)
- 3.10 连续性微分方程 ..... (71)
- 3.11 液体微团运动的分析 ..... (74)
- 3.12 有旋运动与无旋运动 ..... (76)
- 3.13 势流叠加原理 ..... (84)
- 3.14 理想液体运动微分方程 ..... (86)
- 思考题 ..... (89)
- 习 题 ..... (90)

<b>第 4 章 水流阻力与水头损失</b>	
4.1 沿程水头损失和局部水头损失	(97)
4.2 实际液体运动的两种形态	(98)
4.3 均匀流基本方程	(103)
4.4 圆管层流的沿程阻力系数	(104)
4.5 圆管紊流的沿程阻力系数	(106)
4.6 局部水头损失	(121)
4.7 边界层理论简介	(127)
4.8 绕流阻力	(130)
思考题	(131)
习 题	(132)
<b>第 5 章 孔口、管嘴出流和有压管路</b>	
5.1 孔口出流	(135)
5.2 管嘴出流	(138)
5.3 短管的水力计算	(140)
5.4 长管的水力计算	(147)
5.5 有压管路中的水击	(153)
思考题	(158)
习 题	(159)
<b>第 6 章 明渠流动</b>	
6.1 概述	(162)
6.2 明渠均匀流	(164)
6.3 无压圆管均匀流	(173)
6.4 明渠流动状态	(176)
6.5 跌水与水跃	(182)
6.6 棱柱形渠道中渐变流水面曲线分析	(188)
6.7 棱柱形渠道中渐变流水面曲线的计算	(196)
思考题	(209)
习 题	(210)
<b>第 7 章 堰流</b>	
7.1 概述	(213)
7.2 薄壁堰	(215)
7.3 实用堰	(218)
7.4 宽顶堰	(219)
思考题	(222)
习 题	(223)
<b>第 8 章 渗流</b>	
8.1 概述	(224)
8.2 渗流基本定律	(225)
8.3 井和集水廊道	(228)

思考题.....	(235)
习    题.....	(236)
<b>第 9 章 相似原理与量纲分析</b>	
9.1 相似理论基础 .....	(237)
9.2 相似准则 .....	(238)
9.3 模型实验 .....	(241)
9.4 量纲分析法 .....	(243)
思考题.....	(247)
习    题.....	(248)
<b>附 录 国际单位与工程单位换算表.....</b>	<b>(250)</b>
<b>习题参考答案.....</b>	<b>(251)</b>



# 第 1 章 绪论

## 1.1 概述

### 1.1.1 水力学的任务

水力学是研究以水为代表的液体的平衡和机械运动规律及其实际应用的一门科学。从学科的角度来看,水力学是介于基础科学和工程技术之间的一门学科。它一方面根据基础科学中的普遍规律,结合水流特点,建立理论基础,同时又紧密联系工程实践发展学科内容。

水力学在水利建设中应用比较广泛。人们经常通过修建水工建筑物及整治河道等措施来控制水流的边界条件,调整和改变原有水流的状态,以适应人们的需要;同时水流也力图反抗边界的约束,两者相互作用形成新的水流状态。水力学在水利建设中的主要任务是研究水流与边界(如水工建筑物及河床等)的相互作用,分析在各种相互作用条件下所形成的各种水流现象和边界上的各种力的作用;为水利工程的勘测、规划、设计、施工和运转管理等方面提供合理的水力学依据。例如,为了满足防洪、灌溉和发电等方面的需要,往往要在河道上筑坝,拦蓄河水,形成水库;同时要设置泄洪、输水等建筑物,从而改变了原有的水流状态。在水库蓄水之后,坝体要承受巨大的水压力;有很小一部分水在水压力的作用下经坝基和两岸向下游渗透;如果用坝顶溢流,则溢流水股对坝体也有作用力;经泄水建筑物下泄的高速水流对下游河床常造成冲刷。因此,要正确地进行坝的设计,必须对有关的水力学问题,如确定水库水位及下泄流量,坝体所受的水压力及下泄水流对坝体和下游河床的冲刷作用力,渗流的运动状态及其对建筑物的作用等,进行全面的分析。

水力学也广泛运用于土木工程各个领域,例如在建筑和交通土建工程中,基坑排水、地基抗渗稳定处理、围堰修建、桥渡设计等等都有赖于水力计算方能确定;在给水排水工程中,无论取水、水处理、输配水都是在水流动过程中实现的。在建筑环境与设备工程中,供热、通风与空调设计,以及设备的选用,都离不开水力学。

