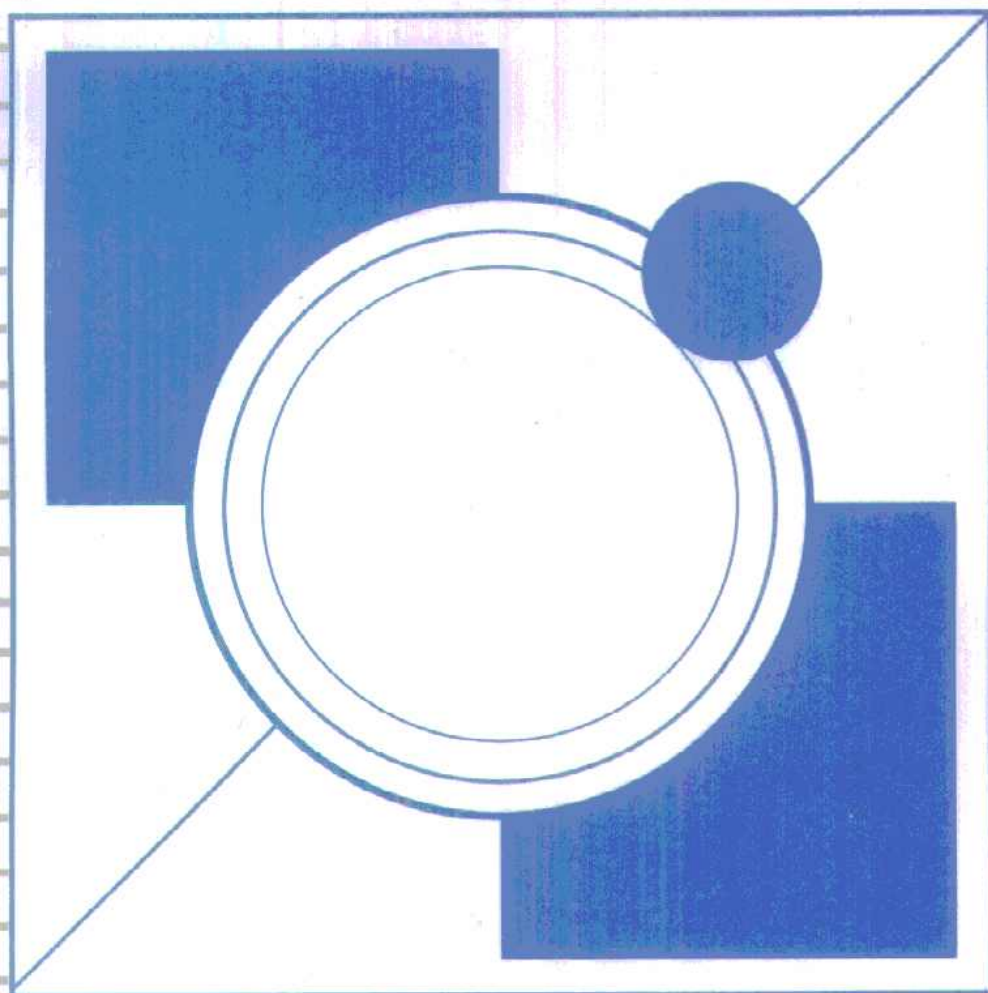


高职高专给水排水工程专业系列教材

水力学

龙北生 主编

许玉望 主审



TV13
L79

高职高专给水排水工程专业系列教材

水 力 学

龙北生 主编

许玉望 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

水力学/龙北生主编. —北京: 中国建筑工业出版社,
2000

高职高专给水排水工程专业系列教材

ISBN 7-112-04010-8

I. 水... II. 龙... 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 54898 号

本书是高等专科学校给水排水工程专业《水力学》课程教学用书。书中结合专业特点,注重专科特色,深入浅出地介绍了水力学的基本概念、基本原理及其在工程中的应用。全书包括:绪论,水静力学,一元水动力学,液流阻力与水头损失,孔口、管嘴出流与紊流射流,有压管流,明渠均匀流,明渠恒定非均匀流,堰流与闸孔出流,渗流,量纲分析与相似理论共十一章内容。

本书亦可作为道路与桥梁、工业与民用建筑及环境类等专业的本、专科教学参考教材,并可供有关工程技术人员参考。

高职高专给水排水工程专业系列教材

水 力 学

龙北生 主编

许玉望 主审

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 字数: 385 千字

2000 年 6 月第一版 2000 年 6 月第一次印刷

印数: 1—2,500 册 定价: 19.60 元

ISBN 7-112-04010-8

TU · 3140 (9417)

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

本书是高等专科学校给水排水工程专业系列教材之一。它根据全国高等学校给水排水工程学科专业指导委员会专科组 1977 年沧州会议通过的《水力学》课程教学基本要求,按 80 学时编写的。

本书以专业培养目标为依据,结合专业特点,注重专科特色,在章节编排、内容选取和文字阐述等方面注意突出了以下特点:根据实用选材,理论联系实际;基本原理简明扼要、深入浅出;强化基本概念的理解和基本原理的应用,弱化或删除基本原理的数理论证过程和与专业关系不大的内容;书中名词术语和技术参数符合国家规范标准;每章都有所侧重地安排了适当的典型例题、思考题和习题。同时,为便于自学,书末附有各章习题的参考答案。

本书由长春建筑高等专科学校龙北生(第一、二、三、四、六、十一章及全部习题参考答案)、蒋维卿(第五、七、八章)和武汉科技大学韩进能(第九、十章)合编。书中大部分插图由长春建筑高等专科学校王莹绘制。全书由长春建筑高等专科学校龙北生主编。

