

高等学校(专科)试用教材

水力学及桥涵水文

Shuili xue ji Qiaohan Shui wen

(公路与城市道路、桥梁工程专业用)

叶镇国 主编

人民交通出版社

前 言

《水力学及桥涵水文》课程是高等学校路桥及交通工程专业的一门专业技术基础课,主要介绍有关基本原理与方法,为学习后继课程、拓宽专业知识面以及从事专业工作打下一定的理论基础。

水力学及桥涵水文两大内容原属两门单独的课程,二者并无严密的学科系统性;但在理论应用方面却有着密切的关系。两门课合而为一,有利于专业教学的针对性,在教学上可减少许多不必要的搭接内容。湖南大学于 70 年代末期曾自编《桥涵水力水文基础》,教学实践效果好。

水力学是力学的一个分支,属应用力学的一个部分,它研究液体机械运动规律及其应用,在路桥、水利、土木、环保、化工及液力机械等许多领域都得到了广泛的应用,是桥涵水文计算的主要理论工具。它以水为主要研究对象,故有此名。

桥涵水文属于河川水文学范畴,但具有较突出的专业应用特点,故有此名。它研究自然界中水的运行变化与河川径流的关系。所谓径流,即降落在地表的雨水沿一定路径流动的水流,流入河川并在河槽中流动的水流称为河川径流;在地下渗流的水流则称为地下径流。桥涵水文的主要研究对象是降水与河川径流间的关系,其主要任务是为路桥设计提供计算依据。但是,由于降水、径流等现象的影响因素极其复杂,它们在数值大小及发生时间方面均表现出一定的随机特征。因此桥涵水文的计算理论除了水力学理论外,还需引用数理统计方法,按水文现象(降水、径流、蒸发等的统称)概率分析所得的未来水文趋势选定设计依据,并按此作有关的水力计算。水力学的计算依据由桥涵水文提供,桥涵水文为路桥专业设计提供的依据靠水力学理论计算,这便是二者的内在关系。

本教材系根据 1991 年 11 月高等学校路桥及交通工程专业教材编审委员会(现名为高等学校路桥及交通工程专业教学指导委员会)三届四次会议通过的最新编写大纲编写的,内容加强了课程理论体系的科学性与专业针对性。考虑本教材为专科教材,在编排上作了难点分散,增多了有关工程问题的计算范例,并附有一定数量的思考题与习题,以利于教学。书中用小号字排版的内容,供各校按具体情况选讲或作学生的课外参阅材料。此外,还加强了小桥涵勘测设计原理的阐述。

本书分上、下两篇共十四章。全书由湖南大学叶镇国教授主编,东南大学闻德荪教授主审。其中第一章至第八章由湖南大学叶镇国教授编写,第九、十一章由南京交通高等专科学校郑天恩副教授编写,第十、十二章由湖南大学唐叔梅副教授编写,第十三、十四章由济南交通高等专科学校黄兆庚讲师编写。

限于编者水平,书中如有欠妥之处,敬希使用本书的师生及广大读者指正。

编 者

1994 年 7 月

内 容 简 介

本书为高等学校路桥专业专科全国统编教材,也可作为非水利类有关专业的教材或专业技术人员的参考用书。

全书分上、下两篇共十四章。上篇水力学,内容包括:绪论、水静力学、水动力学基础、水流阻力与水头损失、明渠均匀流、明渠非均匀流、堰流及泄水建筑物下游的消能、渗流等;下篇桥涵水文,内容包括:河流概论、水文统计的基本原理与方法、桥涵设计流量推算、大中桥勘测设计、桥梁墩台冲刷计算与调治构造物、小桥涵勘测设计等。

高等学校(专科)试用教材
水力学及桥涵水文
(公路与城市道路、桥梁工程专业用)

叶镇国 主编

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街 10 号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京顺义牛栏山印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 22.75 字数: 570 千

1995 年 12 月 第 1 版

1995 年 12 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—7200 册 定价: 10.70 元

