

高等学校给排水科学与工程系列教材

水力学

王 焱 编

中国建筑工业出版社

高等学校给排水科学与工程系列教材

水 力 学

王 烨 编

学 代 本
中 工

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

水力学/王焯编. —北京: 中国建筑工业出版社,
2014. 6
高等学校给排水科学与工程系列教材
ISBN 978-7-112-16525-4

I. ①水… II. ①王… 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(2014)第 042125 号

本书紧扣《高等学校给排水科学与工程本科指导性专业规范》要求,结合目前大专业课程体系建设和学分制教学管理的高等人才培养模式,充分考虑普通高等院校学生的基础实际,共分 9 章,介绍了以下主要内容:液体的主要物理性质、水静力学、水动力学、运动学、相似理论基础、水流阻力和水头损失、有压管路的计算、明渠流动、堰流和渗流等。重点强调对基本概念、基本原理和基本计算方法的理解、掌握和运用。各章中附有一定数量的例题和习题,是作者经过精心筛选的,有一定的代表性。

本书可作为给排水科学与工程、环境工程专业本科生教材,也可作为土木、冶金、化工、农林等专业的教师及工程技术人员参考用书。

* * *

责任编辑:王美玲 王 跃

责任设计:李志立

责任校对:姜小莲 刘梦然

高等学校给排水科学与工程系列教材

水 力 学

王 焯 编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京盈盛恒通印刷有限公司印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张 55 1/2 字数: 380 千字

2014 年 2 月第一版 2014 年 2 月第一次印刷

定价: 31.00 元

ISBN 978-7-112-16525-4
(25385)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本书是为普通高等院校给排水科学与工程、环境工程专业“水力学”课程编写的教材,适当兼顾建筑环境与能源应用工程、土木工程等专业的要求,也可供从事相关工作科研人员和工程技术人员作参考。

本书以水力学教学大纲为依据,结合编者长期从事水力学教学实践和教学研究成果,充分考虑普通高等院校学生的基础实际,形成了本书结构体系的主要框架。具体分为9章。前4章重点介绍了水力学的基本概念、基本原理,涵盖了连续性方程、能量方程、动量方程等重点内容,并对液体微团的运动特征进行了分析;后5章是对前面基础知识的拓展和应用,主要论述了水流阻力的产生机理和计算方法,同时也阐述了边界层理论的基本思想。最后,介绍了堰流和渗流等实用性较强的水力学问题。

为了能适应不同专业、不同基础实际的学生学习,在基础内容的介绍方法、难点问题的阐述方式上做了缜密推敲,力求语言简明,结构合理,易于被初学者理解。另外,考虑不同专业后续专业课程与水力学课程的关联性有所差异,在例题的遴选、习题的编写上也下了很大的功夫。本书在内容取舍上,吸收了国内目前在用的大部分教材的优点,其知识体系凸显了“基础知识的系统性传授和实践环节相结合”的主导思想,有利于培养学生的科研意识和创新思维能力。

本书由兰州交通大学王烨编。编写过程中,作者的几名研究生参与了文字和插图的整理工作,兰州交通大学孙三祥教授以及何文社教授为书稿的完善提出了许多宝贵意见,在此一并表示感谢。

本书从编写过程到出版得到了兰州交通大学环境与市政工程学院的大力支持,在此表示感谢!

限于作者水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请读者批评、指正。

编者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 水力学的任务及其发展史	1
1.2 液体的主要物理性质	3
1.3 作用在液体上的力	6
1.4 水力学的研究方法	7
第 2 章 水静力学	10
2.1 静水压强及其特性	10
2.2 液体的平衡微分方程及其积分	12
2.3 重力作用下的静水压强分布规律	15
2.4 作用于平面上的静水总压力	20
2.5 作用于曲面上的静水总压力	24
2.6 重力和惯性力同时作用下液体的平衡	27
2.7 浮力、浮体与潜体	30
第 3 章 水动力学理论基础	35
3.1 描述液体运动的两种方法	35
3.2 欧拉法的基本概念	37
3.3 恒定总流连续性方程	41
3.4 恒定总流能量方程	43
3.5 恒定总流动量方程	52
3.6 液体微团运动分析	57
3.7 流速势、流函数、势流叠加	62
第 4 章 量纲分析和相似原理	71
4.1 量纲分析法	71
4.2 相似的基本原理	74
4.3 相似准则	75
4.4 相似原理的应用	78
第 5 章 水流阻力和水头损失	82
5.1 水流阻力和水头损失的两种形式	82
5.2 液体流动的两种形态	83
5.3 均匀流沿程水头损失与切应力的关系	86
5.4 圆管中的层流	88
5.5 液体紊流运动简介	91
5.6 圆管中沿程阻力系数的变化规律及影响因素	97