水力学不仅用于解决某些土木工程中的水和气的问题,更能帮助工程技术人员进一步认识土木工程与大气和水环境的关系。大气和水环境对建筑物和构筑物的作用是长期的,多方面的。例如台风、洪水通过直接摧毁房屋、桥梁、隧道、堤坝造成巨大的自然灾害。另一方面,兴建大型厂矿、公路、铁路、桥梁、隧道、江海堤防、水坝等也会对大气和水环境造成不利影响,导致生态环境恶化,甚至加重灾害。只有处理好土木工程与大气和水环境的关系,做到减轻灾害,保护环境,才能实现国民经济的可持续发展。

在土木工程及水利工程中经常遇见的水力学问题,大致可分为下列四个方面:一是建筑物(及河渠)的过水能力;二是建筑物(及河渠)所受的水力荷载,如所承受的静水压力、动水总作用力等;三是水流的流动形态;四是水流的能量消耗。在这四个方面中,导致某些水流现象的内在原因往往还有待于研究。因此,在研究应用基本规律解决水力学问题的同时,对某些水流现象要深入观察、分析、研究,不断改进和完善水力学的理论,扩大其应用范围和精度。

水力学虽以水为主要研究对象,但其基本原理同样适用于一般常见的液体和可以忽略压缩性影响的气体。

### 1.1.2 水力学发展简史

水力学是一门古老的科学。水力学的起源可以追溯到很久以前。我国是文明古国,水利事业的历史十分悠久,人们在长期实践中,逐步加深了对水流运动规律的认识。相传4000年前大禹治水,进行了大规模的河道整治工程,表明当时人们已认识到,治水必须“顺水之性”。秦代在公元前256~公元前210年间修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程,这些工程说明当时对水流运动规律的认识,如对明渠水流和堰流的认识,已达到相当高的科学水平。

西汉武帝(公元前140~公元前87年)时期,在黄土高原上修建了龙首渠,以引洛水灌溉农田。为避免明挖造成塌方,首次采用了开竖井沟通长5000余米的穿山隧洞的施工方法,即井渠法。东汉初(约公元31年)杜诗发明了水排,利用山溪水流转动鼓风机械,鼓风炼铁,其水力装置即是近代水轮机的先驱。古代计时工具——铜壶滴漏,就是利用孔口出流使盛水容器的水位发生变化来计算时间的,这说明当时对孔口出流的规律已有一定的认识。北宋时期,在运河上修建的真州复闸,比14世纪末在荷兰出现的同类船闸超前300年以上。

明朝潘季驯提出了“筑堤束水,以水攻沙”和“借清刷黄”的正确治水方针。清初雍正年间何梦瑶在《算迪》一书中提出了流量等于断面平均流速乘以过水断面积的水力计算方法。

14世纪以前,我国的科学技术居于世界前列。但是近几百年来由于封建统治阶级实行闭关锁国的政策,我国的科学技术发展缓慢,未能在供水力学形成严密的科学理论过程中作出应有的贡献。

在欧洲,早在公元前250年西西里岛上的阿基米德(Archimedes)就发表了《论浮体》一文,建立了包括物体浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论,奠定了水静力学的理论基础。但此后直到15世纪的文艺复兴时期,水力学的理论发展缓慢。意大利的达·芬奇(Vinci, L. da)是文艺复兴时期杰出的美术家,同时又是科学家、工程师。他通过实验观察水流运动,绘制了许多水流现象的图形,并发表了《论水的流动和水的测量》一文。1653年法国物理学家帕斯卡(Pascal, B.)阐明了静止液体中压力的概念,提出了关于液体中静压传递的帕斯卡定律。

16世纪以后,在生产力发展需要的推动下,近代的自然科学逐步形成,水力学也随之得到发展。1686年英国物理学家牛顿(Newton, I.)发表了他的名著《自然哲学的数学原理》,提出了牛顿内摩擦定律。1738年瑞士数学家伯诺里(Bernoulli, D.)提出了液体运动的能量估算方法,建立了伯诺里方程。1755年瑞士数学家欧拉(Euler, L.)采用连续介质概念,建立了理想液体运动的微分方程。在此基础上形成了古典水动力学(古典流体力学)。但由于理论假设与实际不尽相符或数学求解的困难,当时尚难以应用于工程实际。工程技术人员主要采用实验和观测手段建立各水力参数间的数量关系,以解决工程实际问题,得到了大量的经验公式,形成了“实用水力学”。代表人物有法国工程师谢才(Chezy, A. de),他于1769年总结出明渠均匀流公式——谢才公式。但由于理论指导不足,这些成果往往有局限性,难以解决复杂问题。