ISBN 7-114-02126-7

U·01448

目 录

上篇 水 力 学

第一章 绪论	(1)
第一节 液体的主要物理性质.....	(1)
第二节 作用在液体上的力.....	(6)
* 第三节 国际单位制和工程单位制.....	(7)
习题.....	(9)
第二章 水静力学	(11)
第一节 静水压强及其特性	(11)
第二节 重力作用下静水压强分布规律	(13)
第三节 压强测量	(22)
第四节 作用在平面壁上的静水总压力	(25)
第五节 作用在曲面壁上的静水总压力	(30)
习题	(37)
第三章 水动力学基础	(41)
第一节 液体运动的两种描述方法	(41)
第二节 欧拉法的有关概念	(43)
第三节 恒定流连续性方程	(50)
第四节 恒定流理想液体元流能量方程(元流伯诺里方程)	(51)
第五节 恒定流实际液体总流能量方程(总流伯诺里方程)	(54)
第六节 恒定流实际液体总流能量方程应用示例	(59)
第七节 恒定流总流动量方程	(63)
习题	(69)
第四章 水流阻力与水头损失	(73)
第一节 水流阻力与水头损失的两种形式	(73)
第二节 两种流动型态的判别(雷诺数)	(74)
第三节 沿程水头损失计算	(77)
* 第四节 圆管层流沿程阻力系数	(79)
第五节 圆管紊流的沿程阻力系数	(80)
第六节 局部水头损失计算	(91)
第七节 短管水力计算	(94)
* 第八节 孔口与管嘴出流.....	(101)
习题.....	(103)

第五章 明渠均匀流..... (106)

第一节 明渠均匀流的水力特性..... (106)

第二节 明渠均匀流基本公式..... (108)

第三节 明渠水力最佳断面及允许流速..... (110)

第四节 梯形断面明渠均匀流水力计算的基本问题..... (117)

第五节 无压圆涵管均匀流水力计算..... (121)

第六节 复式断面明渠均匀流水力计算..... (124)

习题..... (127)

第六章 明渠非均匀流..... (128)

第一节 明渠非均匀流现象及原因..... (128)

第二节 明渠非均匀流水力特性..... (129)

第三节 临界水深及临界底坡..... (130)

第四节 明渠恒定急变流..... (136)

第五节 棱柱形渠道恒定渐变流基本微分方程..... (146)

第六节 棱柱形渠道恒定渐变流水面曲线定性分析..... (147)

第七节 明渠恒定渐变流水面曲线的计算(分段求和法)..... (150)

第八节 明渠恒定渐变流水面曲线的衔接..... (154)

习题..... (156)

第七章 堰流及泄水建筑物下游的消能..... (158)

第一节 堰流..... (158)

第二节 宽顶堰水力计算..... (162)

第三节 小桥孔径水力计算..... (169)

第四节 无压涵洞非均匀流水力计算..... (175)

第五节 泄水建筑物下游的消能计算..... (182)

习题..... (188)

* 第八章 渗流..... (190)

第一节 渗流达西定律..... (190)

第二节 无压恒定渐变渗流的浸润线..... (193)

第三节 集水廊道渗流计算..... (197)

第四节 单井的渗流计算..... (199)

习题..... (204)

下篇 桥涵水文

第九章 河流概论..... (206)

第一节 河流与流域..... (206)

第二节 河川径流..... (209)

第三节 泥沙运动..... (213)

第四节 河床演变..... (217)

第五节 水文测验及资料整理方法..... (220)

习题	(229)
第十章 水文统计的基本原理与方法	(230)
第一节 河川水文现象的特性与分析方法	(230)
第二节 水文统计基本概念	(231)
第三节 经验累积频率曲线	(234)
第四节 理论频率曲线	(237)
第五节 现行频率分析方法	(243)
第六节 抽样误差	(248)
第七节 相关分析	(250)
习题	(256)
第十一章 桥涵设计流量推算	(258)
第一节 设计流量与设计水位	(258)
第二节 利用流量观测资料推算设计流量的方法	(258)
第三节 缺乏流量观测资料时推算设计流量的方法	(260)
第四节 小流域暴雨洪峰流量的推算方法	(262)
习题	(267)
第十二章 大中桥桥位勘测设计	(268)
第一节 桥位勘测设计的基本内容	(268)
第二节 桥孔布置	(272)
第三节 桥孔长度计算	(272)
第四节 桥面中心最低标高计算	(277)
习题	(282)
第十三章 桥梁墩台冲刷计算与调治构造物	(283)
第一节 桥下一般冲刷	(283)
第二节 桥墩局部冲刷	(288)
第三节 桥下河槽最低冲刷线及墩台基底最小埋置深度	(290)
第四节 调治构造物	(291)
习题	(296)
第十四章 小桥涵勘测设计	(299)
第一节 小桥涵设计原则与要求	(299)
第二节 小桥涵勘测内容	(300)
第三节 小桥涵类型选择与布置	(306)
第四节 小桥涵孔径确定	(309)
第五节 小桥及涵洞构造	(313)
第六节 涵洞洞口加固与防护	(319)
第七节 涵洞工程量计算	(326)
习题	(335)
附录 I 梯形、矩形、圆形断面渠道中临界水深 h_k 求解图	(336)
附录 II 矩形渠道收缩断面水深及水跃共轭水深求解图	(337)
附录 III 无压圆涵管水跃共轭水深求解图	(338)