5.7	局部水头损失	105
5.8	边界层概念与绕流阻力	112
第6章	孔口、管嘴出流及有压管路	119
6.1	薄壁孔口的恒定出流	119
6.2	管嘴的恒定出流	122
6.3	孔口（或管嘴）的变水头出流	125
6.4	短管水力计算	126
6.5	长管水力计算	133
6.6	管网水力计算基础	143
6.7	有压管路中的水击	146
第7章	明渠恒定流	156
7.1	明渠的分类	156
7.2	明渠均匀流的计算公式	159
7.3	明渠水力最优断面和允许流速	160
7.4	明渠均匀流水力计算的基本问题	163
7.5	无压圆管均匀流的水力计算	165
7.6	复式断面渠道的水力计算	168
7.7	明渠非均匀流产生条件和特征	170
7.8	明渠非均匀流中几个重要概念	171
7.9	明渠非均匀渐变流水面曲线分析与计算	184
第8章	堰流	199
8.1	堰流的定义和分类	199
8.2	堰流的基本公式	200
8.3	薄壁堰流	201
8.4	实用堰流	206
8.5	宽顶堰流	207
8.6	小桥孔径水力计算	212
8.7	闸下出流	214
第9章	渗流	218
9.1	渗流概述	218
9.2	渗流基本定律	220
9.3	地下水的均匀流和非均匀流	224
9.4	井和集水廊道	228
9.5	流网法求解渗流	235
参考答案		240
主要参考文献		244

第1章 绪 论

1.1 水力学的任务及其发展史

水力学是力学的一个分支,是研究液体平衡和机械运动规律及其工程应用的一门学科。在我国各高校中,在土木工程、市政工程、流体机械、农林、石油化工等专业中均开设水力学,属于专业基础课。该门课所涉及的基本原理和基础理论对于专业课的学习、课程设计、毕业设计以至工程实际问题的解决等具有非常重要的理论支撑作用和指导意义。尤其对于工科学生,他们毕业后大部分在生产一线从事技术管理工作,必须具备一定的专业基础、技术应用能力和现场协调能力,所以,学习这门课并掌握该学科的发展前沿动态非常必要。

自然界物质存在的形式一般有三种:固体、液体和气体。液体和气体统称为流体,在性质上有许多相似之处。流体与固体的主要区别在于它们对外力抵抗的能力不同。固体可以抵抗一定的拉力、压力和剪力,而流体几乎不能承受拉力。处于静止状态下的流体也不能抵抗剪力,即流体在很小剪力作用下将发生连续不断的变形,流体的这种特性称为易流动性。气体与液体的差别在于气体易于压缩,而液体难于压缩。由于液体所具有的物理学特性与固体和气体不同,在科学发展中,逐渐形成了水力学这样一门科学。

水力学的萌芽,人们认为是从距今约2200年以前古希腊学者阿基米德(Archimedes,公元前287~公元前212)写的《论浮体》一书开始的。他首次科学总结了静止液体的性质,提出了物体在流体中所受浮力的基本原理——阿基米德原理,奠定了水静力学的基础。而与之对应的实践知识也早已被我国、印度、埃及、巴比伦等国家的劳动人民所熟知。

15世纪意大利的文艺复兴时期,生产力的快速发展和文化的传播使得人类在思想的交流和对自然现象的研究方面出现了前所未有的高潮。著名物理学家、艺术家列奥纳多·达·芬奇(Leonardo Da Vinci, 1452~1519)比较系统地研究了沉浮、孔口出流、物体运动阻力、流体在管路和水渠中流动等问题。斯蒂芬(S. Stevin, 1548~1620)发表了水静力学原理。伽利略(G. Galileo, 1564~1642)首次提出了“运动物体所受的阻力随着流体介质密度的增大和运动速度的提高而增大”的论断。帕斯卡(B. Pascal, 1623~1662)建立了反映液体中压强传递规律的帕斯卡原理。牛顿(I. Newton, 1642~1727)于1686年提出了流体黏性的概念,通过实验获得了流体内部黏滞力和速度梯度之间的关系,建立了牛顿内摩擦定律,为黏性流体力学的理论发展奠定了基础。1738年,伯努利(D. Bernoulli, 1700~1782)在对孔口出流和管道流动进行了大量的观测实验后,构建了我们今天普遍应用的伯努利方程,是能量守恒定律在流体力学中的应用。1755年,欧拉(Euler L, 1707~1783)在所著的《流体运动的一般原理》中提出了流体连续介质模型,