19世纪末以来,工业生产迅速发展,要求人们将理论分析与实验研究结合起来解决水力学问题。1883年英国物理学家雷诺发现了实际液体流动的两种形态——层流与紊流。20世纪初的1904年德国力学家普朗特(Prandtl, L.)从观察流体流动的实践中提出了边界层理论,奠定了近代流体力学基础。激光、超声波、同位素等新的实验技术以及相似原理和量纲分析等新的实验理论,极大提高了运用实验手段探索复杂水流运动规律的水平。20世纪60年代以来,新型电子计算机的出现,使过去许多传统解析方法无法求解的问题现在可以用数值模拟方

法求解,从而推动并形成了计算水力学这一新的分支学科。现代量测技术和电子仪器的应用与电子计算技术的发展以及不同学科的相互渗透,使水力学研究课题的内容日益丰富,并且产生出很多新的学科,如环境流体力学、等离子体动力学、电磁流体力学、随机水力学等。这些新学科的发展,必将促进水力学的进一步发展。

中华人民共和国成立 50 多年来,我国土木工程建设及水利建设取得了史无前例的巨大成就。为结合土木工程建设及水利建设的需要,进行了大量的水力学实验和理论研究工作,取得了许多成果。我国在水流衔接消能、高速水流及泥沙运行等方面的研究成果处于世界先进水平。

### 1.1.3 液体的连续介质模型

液体同其他物质一样,是由大量分子组成的。液体分子间有一定的空隙,每个分子都在不停地做热运动。由于分子在空间分布上的不连续性和分子热运动在时间上的随机性,致使其物理量在空间和时间上均呈现不连续变化,给研究液体运动带来了困难。

然而,水力学的任务是研究液体的宏观机械运动,即研究大量液体分子的统计平均效应,并不关心单个分子的微观运动。何况,液体分子间空隙又极其微小。例如,1 cm<sup>3</sup> 体积的水中,通常约含有  $3.34 \times 10^{22}$  个水分子,相邻分子间的距离约为  $3 \times 10^{-8}$  cm。可见液体分子间的空隙与工程中所研究的运动液体的几何尺寸相比是微不足道的。而且一般要解决的工程问题只与大量液体分子运动的统计平均特性即宏观特性有关。既然如此,把液体看做是不连续的分子结构也就没有必要了。1753 年欧拉采用了一个基本假说,认为液体和气体充满一个体积时是不留任何空隙的,其中没有真空,也没有分子间隙,认为液体是连续介质。这就是对液体的真实结构进行抽象化了的液体模型。

采用连续介质模型之后,下面讨论某点处物理量的定义。现讨论某点 A 处液体的密度。如图 1-1 所示,取包含 A 点的微元体积  $\Delta V$ ,在此体积中液体的质量为  $\Delta m$ ,则其平均密度为  $\Delta m / \Delta V$ 。假设开始时  $\Delta V$  较大,然后围绕 A 点使  $\Delta V$  逐渐缩小,则平均密度对  $\Delta V$  的曲线如图 1-2 所示。

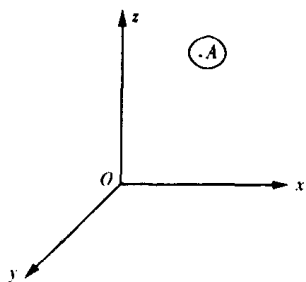


图 1-1 坐标系中的微元体积

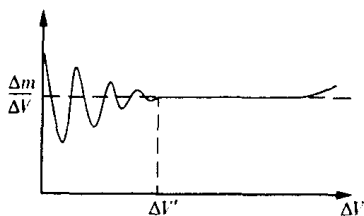


图 1-2 平均密度随微元体积变化的关系

设物质的空间分布是不均匀的,则当  $\Delta V$  较大时  $\Delta m / \Delta V$  随  $\Delta V$  变化,如图 1-2 曲线右端所示;当  $\Delta V$  逐步缩小时,起初  $\Delta m / \Delta V$  随  $\Delta V$  的缩小趋于一定的极限值,这是因为  $\Delta V$  越小,物质的空间分布越均匀。但是,当  $\Delta V$  缩小到比  $\Delta V'$  更小时,由于  $\Delta V$  中所含的分子数较少,分子随机进出的数目不能随时平衡,使其所含质量  $\Delta m$  时大时小,表现出分子的随机运动特性, $\Delta m / \Delta V$  不再具有确定的数值。由此可见, $\Delta V'$  是一种特征体积,它的体积很小,但又包含了足够多的分子。此特征体积的平均密度具有确定的数值,表征了其中足够多分子的统计平均特性,即液体的宏观密度。