附表 1 皮尔逊 III 型曲线的离均系数 ϕ 值表 (339)

附表 2 皮尔逊 III 型曲线的模比系数 (340)

附表 3 三点适线法—— S 与 C_s 值关系表 (343)

附表 4 常用径流厚度 h 值(简化公式用) (344)

附表 5 暴雨分区各区范围 (347)

附表 6 土壤吸水类属 (348)

附表 7 植物(或洼地)滞留的径流厚度 Z 值 (349)

附表 8 折减系数 β 值 (349)

附表 9 折减系数 γ 值 (349)

附表 10 地貌系数 ψ_0 值 (350)

附表 11 折减系数 δ 值 (350)

附表 12 桥位设计河段分类表 (351)

附表 13 各类河段上桥位总体布设的一般要求 (352)

附表 14 墩型系数及桥墩计算宽度 (353)

主要参考文献..... (356)

上篇 水 力 学

第一章 绪 论

第一节 液体的主要物理性质

一、连续介质假说

水力学是一门研究液体平衡和运动规律及其工程应用的科学。建立有关水力计算理论首先需要了解液体的基本特征和主要物理性质,同时还需要为理论分析建立必要的前提条件或假说,使所研究的液体“模型”化,确保计算理论的科学性。

液体的真实结构并非毫无间隙的连续体,而是彼此之间有间隙的大量液体分子组成的一种聚集态。但从宏观角度看,这种间隙是微小的,可以认为是一种连续介质。例如,在标准状态下的每立方厘米水中,约有 3.34×10^{22} 个水分子,相邻分子的间距约为 $3.07 \times 10^{-8} \text{cm}$ 。因此,1753 年欧拉(Leonhard Euler)采用“连续介质”这一假说来研究液体的宏观运动,它是液体微观结构的简化模型。在这一假说的前提下,可以运用连续函数的数学工具研究液体的机械运动,定义液体中某点的压强、密度等物理量。对于微观上充分大,宏观上充分小的液体微团,则定义为液体质点。若知液体中某点的压强为:

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

按照连续介质的假说及连续函数的数学性质, dx 处相邻空间点处的压强可按泰勒级数展开,则有:

$$p(x \pm dx) = p(x) + p'(x)(\pm dx) + \frac{p''(x)}{2!}(\pm dx)^2 + \dots$$

式中 $p'(x)$ ——函数 p 的一阶导数;

$p''(x)$ ——函数 p 的二阶导数。

在水力学中,引用上式时,一般略去其中的高阶无穷小量,仅取前两项,即:

$$\left. \begin{aligned} p(x \pm dx) &= p(x) \pm p'(x)dx \\ p(y \pm dy) &= p(y) \pm p'(y)dy \\ p(z \pm dz) &= p(z) \pm p'(z)dz \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

由此,欧拉于 1755 年提出了欧拉液体平衡微分方程与液体运动微分方程,为研究液体运动奠定了理论基础。

二、液体的主要物理性质

力对液体的作用总是通过液体自身的物理性质来表现的。因此,分析液体平衡和运动规律,建立水力计算的基本关系式,我们还必须掌握一些液体主要物理性质的特征值。在水力学

中,常用的主要物理性质有密度、重度、粘滞性、压缩性及汽化等,现分述如下:

1. 密度和重度

单位体积液体内所具有的液体质量称为密度,常用符号 ρ 表示;单位体积液体内所具有的液体重量称为重度,常用符号 γ 表示,重度又称容重、重率。

由于液体可能是非均质的(如挟沙水流),同时,液体的密度和重度也可能随时间变化。因此,液体中 A 点的密度与重度可分别定义为:

$$\rho_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} = \rho_A(x, y, z, t)$$

$$\gamma_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} = \gamma_A(x, y, z, t)$$