建立了连续性微分方程和理想流体的运动微分方程，奠定了无黏性流体动力学的理论基础。1783年，法国数学家、天文学家拉格朗日（Lagrange J-L, 1736~1813）在总结前人工作的基础上，提出了一种新的描述流体运动的方法——拉格朗日法。德国力学家亥姆霍兹和英国数学家斯托克斯先后提出了速度分解定理，将流体质点的运动分解为平移、变形（线变形和角变形）和旋转，进一步推动了古典流体力学的发展。随着许多新的工程实际问题的出现，早些时期的流体力学基本理论在解决这些实际问题时暴露出了自身的局限性。比如，忽略液体黏性的基本规律与实际情形之间还存在较大差别。因此，实验流体力学随之得到迅猛发展。法国工程师皮托（Pitot H, 1695~1771）于1730年发明了测量流体流速的皮托管。法国工程师谢齐（Chezy, 1718~1798）于1769年建立了计算均匀流的经验公式。法国工程师达西（Darcy H P G）于1856年提出了线性渗流定律等。爱尔兰工程师曼宁（Manning, 1816~1897）于1890年建立了粗糙计算公式。法国工程师纳维（Navier L M H, 1785~1836）于1821年首次提出了不可压缩黏性流体的运动微分方程组。英国数学家、物理学家斯托克斯（Stokes G G, 1819~1903）于1845年导出了黏性流体的运动方程，与纳维的研究成果后来一起被统称为纳维-斯托克斯方程（简称N-S方程），该方程反映了实际流体在运动过程中所受质量力、压应力、黏性力和惯性力之间的平衡关系，为研究实际流体的运动规律奠定了理论基础。应用纯数学方法求解纳维-斯托克斯方程非常困难，这就促成了古典流体力学和实验水力学的交叉发展。英国物理学家、工程师雷诺（Reynolds O, 1842~1912）于1883年用实验方法证实了流体的两种流动状态——层流和湍流的客观存在，提出了反映流体处于不同流态时所受惯性力和黏性力相对大小的无量纲数——雷诺数；于1895年又提出了雷诺应力的概念，用时均方法建立了不可压缩实际流体的湍流运动方程，即雷诺方程。1904年德国工程师、力学家普朗特（Prandtl L, 1878~1953）提出了边界层概念。此后，经众多研究者从不同角度的推理、论证，逐渐形成了边界层理论，将边壁附近流体的基本信息和主流区流体的基本信息联系了起来。使得流体运动的黏性理论和无黏性理论通过边界层这一概念实现了体系上的统一。后来，在匈牙利力学家冯卡门（Karman T von, 1881~1963）、英国物理学家泰勒（Taylor G I, 1886~1975）等人的努力下，边界层理论和湍流理论得以快速发展，现代流体力学体系由此逐渐趋于完善，其中，关于液体运动的部分理论成为现代水力学的核心内容。

20世纪以来，水力学在现代生产、生活中体现了更为广泛的应用。如城市的生活和工业用水，一般都是从水厂集中供应，水厂利用水泵把河、湖或井中的水抽上来，经过净化和消毒后，再通过管路系统把水输送到各用户。有时，为了均衡水泵负荷，还需要修建水塔。这样，就需要解决一系列与水力学有关的问题，如取水口的布置、管路布置、水管直径和水塔高度等的确定，水泵选型和井的产水量计算。在修建铁路、公路，开凿航道，设计港口等工程时，也必需解决一系列水力学问题。如桥涵孔径的设计、站场路基排水设计、隧道通风、排水设计等。从学科发展看，既有水力学与其他学科的交叉渗透，又出现了一大批分支学科，如水工水力学、电站水力学、船闸水力学、河流动力学、环境生态水力学等。

学习水力学的目的，是根据有关专业的需要，掌握流体运动（或静止状态）的基础理论和基本原理，获得分析和解决有关水力学问题的能力，为进一步学习和研究打下基础。

1.2 液体的主要物理性质

1.2.1 连续介质模型

液体是由大量不断做无规则热运动的分子所组成。从微观的角度看,由于分子之间存在有空隙,因此描述液体运动的物理量(如流速、压强等)的空间分布也是不连续的。同时,由于分子的随机热运动,又导致物理量在时间上的不连续性。

现代物理研究表明,标准状况下,每立方厘米液体中约有 3.3×10^{22} 个液体分子,相邻分子间距离约为 3×10^{-8} 厘米。可见,分子间的距离是相当微小的,而在相当小的体积中却包含了难以计数的分子。在一般工程中,所研究液体的空间比分子尺寸大得多,而且要解决的工程问题是液体大量分子运动的统计平均特性,即宏观特性。正因为这样,在研究液体的机械运动中,所取的最小液体是液体微团,它的体积无穷小却又包含无穷多个液体质点。从宏观看,该微团的尺度充分的小,小到在数学上可以作为点来处理;但从微观看,与分子的平均自由行程相比,该微团的尺度又很大,包含有足够多的分子,使得这些分子的共同物理属性的统计平均值有意义。这样,就不必去研究液体的微观分子运动,而只研究描述液体运动的宏观物理属性。据此,瑞士学者欧拉于 1753 年首次提出了连续介质的概念,即假设液体是一种连续充满其所占据空间而毫无空隙的连续体,液体中的一切物理量(如速度、压强、密度等)都可以视为空间坐标和时间的连续函数。这样,就可以利用连续介质函数的分析方法来研究液体运动。实践证明,采用连续介质模型所得出的有关液体运动规律与客观实际是十分吻合的。