我们把  $\Delta V'$  中所有液体分子的集合称为液体质点,或液体微团。因此,连续介质中的 1

“点”，实际上是指液体质点，连续介质是由无限多的液体质点组成的。由此，我们定义 A 点处的密度为

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

如果用数字上的 0 表示  $\Delta V'$ ，则

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

可见，在任意时刻任意空间点的液体质点的密度都有确定值。因此密度是坐标  $x, y, z$  和时间  $t$  的函数，即

$$\rho = \rho(x, y, z, t).$$

至于连续介质某点处的速度，就是指某瞬时占据该点的液体质点的速度。压强等其他物理量的概念可以由此推出。

此外连续介质模型认为：液体质点的物理性质在各个方向上是相同的，或称各向同性的。液体的物理量随空间和时间的变化均是连续的，但允许在孤立点、线、面上不连续。这样就可以应用高等数学中连续函数理论来研究液体运动。实践证明，采用液体的连续介质模型来解决一般工程中的水力学问题总是可以满足要求的。

#### 1.1.4 水力学的研究方法

在学习水力学时，首先要对水力学的研究方法有一定的了解。研究水流运动规律，一般有三条途径：理论分析、实验研究和数值模拟。

##### (1) 实验研究

科学实验是自然科学发展的基础，水力学作为一门技术科学需要密切结合生产实际。由于液体运动的复杂性，水力学的研究就更加离不开科学实验。

水力学理论的发展，在相当程度上依赖于实验研究的水平。古代水力学的知识大多是人们在长期生产实践中逐渐积累起来的，因而水力学理论发展缓慢。只是到了近代，人们直接利用科学实验系统研究水流运动的规律，形成了近代水力学的系统理论；而飞跃发展的现代实验技术促进了现代水力学的蓬勃发展。在水力学中的实验研究方法主要有三种：一是原型观测，即对工程实践中的天然水流直接进行观测；二是系统实验，即在实验室内对人工水流现象进行系统研究；三是模型试验，即模拟实际工程的条件，对模型中的水流现象进行研究。

研究水流运动所用的测试技术，可分为两种类型：一是使用速度、压强、力矩等测量仪器，定量测定这些物理量；二是使流场中的流动情况可视化，以便直接观察或摄影记录，称为流场显示技术。

流场显示技术大致可分为两大类：示踪法和光学法。

示踪法是指用示踪物显示流体运动的方法。示踪物必须是可见的，它随着液体运动。实际上人们观察到的是示踪物的运动，而不是液体本身的运动。这就要求选择适宜的示踪物，以便能够真实地反映实际流动情况。示踪法又可分为以下几种。

① 壁面显示法：用于显示边界面附近的流动状况，这种方法有涂膜法，即在壁面上涂上某种涂料或油及颜料的混合物，当液体流经壁面时形成条纹，显示出壁面附近流动的图谱；还有线簇法，即在壁面上布以柔细的线簇，线簇所指的方向即为壁面附近液体流动的方向。

② 直接注入法：将固体颗粒或有色液体直接注入流场。如将聚苯乙烯、铝粉直接加入水中以显示流型。

③化学反应法:利用流动时发生化学反应,产生有色物质或沉淀物作示踪剂。

④氢气泡法:在水流中置一导线作阴极,通以直流电,将阴极产生的氢气泡作为示踪物质,当其随水流流动时则显示出流动特性,可以观察到流速在几厘米每秒到几米每秒范围内的运动。

光学法是应用光学技术,利用流场中折射率分布不均匀,使光折射,造成代表流场折射率(密度或浓度)分布的图像。

水力学中主要使用示踪法。

## (2)理论分析

通过实验掌握了相当数量的实验资料,就可以根据机械运动的普遍原理,运用理论分析的方法建立某一水流运动现象的理论,并在指导生产实践的过程中加以检验,进一步补充和发展。但由于液体运动的复杂性,解决实际工程问题时,单纯依靠理论分析往往还很难得到所需要的具体结果。因此必须采用理论分析和实验研究相结合的方法。在水力学中,有时先推导理论公式再用实验结果修正;有时是应用半经验半理论的公式;有时是先定性分析,然后直接采用经验公式进行计算。