本书由武汉科技大学许玉望教授主审;武汉水利电力大学刘忠潮教授对初稿进行了仔细审阅和修改,提出了许多宝贵意见;全国高等学校给水排水工程学科专业指导委员会专科组对初稿作了认真的评审;编写过程中,得到了长春建筑高等专科学校刘自放、张文华、武汉科技大学邵林广等老师及其他兄弟院校的专家、学者的大力协助。在此,谨向他们表示衷心感谢。

由于时间仓促及编者水平有限,加之本书作为全国高等学校给水排水工程专业专科系列教材的首次编写,不妥之处在所难免,恳请使用本书的师生及其他读者批评指正。

第一章 绪 论

第一节 水力学的任务

水力学是研究液体平衡和运动的力学规律及其在工程中应用的科学。它是力学的一个分支,属于技术科学范畴。水力学研究的主要对象是以水为代表的液体,但其基本规律也同样适用于可忽略压缩性影响的气体。

水力学的基本内容可分为水静力学和水动力学两大部分。水静力学主要研究液体处于静止或相对平衡状态下的力学规律及其应用,如静止液体中某一作用点压强和某一作用面压力的计算等问题;水动力学主要研究液体处于运动状态下的力学规律及其应用,如管流、明渠流、堰流的计算等问题。因为静止是运动速度为零的一种特殊运动,所以水静力学规律和水动力学规律的关系也是“特殊性”与“一般性”的关系,前者包含在后者之中。

水力学和其他科学一样,是人类在不断征服自然的长期斗争中逐渐建立和发展起来的。水力学在工农业生产的各个部门有着广泛的应用,它是水利、环境、给水排水、道路桥梁、石油开采和动力机械等工程的重要基础理论之一。

在给水排水工程专业中,水力学是一门极为重要的技术基础课程。在给水与排水管渠的设计、给水与污水废水处理构筑物的设计和给水与排水系统的运行管理等过程中,都会遇到一系列的水力学问题。只有学好水力学课程,才能正确地解决工程中所遇到的水力学方面的设计计算、运行管理与测试等问题。

在学习水力学过程中,要注重基本概念、基本原理和基本方法的理解与掌握,注重水力计算和实验研究基本技能的培养,学会理论联系实际地分析和解决工程实际中的水力学问题。

本书主要采用国际单位制。国际单位制在我国采用时间不长,在此之前,长期使用的是工程单位制,目前许多技术资料的物理量参数仍为工程单位制。因此,学习者必须注意这两种单位的换算,书后附录 I 给出了常用力学量两种单位制的换算表。

第二节 液体和连续介质模型

一、液体的基本特征

物质通常有三种存在形式,即固体、液体和气体。由于它们的微观分子结构和分子力性质不同,它们的宏观性状也各不相同。液体的宏观性状介于固体与气体之间。

宏观地说,固体和液体都能保持一定的体积,很难被压缩,但液体易流动,其形状随盛装容器的形状而变化,而固体则能够保持一定的形状。这是由于它们所能承受的应力状态不同造成的。液体几乎不能承受拉应力,只能抵抗压应力,静止的液体也不能承受切应力,它在微小切应力的作用下,便很容易发生连续变形或流动;而固体既能承受一定的拉应力和压

应力,也能承受一定的切应力,它具有一定的维持其自身固有形状的能力。

气体和液体都易流动,因此将它们统称为流体。它们的共同点是易流动性,这使得它们都没有固定的形状,而随盛装容器的形状而变化。它们的不同点是压缩性,液体很难被压缩,有自身固定的体积,当盛装容器的体积大于液体自身体积时,液体不能充满容器,而会在容器中形成一个自由表面;气体则很容易被压缩,没有固定的体积,能够充满整个盛装容器,不存在自由表面。

所以,液体的基本特征是具有易流动性和不易被压缩性,并可以有自由表面。

二、连续介质模型

液体同其他物质一样,是由大量分子组成的。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,导致了描述液体状态的物理量(如流速、压强、密度等)在空间和时间上也是不连续变化的,这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,即研究液体大量分子的统计平均效应,并不关心个别分子的微观运动,而且液体分子的间隙与一般工程中所研究的液体几何尺寸相比是极其微不足道的。因此,1753年瑞士数学家欧拉提出了连续介质的基本假设:认为液体是由无数质点组成的,这些质点毫无间隙地充满着液体所占据的全部空间。这里所说的“质点”,从微观上看,是一个包含大量分子的液体微团;从宏观上看,又是一个有一定质量而无空间尺寸的几何点。这就是对液体的真实结构进行抽象化了的连续介质模型。采用这一模型,摆脱了因分子结构和分子热运动所产生的各种复杂性,使描述液体状态的物理量都变为空间和时间的连续函数,从而能够充分利用连续函数这一有力的工具来研究液体宏观运动的力学规律。

实践证明,连续介质模型对于绝大多数的液体问题和一般的气体问题都是足够合理的。只有当所研究的区域小到与分子的大小处于同一数量级,或者在很稀薄的气体中和当液体性质有局部突变时,连续介质的模型就不再适用了。

在连续介质模型的基础上,一般可以认为液体具有均匀性和各向同性,即液体是均匀的,其各部分和各方向上的物理性质都一样。

第三节 液体的主要物理力学性质

液体的运动状态和力学规律,除与液体的外部因素有关外,更主要是取决于液体本身的物理力学性质。因此,在研究液体平衡和运动之前,首先应了解液体的主要物理力学性质。

一、密度与容重

单位体积液体所具有的质量称为液体的密度,以 ρ 表示。它反映了液体的质量属性。

对于质量为 M 、体积为 V 的均质液体,其密度可表示为:

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

密度的国际单位为 kg/m^3 。

单位体积液体所具有的重量称为液体的容重,以 γ 表示。它反映了液体的重力属性。

对于重量 G 、体积为 V 的均质液体,其容重可表示为:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

容重的国际单位为 N/m^3 或 kN/m^3 。

根据重力与重力加速度的关系可以推得,密度与容重的关系为:

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中 g ——重力加速度,其值与地球纬度有关,一般可视为常数,本书中采用 9.8m/s^2 。

一般情况下,液体的密度随温度和压强变化甚微,重力加速度又可视为常数,故液体的密度和容重在实用中通常取为常数。例如,常温下水的密度通常取为 1000kg/m^3 ,相应的容重为 9800N/m^3 。一些常见流体的实用容重见表 1-1。

常见流体的容重(标准大气压下)

表 1-1

名 称	水	水 银	汽 油	酒 精	四氯化碳	海 水	空 气
容重(N/m^3)	9800	133280	6664~7350	7778.3	15600	9996~10084	11.82
测定温度($^{\circ}\text{C}$)	4	0	15	15	20	15	20

二、压缩性与膨胀性

前面已讲到,在实用中液体的密度通常可取为常数。但当液体处在温度或压强变化很大的状态下时,其密度取值就要考虑到温度和压强变化的影响。这是由于液体的体积随着温度和压强的变化而产生了一定变化的原故。这种变化规律通常是:液体的压强增加,体积缩小,密度增加;液体的温度增加,体积膨胀,密度减小^①。这种属性就是液体的压缩性(又叫弹性)和膨胀性。

1. 压缩性

液体的压缩性通常用体积压缩系数 β 或弹性模量 K 来表示。

体积压缩系数 β 是当温度保持不变时,液体体积的相对缩小值 dV/V (或密度的相对增加值 $d\rho/\rho$) 与液体压强的增加值 dp 之比,即:

$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1-4a)$$

或

$$\beta = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad (1-4b)$$

因压强的变化量 dp 与体积的变化量 dV 符号始终相反,为使 β 为正值,故在式(1-4a)前加一负号。 β 值愈小,说明液体愈不易被压缩。

弹性模量 K 是体积压缩系数 β 的倒数,即:

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{dp}{dV/V} = \frac{dp}{d\rho/\rho} \quad (1-5)$$

显然, K 值愈大,液体愈不易被压缩。工程中常用 K 来衡量液体压缩性的大小。

国际单位制中, β 的单位为 Pa^{-1} , K 的单位为 Pa 。

液体的 β 值或 K 值与液体种类有关,同一种液体的 β 值或 K 值还随温度和压强的不同而变化,但这种变化不大,一般可视为常数。

不可压缩的液体是不存在的,但液体的压缩性一般都很小。例如,在 $0\sim 100$ 个大气压

① 水的密度在 4°C 时最大。

范围内,水的平均 K 值约为 $2 \times 10^9 \text{Pa}$ (即 $\beta \approx 5 \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1}$)。这个数值表明,水承受的压强每增加一个大气压所引起的体积相对压缩量仅为 $\frac{1}{20000}$,数值非常小。所以,液体在通常情况下被视为是不可压缩的,即认为液体的体积(或密度)与压力无关。但在瞬间压强变化很大的特殊场合(如第六章讨论的水击问题),则必须考虑水的压缩性。

2. 膨胀性

液体膨胀性通常是用体积膨胀系数 α 来表示。

体积膨胀系数 α 是当压强保持不变时,液体体积的相对膨胀值 dV/V (或密度的相对减小值 $d\rho/\rho$) 与液体温度的增加值 dT 之比,即:

$$\alpha = \frac{dV/V}{dT} \quad (1-6a)$$

或

$$\alpha = - \frac{d\rho/\rho}{dT} \quad (1-6b)$$

因温度的变化量 dT 与密度的变化量 $d\rho$ 符号始终相反(特殊情况除外),为使 α 为正值,故在式(1-6b)前加一负号。 α 值愈小,则液体的膨胀性也愈小。 α 的单位为 K^{-1} (或 $^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

液体的 α 值与液体的种类有关,同一种液体的 α 值还随着温度和压强的不同有所变化。但总体上讲,液体的膨胀系数 α 不大,即膨胀性不大。例如,水在一个大气压下, $10 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 时的 α 值可近似取为 $1.5 \times 10^{-4} ^{\circ}\text{C}^{-1}$, $90 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 时的 α 值可近似取为 $7.19 \times 10^{-4} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。这意味着在这两种情况下,水的温度每升高一度时,其体积(或密度)的相对变化量仅分别为 0.015% 和 0.0719% 。所以,在温度变化不大时,可忽略液体的膨胀性,认为液体的体积(或密度)与温度无关。但当所研究液体的温度变化很大时,如在热力管道的设计计算中,则必须考虑液体的膨胀性,而不能将其密度视为常数。纯水在不同温度时的密度和容重见表1-2。

不同温度时水的密度和容重(标准大气压下)

表 1-2

温度($^{\circ}\text{C}$)	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100
密度(kg/m^3)	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38
容重(N/m^3)	9798.73	9800.00	9797.35	9782.65	9757.57	9723.95	9683.09	9635.75	9523.94	9392.12

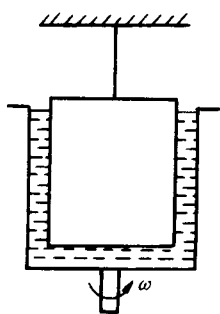


图 1-1

三、粘滞性

首先观察一个简单的实验。如图 1-1 所示,在固定的扭丝下悬挂一个圆筒,其外面放置一个能绕铅直轴旋转的圆筒形容器,在内、外圆筒的间隙中充以某种液体,如水或油等。当外筒旋转时,可以发现内筒也随之产生同方向的扭转,并且其扭转角度随外筒旋转速度而变化。当外筒转速一定时,内筒将平衡在一定的扭转角度上,外筒停止转动时,内筒将随之恢复到原来的位置上。

这个实验表明,附着于内筒和旋转的外筒壁上的液体之间存在着一种彼此阻碍对方运动趋势的作用。更多的实验现象表明,当液体质点间出现相对运动时,在液层间就会产生内摩擦力来抵抗这种相对运动。液体内部的这种抵抗液体质点间相对运动的性质称为液体的粘滞性,相应产生的内摩