式中 ρ_A, γ_A ——液体中 A 点的密度和重度;

M, G ——液体的质量和重量;

x, y, z —— A 点的坐标值。

一般认为,液体是均匀的,而且不随时间变化,因此有:

$$\rho = \frac{M}{V} \tag{1-2}$$

$$\gamma = \frac{G}{V} \tag{1-3}$$

$$\gamma = \rho g \tag{1-4}$$

式中 g ——重力加速度(本书采用 $g=9.80\text{m/s}^2$)。

记住公式(1-4),它在今后的学习中将常使用。

一般情况下,液体的密度和重度随压强和温度而发生的变化均甚微小,常视为常数。例如水的密度和重度常取一个标准大气压下温度为 4°C 时的实测值作为其密度和重度的计算值,即取:

$$\rho_{\text{水}} = 1\text{g/cm}^3 = 1000\text{kg/m}^3$$

$$\gamma_{\text{水}} = 9800\text{N/m}^3$$

在工程单位制中,水的重度取 $\gamma=1000\text{kgf/m}^3$ 。不同温度下水的密度和重度,以及几种常见流体的重度见表 1-1 和表 1-2。

不同温度下纯水的密度和重度 表 1-1

$t(^{\circ}\text{C})$	0	4	10	20	30
$\rho(\text{kg/m}^3)$	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67
$\gamma(\text{N/m}^3)$	9798.73	9800.00	9797.35	9782.65	9757.57
$t(^{\circ}\text{C})$	40	50	60	80	100
$\rho(\text{kg/m}^3)$	992.24	988.07	983.24	971.83	985.38
$\gamma(\text{N/m}^3)$	9723.95	9683.09	9635.75	9523.94	9392.12

几种常见流体的重度 γ 表 1-2

液体名称	水 银	汽 油	酒 精	四氯化碳	海 水	空 气
$t(^{\circ}\text{C})$	20	0	15	15	20	15
$\gamma(\text{N/m}^3)$	133280	6664~7350	7778.3	15600	9996~10084	11.82

从表 1-1 可以看出,水在常温下密度变化幅度很小,温度由 $0\sim 30^\circ\text{C}$ 时,其密度只减小了 0.4% ,所以工程计算中可将水的密度看作常数。但在温差较大的热水循环系统中,当水加热到

80~100℃时,其密度比 4℃时的密度可减小 2.8%~4%,此时应设膨胀接头或膨胀水箱以防止管道和容器被水胀裂。值得注意的是:当水结冰时,其体积大于同样温度下水的体积,往往给工程结构带来危害。由表 1-1 知,0℃时,水的密度 $\rho=999.87\text{kg/m}^3$,而冰的密度只有 916.7kg/m^3 ,由此得冰和水在 0℃时的体积比为:

$$\frac{V_{\text{冰}}}{V_{\text{水}}}=\frac{\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{冰}}}=\frac{999.87}{916.7}=1.0907$$

可见冰的体积比水的体积增大约 9%,故公路路基、水管、水泵及盛水容器在气温为 0℃以下时,均应考虑防冰冻措施。

2. 液体的粘滞性

液体的粘滞性简称为粘性,即液体抵抗剪切变形的能力。

1686 年,牛顿(Newton)最早通过著名的平板试验,发现了液体的粘性效应,获得了牛顿内摩擦定律。

当液体流动时,由于发生剪切变形,液体质点间存在相对运动。通过液体粘性的作用,速度大的质点可带动速度小的质点,而速度小的质点则对速度大的质点产生阻滞作用,因而在两者的分界面上会存在成对的切向力。这种切向力因存在于有相对运动的液体层面间,故称为液体内摩擦力(或粘性切力),其作用是抗拒液体内部质点作相对运动。