1.2.2 密度和重度

液体的密度是指单位体积液体所含有的质量。若一均质液体的体积用 V 表示,质量用 M 表示,则,该均质液体的密度为

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-1)$$

密度的量纲是 $[M/L^3]$, 单位是 (kg/m^3) 。

均质液体的重度 γ 是单位体积所含的重量

$$\gamma = \rho g \quad (1-2)$$

表 1-1 为不同温度下水的密度值。几种常见流体在不同测定温度下的密度值见表 1-2。

水的密度

表 1-1

密度 (kg/m^3)	999.87	1000	999.73	998.23	995.67	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38
测定温度 ($^{\circ}C$)	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100

几种常见流体的密度

表 1-2

液体名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
密度 (kg/m^3)	1.205	13590.3	679.5~749.5	793.1	1590.7	1019.3~1028.2
测定温度/ $^{\circ}C$	20	0	15	15	20	15

1.2.3 黏滞性

液体运动时,液体质点之间有相对运动,质点间产生内摩擦力抵抗其相对运动,这种

性质称为液体的黏滯性或简称黏性，此内摩擦力又称为黏滯力。液体温度升高时黏性减小，气体的黏性随温度升高而增大。

牛顿通过大量实验，于 1686 年总结出“牛顿内摩擦定律”。下面以图 1-1 所示流动模型来说明实验内容及结果。设两个平行平板相距 h ，其间充满了液体，平板面积为 A ，其面积足够大，从而可以忽略边缘对液流的影响。设下板固定不动，上板受拉力 T 作用，以匀速 U 向右运动。由于液体质点受固体壁面的粘附作用，下板上表面的液体质点的速度为零，与上板下表面相贴附的一层液体质点的速度为 U 。当 h 或 U 不是太大时，实验表明：两平行平板之间在板法线方向的横截面上，液体质点的速度呈线性分布，如图 1-1 所示。速度的线性分布说明相邻两流层之间存在相对运动，液体之间的内摩擦力就产生在发生相对运动的液体薄层之间。

内摩擦力的数学表达式可以写为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

该公式为牛顿内摩擦定律。内摩擦力与作用面平行。若以单位面积上的内摩擦力，即切应力表示，则有

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式中， $\frac{du}{dy}$ 称为速度梯度，速度梯度表示速度沿垂直于速度方向 y 的变化率。

为理解速度梯度的意义，取液体矩形 $abcd$ ，如图 1-2 所示。由于下表面速度 u 小于上表面速度 $(u+du)$ ，经过相同的时段 dt ，下表面所移动的距离 udt 小于上表面所移动的距离 $(u+du)dt$ ，所移动距离差为 $dudt$ ， $abcd$ 变形为 $a'b'c'd'$ 。两流层之间的垂直连线 ac 及 bd 在 dt 时段内变化了角度 $d\theta$ 。由于 dt 很小， $d\theta$ 也很小，所以

$$d\theta \approx \tan d\theta = \frac{dudt}{dy}$$

故

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-5)$$

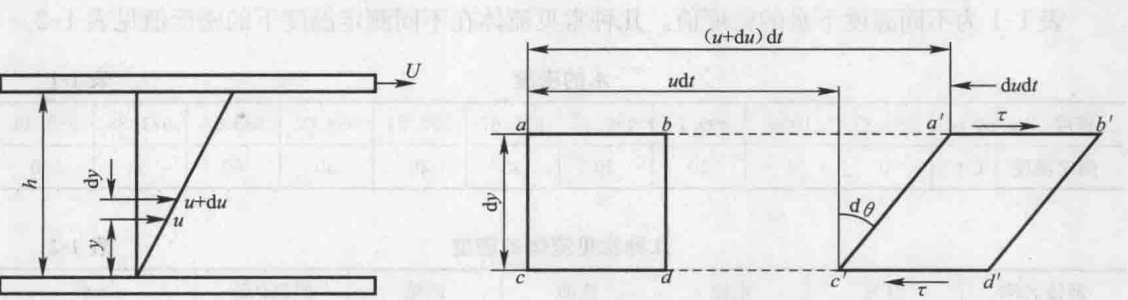


图 1-1

图 1-2

可见，速度梯度就是直角变形速度。这个直角变形速度是在切应力的作用下发生的，所以，也称剪切变形速度。因为液体的基本特征是具有流动性，在切应力作用下，只要有充分的时间让它变形，它就有无限变形的可能性。所以，牛顿内摩擦定律可以理解为切应