擦力,又叫粘滞性阻力。

所有实际液体都具有一定的粘滞性,它是液体的固有属性,是流动液体产生机械能损失的根源。

下面,进一步讨论内摩擦力的规律。

图 1-2 是当液体沿着很宽的顺直渠道作缓慢流动时,在渠道中部沿渠底壁面外法线方向 y 上的流速分布情况。由于液体粘滞性的作用,在紧贴渠底壁面的液层中,液体质点的流速为零;在渠底以上的各液层中,液体质点是呈相互牵连的,流速各不相同,离渠底愈远的质点,受渠底壁面上不动质点的影响愈小,流速相应愈大。这样,就形成了图 1-2 中所示的液面质点流速最大,向渠底流速逐渐减小的流速分布曲线。相邻各液层间质点的相对运动强度,可用流速在其垂直方向上的变化率,即流速梯度 du/dy 来表示。

不同流速的流层一经形成,在任意相邻流层的接触面上就会产生一对等值反向的内摩擦力 T 和 T' ,它们的方向总是与相邻流层间的相对运动方向相反,以阻碍相邻流层间的相对运动,如图 1-2 所示。图中流速为 $u + du$ 的较快流层,所受到的内摩擦力 T 的方向与流动方向相反,起到减缓快层运动的作用;流速为 u 的较慢流层,所受到的内摩擦力 T' 的方向与流动方向相同,起到加快慢层运动的作用。

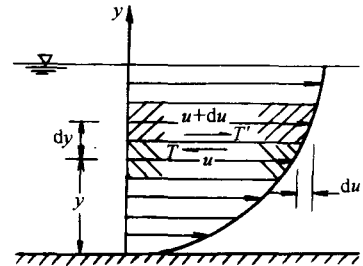


图 1-2

可见,液体的粘滞性一方面引起了液体质点的分层运动,另一方面又企图阻滞液体质点的分层运动。

1686 年牛顿首先提出,后经实验证明:液体作层流运动时(层流的概念见第四章),液层间内摩擦力 T 的大小与液体的粘滞性有关,并与液层间的流速梯度 du/dy 和接触面积 A 成正比,与接触面积上的压力无关,这一规律称为牛顿内摩擦定律。即:

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

或:

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

式中 τ ——单位面积上的内摩擦力,称为粘滞性切应力,其国际单位为 Pa;

μ ——反映液体粘滞性大小的参数,因其具有动力学量的量纲,故称为动力粘滞系数,其国际单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

由式(1-8)可以看出,当 $du/dy = 0$ 时, $\tau = 0$ 。即当液层间处于相对静止(液体质点间无相对运动)时,液体中不出现内摩擦力。这就是说,液体的粘滞性只有在液层间有相对运动时才显示出来,对静止或相对平衡的液体不显示粘滞性。

在实用中,液体的粘滞性还常用液体的动力粘滞系数 μ 与液体的密度 ρ 的比值 ν 来表示,即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

式中 ν ——具有运动学量的量纲,故称为运动粘滞系数,其国际单位为 m^2/s ,也常用 cm^2/s 表示。

μ 和 ν 都是反映液体粘滞性属性的参数,故也常将它们统称为粘滞系数。 μ 或 ν 值愈

大,表明液体的粘滞性愈强。

μ 或 ν 与液体种类有关,同一种液体的 μ 或 ν 值还随液体的温度和压强不同而异。但一般情况下,压强对 μ 或 ν 的影响很小,可以忽略。温度则是影响 μ 或 ν 的主要因素,温度升高,液体的 μ 或 ν 值减小,即粘滞性减小。但气体的粘滞性是随着温度的升高而增强的,这是由于液体和气体的内摩擦机理不同所致。

在常压下,水的 ν 值与温度 t 的关系可用下列经验公式计算:

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-10)$$

式中 t ——水温,℃;

ν ——液体运动粘滞系数,cm²/s。

为使用方便,在表 1-3 中列出了水在不同温度时的粘滞系数值。

不同温度时水的粘滞系数

表 1-3

温度(℃)	0	2	4	6	8	10	12	14
μ (Pa·s)	1.792×10^{-3}	1.673×10^{-3}	1.567×10^{-3}	1.473×10^{-3}	1.386×10^{-3}	1.308×10^{-3}	1.236×10^{-3}	1.171×10^{-3}
ν (m ² /s)	1.792×10^{-6}	1.673×10^{-6}	1.567×10^{-6}	1.473×10^{-6}	1.386×10^{-6}	1.308×10^{-6}	1.237×10^{-6}	1.171×10^{-6}
温度(℃)	16	18	20	22	24	26	28	30
μ (Pa·s)	1.111×10^{-3}	1.056×10^{-3}	1.005×10^{-3}	0.958×10^{-3}	0.914×10^{-3}	0.874×10^{-3}	0.836×10^{-3}	0.801×10^{-3}
ν (m ² /s)	1.112×10^{-6}	1.057×10^{-6}	1.007×10^{-6}	0.960×10^{-6}	0.917×10^{-6}	0.877×10^{-6}	0.839×10^{-6}	0.804×10^{-6}
温度(℃)	35	40	45	50	60	70	80	90
μ (Pa·s)	0.723×10^{-3}	0.656×10^{-3}	0.599×10^{-3}	0.549×10^{-3}	0.469×10^{-3}	0.406×10^{-3}	0.357×10^{-3}	0.317×10^{-3}
ν (m ² /s)	0.727×10^{-6}	0.661×10^{-6}	0.605×10^{-6}	0.556×10^{-6}	0.477×10^{-6}	0.415×10^{-6}	0.367×10^{-6}	0.328×10^{-6}