分析研究液体运动,还必须把机械运动的普遍原理与液体运动的具体特点很好地结合起来。液体运动中,万有引力特性、粘性、压缩性和表面张力特性等引起的重力、粘性力、弹性力和表面张力等物理力都是企图改变液体原有运动状况的力,唯有惯性所引起的惯性力是企图维持液体原有运动状况的力,液体运动的矛盾就是惯性力与其他物理力的相互作用。

机械运动是各种物体相互作用的结果,液体运动就是液体与其他物体以及液体内部分子相互作用的结果。液体运动是液体物性和起始及边界条件的函数。液体物性是指惯性、万有引力特性和粘性等物理性质。边界条件是指液流区域的边界上所具有的几何条件、运动条件和动力条件等。要研究液体运动,不仅要分析流动液体的物理性质,还必须分析流动区域的边界条件。而且流动液体的物理性质中,哪些物性可以忽略甚至不显示出来,哪些物性则能够发挥作用和发挥到什么程度,也都与边界条件有关。同时还需要指出,边界条件固然可以影响液体运动,反之液体运动对边界条件也有影响。例如河道的水流情况及其失沙能力受河床边界的形状及其特性的影响,但是水流的冲刷和淤积作用反过来也能改变河床的边界情况。

由于液体物性比较复杂,在探讨实际液流现象时,要考虑全部物性及其引起的物理力往往是很困难的,在许多情况下也是不必要的。因此必须结合实际条件加以适当简化,抓住起主要作用的物性及其所引起的物理力来进行分析。例如在以后将要讨论到的堰顶溢流现象中,主要是重力和惯性力的作用,粘性力虽有影响,但处于次要地位。又如在有压管流现象中,粘性力和惯性力的作用比较重要,重力作用主要反映在边界压强值的变化上,而在分析水流结构时,重力不是独立的因素,并不直接起作用。至于分析具有自由表面的河渠水流现象,就较为复杂,因为重力、粘性力和惯性力的作用都要考虑,但弹性力和表面张力作用,一般仍可以忽略。在各种实际液流现象中,到底如何判断哪些物性起主要作用,则有待于我们对流动的正确认识和实践的检验。

## (3)数值模拟

近年来电子计算机被广泛使用,加上数值计算方法,如有限差分法、有限元法等有了很大发展,这两方面相结合,为在水力学中使用数值方法奠定了基础。水力学的新分支,计算水力学应运而生,用数值模拟考察流动特性成了和理论分析、实验研究并列的基本研究方法。这种方法,在环境污染预报、油田开发的动态模拟以及解决水利工程中各种水流问题等方面,已经

取得显著成效。

数值模拟比理论分析方法更能适应复杂工程问题的需要;与实验研究方法相比,既无需设备和测试仪器,又能够节省费用和时间,尤其是当实验难以进行时,应用计算机进行数值模拟更具优越性。但必须指出:数值模拟方法的使用离不开前述两种方法,因为在着手进行计算之前,需要对问题的物理本质有足够的了解,才能确定物理模型和数学模型。而数值计算的结果,须与实验结果或理论分析方法所得结果进行比较,以资验证。

## 1.2 液体的主要物理性质

外因是变化的条件,内因是变化的依据。外力作用于液体使其做机械运动的规律是由液体自身的物理性质决定的。因此研究液体的物理性质可以作为研究液体机械运动的基本出发点。在水力学中,和液体运动有关的液体的物理性质主要有惯性、重力特性、粘性、压缩性与热胀性、表面张力特性以及汽化压强特性等。

### 1.2.1 惯性

惯性就是物体所具有的维持其原有运动状况的物理性质。惯性的度量就是质量,也就是物体中所含物质的多少。质量愈大,惯性也愈大。

牛顿运动定律只适用于惯性系。在非惯性系中,为使牛顿运动定律仍然有效,常引入一个假想的力,用以解释物体在非惯性系中的运动。这个由于物体的惯性而引入的假想力称为惯性力。它是物体的惯性在非惯性系中的一种表现,并不反映物体间的相互作用。它也不服从牛顿第三定律,于是惯性力没有施力物,也没有反作用力。例如,前进的汽车突然刹车时,车内乘客就感觉到自己受到一个向前的力,使自己向前倾倒,这个力就是惯性力。又如,汽车在转弯时,乘客也会感到有一个使他离开弯道中心的力,这个力就是离心惯性力。