力与剪切变形速度成正比, 即

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-6)$$

式中, μ 为动力黏滞系数, 单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $(\text{Pa} \cdot \text{s})$ 。

工程计算中, 经常出现 μ/ρ 的比值, 用 ν 表示。即

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-7)$$

式中 ν ——运动黏滞系数, 单位为 m^2/s 。

【例 1-1】 如图 1-3, 气缸内壁的直径 $D=13\text{cm}$, 活塞的直径 $d=12.96\text{cm}$, 活塞的长度 $l=11\text{cm}$, 活塞往复运动的速度为 1.2m/s , 润滑油液的 $\mu=0.2\text{Pa} \cdot \text{s}$, 求作用在活塞上的黏性力。

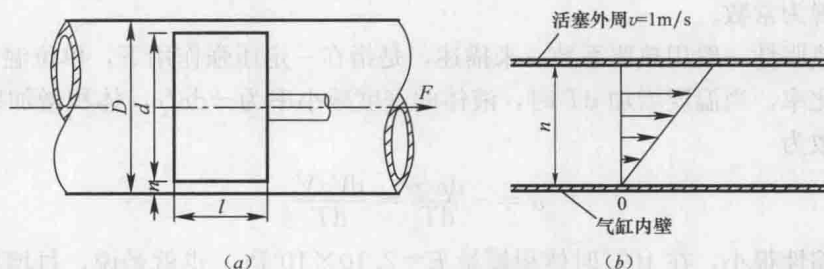


图 1-3

【解】 由于黏性作用, 粘附在气缸内壁的润滑油层速度为零, 粘附在活塞外沿的润滑油与活塞的速度相同, 为 1.2m/s 。因此, 润滑油层的速度由零增至 1.2m/s , 油层间因相对运动产生切应力, 用 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 计算。该切应力乘以活塞侧面积就是作用于活塞上的黏性力 T 。

将间隙 n 放大, 绘出该间隙中的速度分布图。由于活塞与气缸的间隙 n 很小, 速度分布近似认为是直线分布。所以

$$\frac{du}{dy} = \frac{v}{n} = \frac{120}{0.5(13-12.96)} = 6.0 \times 10^3 \text{s}^{-1}$$

所以
$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = 0.2 \times 6.0 \times 10^3 = 1.2 \times 10^3 \text{N/m}^2$$

接触面积
$$A = \pi d l = \pi \times 0.1296 \times 0.11 = 0.045 \text{m}^2$$

则
$$T = A \tau = 0.045 \times 1.2 \times 10^3 = 54.0 \text{N}$$

1.2.4 压缩性和热胀性

压强增高时, 分子间的距离减小, 液体宏观体积减小, 密度增加、除去外力后能恢复原状, 这种性质称为液体的压缩性。

液体的压缩性可用体积压缩系数 K 来量度, 是指在一定温度下单位压强增量所引起流体体积的变化率。设压缩前的体积为 V , 压强增加 Δp 后, 体积减小 ΔV , 密度增大 $\Delta \rho$, 则

$$K = -\frac{\Delta V/V}{\Delta p} = \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta p}$$

或

$$K = -\frac{dV/V}{dp} = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad (1-8)$$

式中的负号表示体积随压强的增大而减小。

工程上还常用液体的弹性模量（体积弹性系数） E 去衡量液体的压缩性，是体积压缩系数 K 的倒数，即

$$E = \frac{1}{K} = -\frac{dp}{dV/V} \quad (1-9)$$

E 值越大，表示液体越不容易被压缩， $E \rightarrow \infty$ 时表示绝对不可压缩， E 的单位是 N/m^2 。

液体种类不同，其 K 或 E 值不同。对于同种液体它们随温度和压强而变化，但变化很小，一般视为常数。

液体的热胀性一般用热胀系数 α 来描述，是指在一定压强作用下，单位温升所引起液体体积的变化率。当温度增加 dT 时，液体的密度减小率为 $-d\rho/\rho$ ，体积增加率为 dV/V ，则热膨胀系数为

$$\alpha = -\frac{d\rho/\rho}{dT} = \frac{dV/V}{dT} \quad (1-10)$$

水的压缩性很小，在 10°C 时体积模量 $E = 2.10 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。也就是说，每增加一个大气压，水的体积相对压缩值约为两万分之一。所以，对一般水利工程来说，认为水是不可压缩的是足够精确的。但对于一些特殊情况，必须考虑水受压后的弹性作用。如在研究水电站高压管道中的水流，当进水阀突然关闭时管道内压力骤然急剧升高，液体受到压缩，这时，就必须考虑弹性力对流体运动状态的影响作用。管道中水击现象的分析中，也必须考虑水短时间受压后的弹性效应。