需要指出,上述牛顿内摩擦定律只适用于一般液体,对于某些特殊液体是不适用的。满足牛顿内摩擦定律的液体称为牛顿液体,如水、乙醇、水银及某些油类等;不满足牛顿内摩擦定律的液体称为非牛顿液体,如泥浆、橡胶、油漆、血浆等。本书只讨论牛顿液体。

所有实际液体都具有一定的粘滞性,所以又称实际液体为粘性液体。由于粘滞性的存在,对液体运动的研究变得复杂化。为使所讨论的问题得以简化,便于理论分析,常常先忽略液体的粘滞性,待得出研究结论后,再将其进行必要的修正,以应用于实际液体。这种忽略粘滞性的理想化液体称为理想液体。理想液体实际上不存在,它只是一种简化了的理想力学模型。

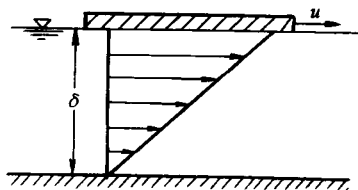


图 1-3

【例 1-1】如图 1-3,将一面积 $A = 1\text{m}^2$ 的平板放入盛水的槽中。若平板在水面上以 $u = 1\text{m/s}$ 的速度沿水平方向运动,平板与槽底之间的距离 $\delta = 1\text{mm}$,假设水层内流速按直线分布。试求当水温 $t = 10^\circ\text{C}$ 时,平板所受到的阻力 T 。

【解】由于水层内流速按直线分布,则流速梯度 $\frac{du}{dt}$ = 常数。查表 1-3, $t = 10^\circ\text{C}$ 时, $\mu = 1.308 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。故应用式(1-7)得平板受到的阻力为:

$$T = \mu A \frac{du}{dy} = 1.308 \times 10^{-3} \times \frac{1}{0.001} = 1.308 \text{ N}$$

四、表面张力

日常生活中,常常能看到水滴附着在玻璃上或悬挂在水龙头出口上、水银在平滑表面上呈球形滚动等现象。这些现象表明,液体自由表面有明显地欲收缩为球形的趋势。引起这种收缩趋势的力称为液体的表面张力。

表面张力不仅存在于液体的自由表面,也存在于两种不同液体和液体与固体的分界面上。它是由于处在液体表面上的液体分子所受到的内外分子引力作用不平衡而引起的一种宏观效果。表面张力的作用方向与液体表面相切,它仿佛像一张拉紧的“薄膜网”作用在液体的表面,并试图使液体表面收缩为最小。

表面张力的大小可以用表面张力系数来度量。设想在液体表面画一条截线,则截线两侧的液面存在着相互的拉力(即此处的表面张力)作用,它垂直于该截线并与液面相切。表面张力系数就是作用于液面上单位长度假想截线的表面张力,以 σ 表示,其国际单位为 N/m 。 σ 的大小随液体的种类、温度及表面的接触情况而异。例如,20℃时,与空气接触的水和水银的表面张力系数分别为 0.074 N/m 和 0.54 N/m 。

表面张力仅存在于液体的表面,在液体内部不存在。所以,表面张力是液体的一种局部受力现象。由于表面张力很小,一般对液体的宏观运动不产生影响,可以忽略不计。只有当液体表面为曲面,且曲率半径很小时,才考虑它的影响。

毛细现象就是表面张力现象较明显的例子。将一根两端开口的细玻璃管插入液体中,在液体表面张力和重力的共同作用下,可引起玻璃管中的液面弯曲,并使液体在玻璃管中出现相对上升或下降的现象,这种现象称为毛细现象,如图 1-4 所示。能引起毛细现象的细管称为毛细管。

液体在毛细管内是上升还是下降,取决于液体分子与管壁分子间的附着力和液体分子间的相互吸引力(即内聚力)的相对大小关系(这是液体与固体接触的表面张力问题)。当液、固间的附着力大于液体的内聚力时,液体将附着于固体壁面,并沿固体壁面向外伸展,使液面呈凹形弯月面。这时,由于表面张力的作用,液面又力图上凸成平面(因为表面张力总试图使液面收缩为最小)。二者作用的结果将使液体沿

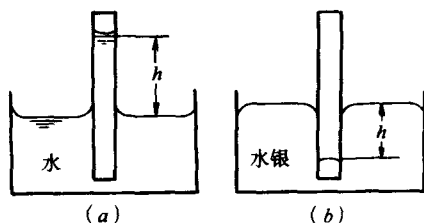


图 1-4

毛细管上升,直到上升液柱的重力与表面张力向上的竖直分量平衡为止。细玻璃管插入水中时就是这种情况,如图 1-4(a)所示。当液、固间的附着力小于液体的内聚力时,液体将不附着于固体壁面,并沿固体壁面向内收缩,结果与上述情况相反,液面呈凸形弯月面,并使液体在毛细管中相对下降一定的高度。细玻璃管插入水银时就是这种情况,如图 1-4(b)所示。

20℃时,水在玻璃管中的相对上升高度 h 约为:

$$h = \frac{29.8}{d} \quad (1-11)$$

水银在玻璃管中的相对下降高度 h 约为:

$$h = \frac{10.15}{d} \quad (1-12)$$

式中 d ——玻璃管内径,mm;

h ——玻璃管中液面的相对上升或下降高度,mm。

由以上二式可知,玻璃管内径 d 愈小,管内、外液面的相对差值 h 就愈大。因此,为减小误差,实验室用的测压管内径一般不小于 10mm。

五、汽化压强

液体分子具有一定的动能,这一动能总是试图使其离开液体的自由表面,使液体汽化为蒸气。这样宏观上,在液体的自由表面就会存在一种向外扩张的压强(压力),这种压强就称为汽化压强(或汽化压力)。液体的汽化压强是液体内部分子动能大小在外界的一种宏观表现,所以它将随着液体温度的升高而增大。水的汽化压强与温度的关系见表 1-4。