设物体的质量为  $m$ , 加速度为  $a$ , 则惯性力  $F$  的数值为

$$F = -ma。 \quad (1-3)$$

负号表示惯性力的方向与物体的加速度方向相反。

在国际单位制中,质量的单位为  $\text{kg}$ , 是基本物理量单位。另两个基本物理量单位为  $\text{m}$  和  $\text{s}$ 。力的单位为  $\text{N}$ , 密度的单位是  $\text{kg}/\text{m}^3$  或  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 都是导出单位。

工程界过去习惯于使用工程单位制,其中力的单位为  $\text{kgf}$ , 质量的单位为  $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 。现在除国际单位制外的其他单位制已成为非法定单位。为了查阅旧参考书的方便,现将两种单位制常用单位的换算关系列于附录。

密度是指单位体积液体所具有的质量,以  $\rho$  表示。对于均质液体,设其体积为  $V$ , 质量为  $m$ , 则

$$\rho = \frac{m}{V}; \quad (1-4)$$

对于非均质液体,有

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}。$$

在一般情况下液体的密度随压强和温度的变化而发生的变化很小,故液体的密度可以视为常数。例如水的密度,工程上通常以一个标准大气压下、温度为  $4^\circ\text{C}$  时的最大密度值作为计算值,其数值为  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$  或  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。不同温度下水的密度值见表 1-1。

表 1-1 水的密度与重度

温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	重度 $\gamma/(\text{N}/\text{m}^3)$	温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	重度 $\gamma/(\text{N}/\text{m}^3)$
0	998.87	9 798.73	40	992.24	9 723.95
4	1 000.00	9 800.00	50	988.07	9 683.09
10	999.73	97.35	60	983.24	9 635.75
20	998.23	9 782.65	80	971.83	9 523.94
30	995.67	9 757.57	100	958.38	9 392.12

### 1.2.2 重力特性

物体之间相互具有的吸引力称为万有引力。在液体运动中,一般只需要考虑地球对液体的引力,这个引力就是重力(重量),用  $W$  来表示。设物体的质量为  $m$ ,重力加速度为  $g$ ,则

$$W = mg。 \quad (1-5)$$

单位体积液体所具有的重力称为重度,或称容重、重率,用符号  $\gamma$  表示。对于均质液体,设其体积为  $V$ ,重量为  $W$ ,则

$$\gamma = W/V; \quad (1-6)$$

对于非均质液体,有

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta V}。 \quad (1-7)$$

国际单位制中  $\gamma$  的单位为  $\text{N}/\text{m}^3$ 。由式(1-5)、式(1-6)得

$$\gamma = \rho g, \quad (1-8)$$

或

$$\rho = \gamma/g。 \quad (1-9)$$

$g$  的大小和纬度有关,一般可看作常数,在本书中采用  $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

液体的重度随着压强和温度变化很小,一般可看作常数。水的重度通常取  $9 800 \text{ N}/\text{m}^3$ 。不同温度下水的重度见表 1-1。

### 1.2.3 粘性

液体具有易流动性,静止时不能承受切向力抵抗剪切变形,但在运动状态下,液体就具有抵抗剪切变形的能力,这就是粘性。在剪切变形过程中,液体质点之间存在着相对运动,使液体内部出现切向力,也称为内摩擦力,其作用是抗拒液体内部的相对运动。

1686 年牛顿在他的名著《自然哲学的数学原理》中指出:液体的内摩擦力与其速度梯度  $du/dy$  成正比,与液层的接触面积  $A$  成正比,与流体的性质有关,而与接触面的压力无关。这就是牛顿内摩擦定律。设液体沿一固体表面( $x$  方向)做平行直线运动,其速度为  $u$ (图 1-3),根据牛顿内摩擦定律,有

$$T = \mu A \frac{du}{dy}。 \quad (1-10)$$

式中, $T$  为液体的内摩擦力, $\mu$  为比例系数,称为粘度。在国际单位制中,粘度  $\mu$  的单位为  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ,即  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

设  $\tau$  为单位面积上的内摩擦力,即粘性切应力,则

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy}。 \quad (1-11)$$

作用在两相邻液层之间的粘性切应力  $\tau$  总是成对出现的,大小相等,方向相反。运动较慢的液层作用于运动较快的液层的切应力,其方向与运动方向相反;运动较快的液层作用于运动