1.2.5 表面张力

在日常生活中，我们常常看到水滴悬挂在墙壁上或水龙头出口处，水银在平滑表面上成球形滚动等现象，表明液体自由表面有明显的欲成球形的收缩趋势。引起这种收缩趋势的力就是表面张力。

表面张力是由分子的内聚力引起的。不难想象，处于自由表面上的液体分子所受到周围液体和气体分子的作用力是不平衡的。气体分子对它的作用力小于另一侧液体分子的作用力。因此，自由液面的液体所受到的合力是将它们拉向液体内部。表面张力仅在自由表面存在，液体内部并不存在，所以，它是一种局部受力现象。

表面张力很小，在水力学中一般不考虑它的影响。但在某些情况下，它的影响也是不可忽略的，如微小液滴（如雨滴）的运动、水深很小的堰流等。

表面张力是指在自由液面单位长度上所受拉力的数值，用 σ 表示，单位为 N/m 。 σ 的大小随液体种类和温度变化而不同。对于 20°C 的水， $\sigma = 0.047 \text{ N/m}$ ，对于水银 $\sigma = 0.54 \text{ N/m}$ 。

1.3 作用在液体上的力

处于平衡或运动状态的液体，都会受到各种力的作用。作用于液体上的力，从物理性

质上有重力、惯性力、弹性力、表面力、摩擦力等。按照作用方式, 这些力可以分为表面力和质量力。

1.3.1 表面力

表面力是作用于液体表面上的力, 是相邻液体或其他物体作用的结果, 通过相互接触面传递。表面力的大小与作用面积成正比。单位面积上的表面力称为应力。将应力分解为与作用面平行的切向应力以及与作用面正交的法向应力。

在液体中取包含 A 点的微小面积 ΔA , 作用在 ΔA 上的法向力 ΔP , 切向力为 ΔT , 则 A 点的法向应力, 即压强 p 及切应力 τ 分别为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-11)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-12)$$

1.3.2 质量力

质量力是作用在液体每一个质点上的力, 其大小与液体的质量成正比。最常见的是重力, 对于非惯性坐标系, 质量力还包括惯性力。质量力常用单位质量力作为分析基础。单位质量力是指单位质量的液体所受的质量力。若液体是均质的, 其质量为 m , 总质量力为 $\vec{F}$, 则单位质量力 $\vec{f}$ 为

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (1-13)$$

若总质量力 $\vec{F}$ 在坐标轴上的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z , 则单位质量力在相应坐标轴的投影为 X 、 Y 、 Z , 则有

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{F_x}{M} \\ f_y &= \frac{F_y}{M} \\ f_z &= \frac{F_z}{M} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

即单位质量力 $\vec{f}$ (矢量) 为

$$\vec{f} = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k} \quad (1-15)$$

式中 $\vec{i}$ 、 $\vec{j}$ 、 $\vec{k}$ ——单位矢量;

X 、 Y 、 Z ——单位质量力的投影值, 单位质量力单位为 m/s^2 。

1.4 水力学的研究方法

水力学的研究方法是与其发展史相关联的。随着水力学与其他学科的交叉、渗透以及实际问题的不断复杂化, 基于理论突破和工程实际问题的解决两方面需求, 先后出现了三种基本的研究方法, 即理论分析、实验研究和数值计算。这三种方法是相互结合补充, 相辅相成的。

1.4.1 理论分析法

水力学是建立在经典力学基础上的。理论分析方法又是以连续介质模型为基础对流动现象进行研究的。其步骤是：将实际液体运动抽象成水力学的模型（力学模型）；根据机械运动的普遍规律（如质量守恒定律、牛顿定律等）和液体的物理性质，结合液体运动的特点，通过数理分析建立液体运动的基本方程（数学模型）；利用数学工具结合初始条件与边界条件求解方程；检验和解释求解结果。正确的结果可揭示液体运动的本质特性和规律，因此具有普遍的适用性。

1.4.2 实验研究法

由于实际水流运动的多样性和复杂性，现有理论分析成果的局限性，使得有些水力学的工程问题不能得到可靠的解决。这样，以实验测试来获得流动参数的研究手段就逐渐发展了起来。具体的思路为：以水力学相似理论为指导，在实验室内把实际工程缩小为模型，在模型上预演相应的水流运动，用流体测量技术测量模型实验中的流动参数；处理和分析实验数据并将它归纳为经验公式。将得到的模型水流的经验性规律再按照水流运动的相似关系换算到原型中去，以满足工程设计需要。

用理论分析与科学试验相结合的方法已成功地解决了许多实际工程问题，通过大量实验研究也总结出许多行之有效的经验公式。但实验研究方法的缺点是从实验中得到的经验公式对不同流动条件的通用性较差。