水的汽化压强(饱和蒸气压)

表 1-4

水温(℃)	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
汽化压强(kPa)	0.61	0.87	1.23	1.70	2.34	3.17	4.24	7.38	12.33	19.92	31.16	47.34	70.10	101.33

汽化压强是液体的固有属性,与液体的种类有关。一些常见液体在 20℃ 时的汽化压强值见表 1-5。

一些液体在 20℃ 时的汽化压强(饱和蒸气压)

表 1-5

液体种类	水	水银	四氯化碳	煤油	汽油
汽化压强(kPa)	2.34	0.00017	12.1	3.2	55

因为液体在某一温度下的汽化压强与液体在该温度下的饱和蒸气所具有的压强对应相等,所以液体的汽化压强又称为液体的饱和蒸气压。

当把液体的外界压强减小到汽化压强,或将液体自身的温度升高,使其汽化压强增大到外界压强时,液体将产生沸腾。液体沸腾时所具有的温度称为液体对应于外界压强下的沸点。此时的外界压强就等于液体在该沸点温度下的饱和蒸气压。液体的沸点与液体的种类有关,同种液体的沸点随外界压强的减小而降低。例如,水在 101.33kPa(一个标准大气压)时的沸点是 100℃,在 2.34kPa(0.023 个标准大气压)时的沸点是 20℃。

在常温下,当流动液体某处的压强等于或低于液体温度下的汽化压强时,该处液体将产生沸腾而出现许多气泡,这种现象称为冷沸。冷沸现象会使液体流动的连续被破坏,影响管道的输水效果。若冷沸现象长期出现,还会对固体壁面造成不良影响(如水泵叶片的气蚀现象等)。所以工程实际中,必须避免这种现象的发生。

综上所述,从水力学观点看,液体是一种易于流动、不易压缩、不易膨胀、具有一定粘滞性、均质各向同性的连续介质。在特殊情况下,还需要考虑液体的不连续性、压缩性、膨胀性、表面张力和汽化压强等特性。

第四节 作用在液体上的力

液体无论处于何种运动状态均受到一定力的作用,液体的受力情况是决定液体运动状

态的重要外部因素。作用于液体上的力,按其物理学性质可分为重力、弹性力、摩擦力、表面张力和惯性力等。按这些力的作用方式,又可将它们划分为质量力和表面力两大类。

一、质量力

质量力是作用在液体每个质点上的力,其大小与液体的质量成正比。在均质液体中,质量力又与液体体积成正比,故又称其为体积力。水力学中常出现的质量力有重力和惯性力。重力是最常见的一种质量力,它在地球表面处处存在。

对于惯性力,需要作一些说明。惯性力是在非惯性参照系中讨论力学问题时,为使牛顿定律得以成立而引入的一种作用在质点上的虚构力。这种虚构力只相对非惯性参照系有意义,在惯性参照系中不存在。水力学描述液体运动时,通常以液体的固体边界为参照系。这时,当固体边界相对地面静止或作匀速直线运动(即固体边界为惯性参照系)时,不管液体质点相对固体边界如何运动,作用在液体质点上的质量力只有重力;而当固体边界相对地面作变速运动(即固体边界为非惯性参照系)时,不管液体质点相对固体边界如何运动,作用在液体质点上的质量力除重力外,还有惯性力。在水力学中,有时也将参照系建立在运动的液体上。这时,只要液体质点相对地面作变速运动,液体质点就会受到惯性力作用,这也就是达兰贝尔的动静法。

质量力常用单位质量力来表示。若某均质液体的质量为 m ,所受的质量力为 F ,则单位质量力 f 为:

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

设 F 在三个空间坐标轴上的分量分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ,则 f 在相应的三个坐标轴上的分量 X 、 Y 、 Z 分别可表示为:

$$X = \frac{F_x}{m}, \quad Y = \frac{F_y}{m}, \quad Z = \frac{F_z}{m} \quad (1-14)$$

单位质量力的单位与加速度单位相同,即 m/s^2 。

二、表面力

表面力是作用在液体表面上的力,它随着受力表面面积的增大而增大。

表面力可以是作用在液体边界上的外力,如液体自由表面受到的大气压力,固体边界对液体的反作用力和摩擦力等。在一定条件下,表面力也可以是液体内部各部分之间相互作用的内力。内力在液体的内部是相互平衡的,但当从液体中取出一部分作为隔离体进行研究时,作用在这个隔离体表面上的内力就转变成外力了。例如,液流中两液层之间的内摩擦力,对于液层之上或之下的两部分液体来说都是一种外力。

由于液体几乎不能承受拉力,可以认为,作用在液体上的表面力只可能分解为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切向力两种形式。

在液体内部,表面力的分布情况可用单位面积上的表面力,即应力来表示。单位面积上的压力称为压应力(或压强),以 p 表示;单位面积上的切向力称为切应力,以 τ 表示。若设液体作用于受力面积 ΔA 上的压力为 ΔP 、切向力为 ΔT ,则面积 ΔA 上的平均压应力为 $\bar{p} = \Delta P / \Delta A$,平均切应力为 $\bar{\tau} = \Delta T / \Delta A$ 。根据液体是连续介质的假设,当此面积 ΔA 无限缩小于一点时,该点的压应力(压强) p 和切应力 τ 分别为:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-15)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-16)$$