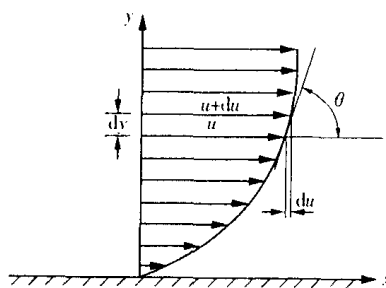


图 1-3 微元的运动

较慢的液层上的切应力,其方向与运动方向相同。

可以证明,式(1-11)中的速度梯度  $du/dy$  实际上就表示着液体质点的剪切变形速率。如图 1-4 所示,取一矩形微团  $ABCD$ ,经过  $dt$  时间后,由于各层流速不等,该微团运动至  $A_1B_1C_1D_1$ ,这时微团发生剪切变形  $da$

$$da = du dt / dy,$$

因此剪切变形速率为

$$da/dt = du/dy. \quad (1-12)$$

由此可以得到牛顿内摩擦定律的另一种表述,即液体中的切应力与剪切变形速率成正比。该定律也适用于气体。至于固体,切应力则是与剪切变形成正比的。

粘度  $\mu$  是粘性的度量。 $\mu$  值愈大,粘性作用愈强。 $\mu$  的大小与流体的种类有关,并随压强和温度的变化而发生变化。对于常见的流体如水、油和空气等, $\mu$  随压强的变化不大,一般可以忽略。温度是影响  $\mu$  值的主要因素。温度升高时,液体的  $\mu$  值减小,而气体的  $\mu$  值则反而增大。究其原因,流体的内摩擦力是流体分子间的动量交换和内聚力作用的结果。由于液体的分子间距小,内摩擦力主要是内聚力作用的结果,温度升高时,分子间距增大,内聚力减小,因而使同样剪切变形速率所产生的切应力也随之减小。气体的分子间距较大,内聚力影响小,分子的动量交换因温度升高而加剧,因而使切应力也随之增大。相对地说,液体粘性受温度的影响较气体更明显。如当温度由  $15^\circ\text{C}$  增至  $50^\circ\text{C}$  时,水的  $\mu$  值约减小一半,而空气的  $\mu$  值仅增加约 9%。

流体粘性的大小还可以用  $\nu$  表示,它为粘度  $\mu$  与密度  $\rho$  的比值,即

$$\nu = \mu / \rho. \quad (1-13)$$

$\nu$  的单位是  $\text{m}^2/\text{s}$  或  $\text{cm}^2/\text{s}$ 。 $\nu$  称为运动粘度,而  $\mu$  则称为动力粘度。水在不同温度下的粘度  $\nu$  及  $\mu$  值见表 1-2,不同温度下空气的粘度  $\nu$  及  $\mu$  值见表 1-3。

表 1-2 不同温度下水的粘度

$t/^\circ\text{C}$	$\mu/10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu/10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$t/^\circ\text{C}$	$\mu/10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu/10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
0	1.792	1.792	40	0.654	0.659
5	1.519	1.519	45	0.597	0.603
10	1.310	1.310	50	0.549	0.556
15	1.145	1.146	60	0.469	0.478
20	1.009	1.011	70	0.406	0.415
25	0.895	0.897	80	0.357	0.367
30	0.800	0.803	90	0.317	0.328
35	0.721	0.725	100	0.284	0.296

表 1-3 不同温度下空气的粘度

$t/^\circ\text{C}$	$\mu/10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu/10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$t/^\circ\text{C}$	$\mu/10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu/10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
0	1.72	13.7	90	2.16	22.9
10	1.78	14.7	100	2.18	23.6
20	1.83	15.7	120	2.28	26.2
30	1.87	16.6	140	2.36	28.5
40	1.92	17.6	160	2.42	30.6
50	1.96	18.6	180	2.51	33.2
60	2.01	19.6	200	2.59	35.8
70	2.04	20.5	250	2.80	42.8
80	2.10	21.7	300	2.98	49.9



实际上,牛顿内摩擦定律并不是对任何流体都成立的。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、酒精和汽油等;把不符合牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体,如原油、沥青和水泥砂浆等。非牛顿流体又可以分成三类。一类为宾汉型塑性流体,当切应力达某一值时,才开始发生剪切变形,且粘度是常数,泥浆、血浆、牙膏等为宾汉型塑性流体。另一类称为伪塑性流体,其粘度随剪切变形速率的增大而减小,如尼龙、橡胶、醋酸纤维素的溶液和油漆等。