1.4.3 数值计算法

随着计算机技术的快速发展，过去无法解析的水力学偏微分方程，现在可以用计算机数值方法得到数值解。数值研究的一般过程是：对基本方程作简化和数值离散化，编制程序作数值计算，将计算结果与实验或理论解析结果比较。常用的方法有：有限差分法、有限元法、有限体积法、边界元法等。计算的内容包括渗流场的求解、非恒定流的计算等。大型工程计算软件已成为计算工程流动问题的有力武器。数值方法的优点是能计算解析方法无法求解的流动问题，能模拟多种流动问题，比实验方法省时省钱。但数值方法毕竟是一种近似求解方法，适用范围受数学模型的正确性、计算精度和计算机性能限制。可以预见，随着计算机的计算速度和容量的提高以及计算方法的不断改进，数值计算在复杂的水力学问题的求解中将发挥愈来愈重要的作用。

习 题

1-1 某种汽油的重度为 7.00kN/m^3 ，问其密度为多少？

1-2 20°C 的水，其体积为 2.5m^3 ，当温度升至 80°C ，求体积增加多少？

1-3 使水的体积减小 0.1% 及 1.0% 时，应增大压强各为多少？

1-4 一封闭容器盛以水或油，在地球上静止时，其单位质量力为多少？当封闭容器从空中自由下落时又为多少？

1-5 如图 1-4 所示，有一面积为 $60\text{cm}\times 40\text{cm}$ 的平板，质量为 5kg 。沿一与水平面成 20° 角的斜面下滑，平板与斜面之间的油层厚度为 0.6mm ，若下滑速度 0.84m/s ，求油的动力黏度 μ 。

1-6 如图 1-5 所示，一圆锥绕其中心轴作等角速度旋转 $\omega=16\text{rad/s}$ ，锥体与固定壁面之间的距离 $\delta=1\text{mm}$ ，用 $\mu=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的润滑油充满间隙，锥底部半径 $R=0.3\text{m}$ ，高 $H=0.5\text{m}$ 。求作用于圆锥体的阻力矩。

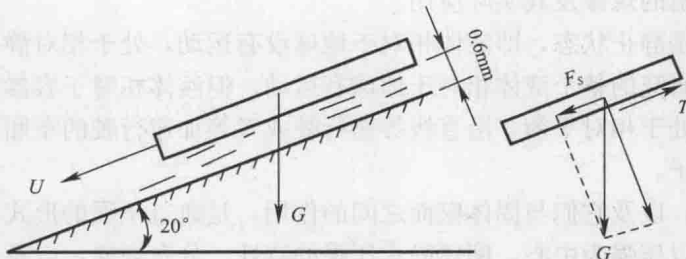


图 1-4

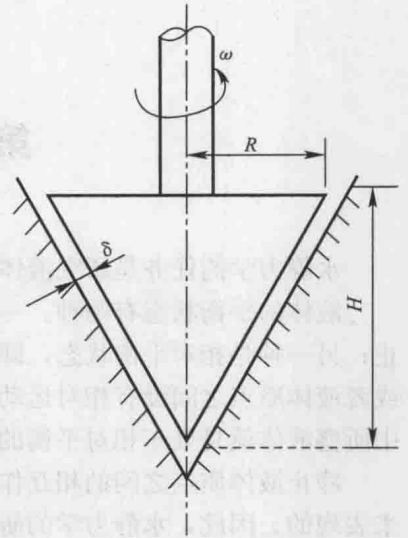


图 1-5

2.1 静水压强及其特性

2.1.1 静水压强

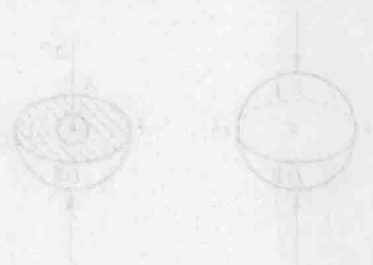


图 2-1 静水压强的定义

(1-5)

$$\frac{dF}{dA} = \frac{F}{A} = p$$

第2章 水静力学

水静力学的任务是研究液体平衡的规律及其实际应用。

液体的平衡状态有两种：一种是静止状态，即液体相对于地球没有运动，处于相对静止；另一种是相对平衡状态，即所研究的整个液体相对于地球有运动，但液体相对于容器或者液体质点之间没有相对运动，处于相对平衡。沿直线等速行驶或者等加速行驶的车厢中所盛液体就是处于相对平衡的例子。

静止液体质点之间的相互作用，以及它们与固体壁面之间的作用，是通过压强的形式来表现的。因此，水静力学的研究以压强为中心，阐述静水压强的特性、分布规律，以及静止液体对物体表面的总压力。

在工程实际中会遇到很多水静力学问题。例如，许多水工建筑物（如坝、闸门等）的表面都直接与液体接触，要进行这些建筑物的设计，首先必须计算作用于这些边界上的水压力。水静力学是水力学的基础理论，在此基础上可以分析、解决工程上的实际问题。