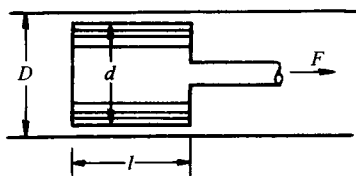
压应力(压强)和切应力的国际单位均为 Pa 或 kPa 和 MPa。

思 考 题

- 1-1 从应力的角度分析,液体与固体和气体有哪些共同点和不同点。
- 1-2 连续介质模型是怎么回事?在连续介质中,液体质点的含义是什么?连续介质模型对液体运动的研究有何意义?
- 1-3 液体的压缩性与膨胀性用什么来表示?它们对液体的密度和容重有何影响?在水力计算中,一般认为液体的密度和容重为常数的依据何在?
- 1-4 何谓液体的粘滞性?它对液体运动有何影响?什么叫牛顿液体和非牛顿液体?
- 1-5 什么叫理想液体?引入理想液体的概念对液体运动的研究有何意义?
- 1-6 液体在毛细管中为什么会产生毛细现象?毛细现象与毛细管直径有什么关系?
- 1-7 液体汽化压强的大小与液体的温度和外界压强有无关系?根据液体的汽化压强特性,液流在什么条件下会产生不利因素?
- 1-8 如何理解惯性力的概念?能否说相对地面作加速运动的液体质点一定受到惯性力的作用?
- 1-9 说出在哪些特殊情况下,需要考虑水的不连续性、压缩性、膨胀性、表面张力特性和汽化压强特性。

习 题

- 1-1 已知 0.5m^3 油的质量 $M=430\text{kg}$,试求其密度和容重。
- 1-2 20°C 、 2.5m^3 的水,当温度升至 80°C 时,其体积的相对增加值为多少?
- 1-3 水的弹性模量为 $1.962 \times 10^9\text{Pa}$,试问压强改变多少时,它的体积相对压缩 1%?
- 1-4 在长度为 $l=200\text{m}$ 、直径 $d=400\text{mm}$ 的输水管道中作压水试验,当管中压强增加至 5390kPa 后停止加压,经过 1h 后,管中压强降至 4900kPa 。若不计管道变形,问在上述试验过程中经管道漏缝流出的水量平均为多少 m^3/s ? (取水的体积压缩系数 $\beta=5.0 \times 10^{-10}\text{Pa}^{-1}$)
- 1-5 体积为 5m^3 的水,在温度不变的条件下,压强从 1 个大气压强(即 $9.8 \times 10^4\text{Pa}$)增加到 5 个大气压强,体积减小了 0.001m^3 。试求水的体积压缩系数 β 和弹性模量 K 。



题 1-6 图

- 1-6 如图所示,一直径 $d=11.96\text{cm}$ 、长度 $l=14\text{cm}$ 的活塞,在一直径 $D=12\text{cm}$ 的活塞筒内运动。活塞与筒之间充以润滑油,若润滑油的动力粘滞系数 $\mu=0.172\text{Pa}\cdot\text{s}$,问需对活塞施加多大的力 F ,才能使活塞以 1m/s 的速度作匀速运动?

第二章 水 静 力 学

水静力学主要研究液体处于静止和相对平衡状态下的力学规律及其在工程实际中的应用。这里所说的静止状态是指液体与地面间无相对运动的状态;相对平衡状态是指液体与地面间有相对运动,但液体内部质点之间及液体与容器之间均无相对运动的状态,这种状态也称为相对静止状态。

显然,处于静止或相对平衡状态的液体是不显示粘滞性的,液体内部质点之间及液体与容器之间的相互作用都是以压力的形式表现的。所以,水静力学的任务实质就是研究处于这两种状态下液体内部压强的分布规律以及利用这些规律解决液体中某一作用点的压强和某一作用面的压力计算问题。在不需要加以区分时,人们常将处于静止和相对平衡状态的液体统称为平衡液体。

第一节 静水压强及其特性

一、静水压力与静水压强

在生产和生活实践中,我们知道液体对与之接触的表面一般都会产生一种压力的作用。如图 2-1,在引水涵洞进口处设置了平板闸门,当开启闸门时,需要一定的拉力,其主要原因除闸门自身的重力外,还有水对闸门作用了一定的压力。液体不仅对与之相接触的固体边界作用有压力,在液体内部相邻的两部分液体之间也相互作用有压力。静止或相对平衡液体作用在与之接触的表面上的压力称为静水压力(也称为静水总压力),以 P 表示,其国际单位为 N 或 kN 。

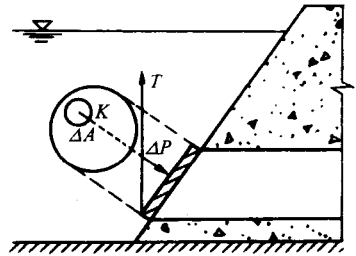


图 2-1

在绪论中已明确了压应力(压强)的概念。静水压强就是作用在单位面积上的静水压力,以 p 表示,前已介绍,其国际单位为 Pa 或 kPa 和 MPa 。在图 2-1 所示的平板闸门上,围绕某任一点 K 取一小面积 ΔA ,设作用在 ΔA 上的静水压力为 ΔP ,则 ΔA 面积上的平均静水压强 $\bar{p}$ 为:

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2-1)$$

$\bar{p}$ 代表了静水压强在 ΔA 面积上的平均值。当 ΔA 无限缩小至 K 点时,这一极限状态的平均静水压强就是平衡液体在 K 点的静水压强,即:

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

二、静水压强的特性

因为液体几乎不能承受拉应力,平衡液体也不能承受切应力(否则液体将产生流动),所

以,在平衡液体中只有垂直并指向作用面的压应力,即静水压强。

静水压强的特性是:平衡液体中,任一点静水压强的大小与受压面的方位无关,或者说平衡液体中,在同一点处各个方向上的静水压强值都相等。

在平衡液体中的任一点上,可以有无数方位的假想作用面,这也就是说,该点的静水压强有无数个作用方位。静水压强特性的含义就是作用在这无数不同方位上的静水压强值相等。现证明如下:

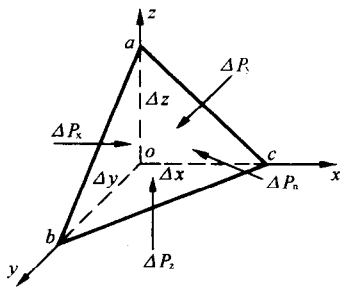


图 2-2

在平衡液体中任取一点 o , 以 o 为原点建立直角坐标系, 并在直角坐标系上取包括原点 o 在内的小四面体 $oabc$, 其与坐标轴重合的三个边长分别为 Δx 、 Δy 、 Δz , 如图 2-2 所示。现以该四面体为隔离体分析其受力情况和平衡条件。

分析液体的受力情况可从表面力和质量力两方面进行。

该四面体受到的表面力就是作用在四面体四个小面积上的静水压力。设四面体的四个表面 oab 、 oac 、 obc 和 abc 的面积分别为 ΔA_x 、 ΔA_y 、 ΔA_z 和 ΔA_n , 它们上面所受到的静水压力分别为 ΔP_x 、 ΔP_y 、 ΔP_z 和 ΔP_n 。

由几何学可知, 该四面体体积为 $\frac{1}{6} \Delta x \Delta y \Delta z$ 。设四面体的单位质量力在 x 、 y 、 z 三轴方向的分量分别为 X 、 Y 、 Z , 则该四面体上的质量力沿三个坐标轴方向上的分量分别为:

$$F_x = \frac{1}{6} \rho \Delta x \Delta y \Delta z \cdot X$$

$$F_y = \frac{1}{6} \rho \Delta x \Delta y \Delta z \cdot Y$$

$$F_z = \frac{1}{6} \rho \Delta x \Delta y \Delta z \cdot Z$$

该四面体处于平衡状态, 按平衡条件, 作用在四面体上的合外力沿三个坐标轴方向的分量应为零。现以 x 轴方向为例, 其平衡方程为:

$$\Delta P_x - \Delta P_n \cos(\mathbf{n}, \mathbf{x}) + F_x = \Delta P_x - \Delta P_n \cos(\mathbf{n}, \mathbf{x}) + \frac{1}{6} \rho \Delta x \Delta y \Delta z \cdot X = 0 \quad (a)$$

式中的 $(\mathbf{n}, \mathbf{x})$ 代表斜面 abc 的外法向 $\mathbf{n}$ 与 x 轴的夹角。

$$\text{显然} \quad \Delta A_x = \Delta A_n \cos(\mathbf{n}, \mathbf{x}) = \frac{1}{2} \Delta y \Delta z$$

将(a)式各项同除以 ΔA_x , 并注意上式的关系可得:

$$\frac{\Delta P_x}{\Delta A_x} - \frac{\Delta P_n}{\Delta A_n} + \frac{1}{3} \rho \Delta x \cdot X = 0 \quad (b)$$

式中 $\frac{\Delta P_x}{\Delta A_x}$ 、 $\frac{\Delta P_n}{\Delta A_n}$ 分别为 ΔA_x 、 ΔA_n 面上的平均静水压强。当四面体无限缩小至 o 点时, (b) 式中的第三项将趋于零, 而前两项就是平衡液体在 o 点沿着 x 轴向和 ΔA_n 内法线方向上的静水压强 p_x 和 p_n , 所以可以得到:

$$p_x = p_n$$

同理, 沿 y 、 z 轴方向建立平衡方程可推得:

$$p_y = p_n, \quad p_z = p_n$$

故：

$$p_x = p_y = p_z = p_n \quad (2-3)$$

因为斜面 abc 的方位是任意选取的,故式(2-3)表明,平衡液体中在同一点处各个方向上的静水压强大小都相等,从而证明了静水压强的特性。

静水压强的这一特性说明,在计算平衡液体中任一点静水压强的大小时,可以不考虑静水压强的方向,它只是位置坐标的函数,即:

$$p = p(x, y, z)$$

第二节 液体平衡微分方程

一、液体平衡微分方程

在平衡液体中任选一点 o' ,以 o' 为中心分割出一微小正六面隔离体,其各边长分别为 dx 、 dy 、 dz ,并与相应的直角坐标轴平行,如图 2-3 所示。该六面体应在所有表面力和质量力的作用下处于平衡。现分析该六面体沿 x 轴方向的受力情况。

设作用在 o' 点的静水压强为 p ,它是位置坐标的连续函数,即 $p = p(x, y, z)$ 。根据泰勒级数将 p 沿 x 轴方向展开,并略去级数中二阶以上的各项微量,可得沿 x 轴方向作用于 $abcd$ 面形心点 M 和 $a'b'c'd'$ 面形心点 N 的压强分别为:

$$p_M = p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx \quad \text{和} \quad p_N = p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx$$

所以,作用于 $abcd$ 和 $a'b'c'd'$ 两微小面上的表面力分别为:

$$p_M = \left(p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dydz \quad \text{和} \quad p_N = \left(p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dydz$$

设作用在六面体上的单位质量力沿 x 、 y 、 z 三轴方向的分量分别为 X 、 Y 、 Z ,则六面体上的质量力沿 x 轴方向的分量为:

$$\rho dx dy dz \cdot X$$

根据液体平衡条件,六面体所受到的合外力沿 x 轴方向分量应为零,即:

$$\left(p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dydz - \left(p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dydz + \rho dx dy dz \cdot X = 0$$

将上式各项同除以 $\rho dx dy dz$ 并整理得:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho X \quad (2-4a)$$

同理,沿 y 、 z 轴方向讨论可推得:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \rho Y \quad (2-4b)$$

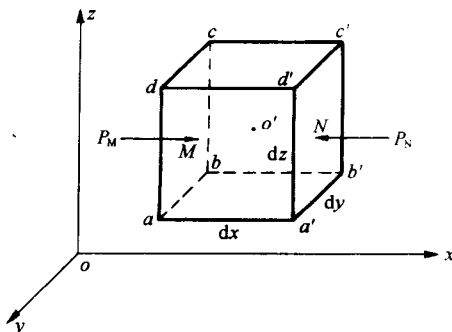


图 2-3