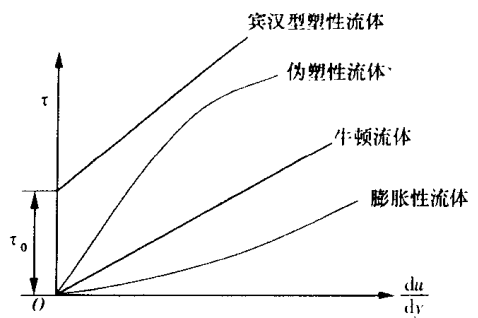


图 1-5 切应力与速度梯度的关系曲线图

还有一类为膨胀性流体,其粘度随剪切变形速率的增大而增大,例如生面团、浓淀粉糊等。牛顿流体和非牛顿流体的切应力和速度梯度关系曲线见如图 1-5。

**例 1-1** 一平板在油面上做水平运动(如图 1-6),已知平板的运动速度  $u=40\text{ cm/s}$ ,油层厚度  $\delta=5\text{ mm}$ ,油的动力粘度  $\mu=0.1\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。求作用在平板单位面积上的粘性阻力。

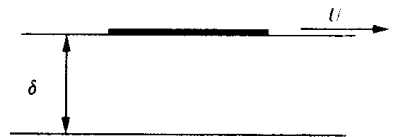


图 1-6 平板在油层面做水平运动示意图

**解** 直接与平板接触的油层粘附在平板上,随平板一起运动。下面与之相邻的油层作用在该层上的切应力的方向与平板运动方向相反,大小等于作用在平板单位面积上的粘性阻力。

由牛顿内摩擦定律,有

$$\tau = \mu du/dy,$$

因为油层内流速按直线分布  $du/dy=u/\delta$ ,故

$$\tau = \mu u/\delta = 0.1 \times 40/0.5 = 8.0\text{ (N/m}^2\text{)}.$$

**例 1-2** 旋转圆筒粘度计,外筒固定,内筒由电机带动旋转。内外筒间充入实验液体(图 1-7)。已知内筒半径  $r_1=1.93\text{ cm}$ ,内筒高  $h=7\text{ cm}$ ,两筒间距  $\delta=0.7\text{ mm}$ ,实验测得内筒转速  $n=10\text{ r/min}$ ,转轴上扭矩  $M=0.0045\text{ N}\cdot\text{m}$ 。试求该实验液体的粘度。

**解** 充入内外筒间隙的实验液体,在内筒带动下做圆周运动。因间隙很小,速度近似直线分布。不计内筒端面的影响,内筒壁的切应力

$$\tau = \mu du/dy = \mu \omega r_1/\delta,$$

$$\omega = 2\pi n/60 = 2\pi \times 10/60 = 1.047\text{ (rad/s)};$$

式中  $\omega$  为内筒的旋转角速度。

$$\text{此时扭矩 } M = \tau \times 2\pi r_1 h \times r_1 = \mu \omega 2\pi r_1^3 h/\delta,$$

$$\begin{aligned} \text{故粘度 } \mu &= \frac{M\delta}{2\pi r_1^3 h} = \frac{0.0045 \times 0.0007}{2\pi \times 1.047 \times 0.0193^3 \times 0.07} \\ &= 0.952\text{ (Pa}\cdot\text{s)}. \end{aligned}$$

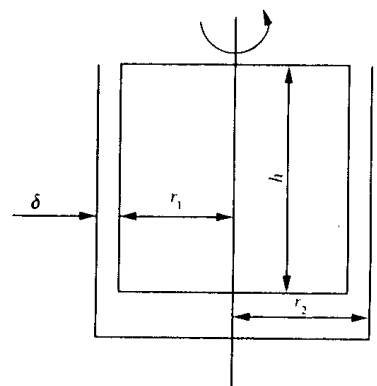


图 1-7 旋转圆筒粘度计示意图

通过后面的学习可以了解,考虑粘性的实际液体的流动是很复杂的,在物理方程的建立和求解中常常会遇到很大的困难。为了使问题简化,便于进行理论分析,在研究液流运动时,常引入理想液体的概念。所谓理想液体是指没有粘性的液体。因为实际液体都具有粘性,所以没有粘性的液体只是一种理想化的液体,它实际上是不存在的。但是引入理想液体概念可以大大简化理论分析的过程,可以作为分析实际液体运动的基础。