2.1 静水压强及其特性

2.1.1 静水压强

水力学中，把静止液体作用在接触面上的压力称为静水压力，单位为 N。

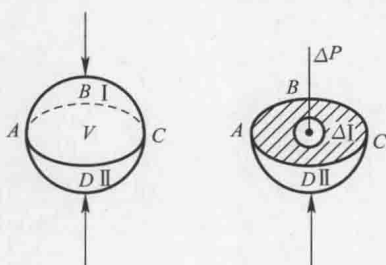


图 2-1 静止液体相互作用

从均质的静止（或相对平衡）状态液体中，任取一体积 V ，如图 2-1 所示。设用任意平面 $ABCD$ 将此体积分为 I、II 两部分，假定将部分 I 移去，并以与其等效的力代替它对部分 II 的作用，显然，余留部分不会失去原有的平衡。

从平面 $ABCD$ 上取出一小块面积 ΔA ， a 点是该面的几何中心，令力 ΔP 为移去的液体作用在面积 ΔA 上的总作用力。将力 ΔP 称为面积 ΔA 上的静水压力； $\Delta P/\Delta A$ 称为面积 ΔA 上的平均静水压力强度，简称平均压强，以 $\bar{p}$ 表示。当 ΔA 无限缩小到点 a 时，平均压强 $\bar{p} = \Delta P/\Delta A$ 便趋近某一极限值，此极限值定义为该点的静水压强，通常以符号 p 表示，即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \quad (2-1)$$

其单位为 N/m^2 ，即 Pa。

2.1.2 静水压强的特性

静水压强有两个特性：

特性一：静水压强的方向与作用面的内法线方向一致。

在静止液体中任取截面 $N-N$ ，将其分为 I、II 两部分，取 II 为隔离体，I 对 II 的作用由 $N-N$ 面上连续分布的应力代替，如图 2-2 所示。

在 $N-N$ 面上，任一点的应力 p 的方向只要不与作用面的法线重合，就可以分解为与作用面垂直的法向应力 p_n 和与作用面平行的切向应力 τ ，而静止液体不能承受剪切力，所以，这种情况不存在。液体也不能承受拉力，因此， p 的方向只能和作用面的内法线方向一致，即静止液体中只存在压应力——压强。

特性二：任一点的静水压强大小和受压面的方位无关，或者说作用于同一点上各个方向的静水压强都相等。

证明如下：

在静止液体中取出一一点 O ，包含 O 点作微元直角四面体 $OABC$ 为隔离体，如图 2-3 所示。设其中三个正交面与坐标平面方向一致，边长分别为 dx 、 dy 、 dz 。四面体的倾斜面面积为 dA ，以 p_x 、 p_y 、 p_z 和 p_n 分别表示三个正交面和斜面 ABC 上的平均压强。如果当四面体 $OABC$ 无限地缩小到 O 点时，等式 $p_x = p_y = p_z = p_n$ 成立，则特性二便得到了证明。为此，用 P_x 、 P_y 、 P_z 和 P_n 分别表示垂直于坐标轴 x 、 y 、 z 的平面及斜面上的总压力。

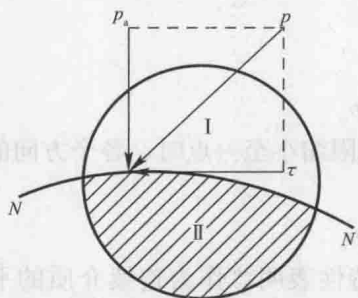


图 2-2 静止液体中应力方向

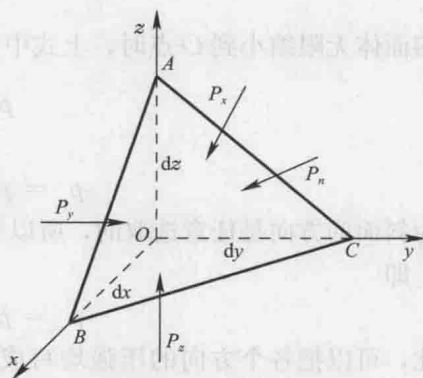


图 2-3 静止微直角四面体受力分析

分析作用在四面体上的力，包括

表面力：由特性一可知，只有压力 P_x 、 P_y 、 P_z 、 P_n

$$\left. \begin{aligned} P_x &= \frac{1}{2} p_x dy dz \\ P_y &= \frac{1}{2} p_y dz dx \\ P_z &= \frac{1}{2} p_z dx dy \\ P_n &= p_n dA \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

质量力：四面体 $OABC$ 除了受到上述表面力的作用外，还受质量力作用，静止液体的质量力是重力。四面体的体积为 $\frac{1}{6} dx dy dz$ ，液体密度为 ρ ，令 f_x 、 f_y 、 f_z 分别为液体单位质量力在相应坐标轴方向的分量，则质量力在各坐标轴方向的分量为