图 1-1 为牛顿的平板试验装置。利用这种装置,我们可以间接测得液体层间的内摩擦力。

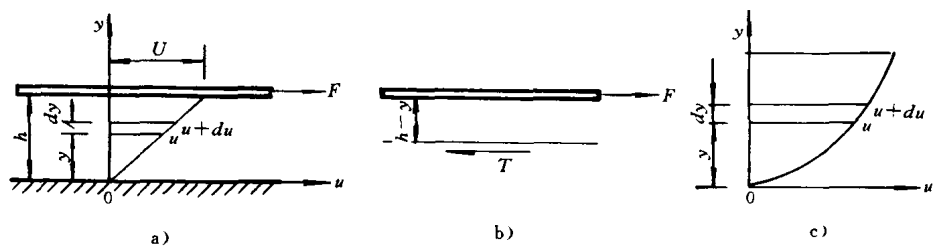


图 1-1 牛顿平板试验装置
a) 牛顿平板试验装置; b) 层间内摩擦力; c) 非线性流速分布

在图 1-1 中, h 为两平行板间的距离; A 为平板面积, 下板固定, 上板可动, 且平板面积有足够大, 可以忽略边缘对液流的影响。若对上板施加力 F , 并使上板以速度 U 保持匀速直线运动时, 显然, 作相对运动的液层间, 其内摩擦力 T 可由图 1-1b) 的隔离体在水平方向的受力情况推得, 即:

$$T = F$$

由于液体质点粘附于固体壁上, 故下板上液体质点的速度为零, 紧贴上板的液体质点速度为 U 。当 h 及 U 不太大时, 板间沿法线 y 方向的点流速 u 呈线性分布, 并可用品式(1-5)表达:

$$u(y) = \frac{U}{h}y \tag{1-5}$$

由实验得出:

$$T \propto \frac{AU}{h}$$

由式(1-5), 有:

$$\frac{U}{h} = \frac{du}{dy}$$

$$\left. \begin{aligned} T &= \mu A \frac{du}{dy} \\ \tau &= \mu \frac{du}{dy} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式中 τ ——液体内摩擦力；

$\frac{du}{dy}$ ——流速梯度，它表示流速沿 y 方向的变化率；

μ ——液体的动力粘度，又称动力粘滞系数或绝对粘度，它表示液体粘性的大小。

式(1-6)即为牛顿内摩擦定律。在水力计算中， μ 值常与密度 ρ 同时出现，为简化算式，常令：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-7)$$

式中 ν ——液体运动粘度，又称液体运动粘滞系数。

由上可知，液体粘性大小可用 μ 或 ν 表示。 μ 的国际制单位(SI)为“牛顿·秒/米²”(N·s/m²)或“帕斯卡·秒”(Pa·s)； ν 的国际制单位为“米²/秒”(m²/s)。

不同温度下的 ν 值如表 1-3 所列，也可按经验公式(1-8)计算：

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-8)$$

式中 ν ——液体温度为 t °C 时的运动粘度(cm²/s)；

t ——液体温度(°C)。

不同温度下水的运动粘度 ν 值

表 1-3

$t(^{\circ}\text{C})$	0°	2°	4°	6°	8°	10°	12°
$\nu(\text{cm}^2/\text{s})$	0.01775	0.01674	0.01568	0.01473	0.01387	0.01310	0.01239
$t(^{\circ}\text{C})$	14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°
$\nu(\text{cm}^2/\text{s})$	0.01176	0.0118	0.01062	0.01010	0.00989	0.00919	0.00877
$t(^{\circ}\text{C})$	28°	30°	35°	40°	45°	50°	60°
$\nu(\text{cm}^2/\text{s})$	0.00839	0.00803	0.00725	0.00659	0.00603	0.00556	0.00478

运动液体中的内摩擦力是引起液流机械能损失的根源，是液体分子间的动量交换和内聚力作用的结果。液体内聚力强，动量交换微弱，粘性作用主要来源于分子内聚力。因此，当液体温度升高时，其分子间距加大，内聚力减小，粘度随温度上升而减小。而气体和液体不同，气体的内聚力极小，可以忽略，其粘性作用可说是完全由分子热运动中动量交换的结果。因此，当气体温度升高时，热运动加剧，其粘度随温度升高而增加。

由式(1-6)可知：

$u=0$ 或 $u=\text{const}$ 时，

$$\frac{du}{dy} = 0, \tau = 0$$

这表明，当液体处于静止状态($u=0$)或质点间无相对运动($u=\text{const}$)时，将不出现内摩擦力。只有在运动中的液体，我们才有必要考虑液体内摩擦力的影响。

〔例 1-1〕 如图 1-2 所示，设某套筒的内径 $D=12\text{cm}$ ，活塞外径 $d=11.96\text{cm}$ ，活塞长度 $L=14\text{cm}$ ，润滑油的动力粘度 $\mu=0.172\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，试求当活塞以均匀速度 $U_0=1\text{m/s}$ 作直线往复运动时，作用于活塞上的力 F 应为多少？

解:按牛顿第二定律,当活塞作匀速直线运动时,作用于活塞上的合力应等于零,即 F 应等于活塞表面上的粘性阻力。因活塞与套筒之间的间隙 h 很小,间隙中的润滑油运动速度可以看作线性分布,即:

$$u(y) = \frac{U_0 y}{h}$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{U_0}{h}$$

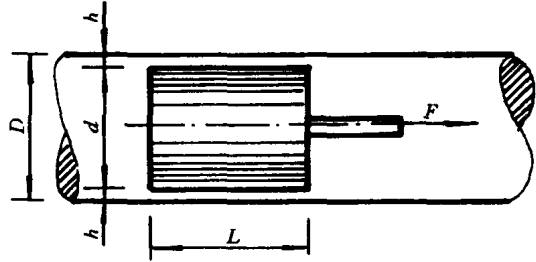


图 1-2 活塞表面的粘滞阻力计算

$$h = \frac{1}{2}(D - d) = \frac{1}{2}(12 - 11.96) = 0.02\text{cm}$$

由式(1-6)得:

$$F = \mu A \frac{U_0}{h} = 0.172 \times 10^{-4} (\pi \times 11.96 \times 14) \times \frac{100}{0.02}$$

$$= 45.2\text{N}$$

3. 液体的压缩性

在外力作用下会产生压缩变形,解除外力后又能恢复原状的特性称为压缩性,又称为弹性。

液体的压缩性和弹性常用压缩系数 β 和弹性系数 E 表示:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= -\frac{\frac{dv}{v}}{\frac{dp}{p}} = -\frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dp}{p}} \\ E &= \frac{1}{\beta} = -\frac{dP}{\frac{dV}{V}} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

式中 β ——压缩系数(m^2/N);
 E ——弹性系数(N/m^2);
 ρ ——液体密度(kg/m^3);
 V ——液体体积(m^3);
 P ——外加压强(Pa)。

β 值越大,液体越易压缩; E 值越大,则液体越不易压缩。同一种液体的 β 值和 E 值也随压强和温度而略有变化。因此,液体并不完全符合弹性体的虎克定律。式中“—”号是为使 β 和 E 保持正值所引入的,因为液体体积可随压强增大而减小; dV 与 dp 的符号相反。

液体的弹性系数都相当大。水的弹性系数 $E \approx 2.1 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$,若 $dp = 1$ 个工程大气压(1 工程大气压 $= 98\text{kPa} = 98000\text{N}/\text{m}^2$),则:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dp}{E} = \frac{-98000}{2.1 \times 10^9} \approx -\frac{1}{20000}$$

这表明此时水的体积压缩量只有两万分之一。因此,除特殊水力现象(如水中爆炸或水击问题)外,一般工程中均可忽略水的压缩性,即把水看成是不可压缩的。

气体的体积会随温度而变化,其膨胀性和压缩性比液体大得多。但如果速度不大,且压强及温度变化较小时,其体积变化亦不大,这时就可以把气体看作是是不可压缩的。

4. 液体汽化

液体分子逸出液面向空间扩散的现象称为汽化。液体汽化为蒸汽,蒸汽凝结又可变为液体,其中凝结是汽化的逆过程。在液体中,汽化和凝结同时存在,当这两个过程达到动态平衡时,宏观的汽化现象停止,此时液体的压强称为饱和蒸汽压强或汽化压强。液体的汽化压强与温度有关。水的饱和蒸汽压(汽化压强)见表 1-4。

水的饱和蒸汽压强 P_s 值 表 1-4

水温(℃)	0	5	10	15	20	25	30
$P_s(\text{kPa})$	0.61	0.87	1.23	1.70	2.34	3.17	4.24
水温(℃)	40	50	60	70	80	90	100
$P_s(\text{kPa})$	7.38	12.33	19.92	31.16	47.34	70.10	101.33

当水流中某处的压强低于汽化压强 P_s 时,该处将发生汽化,形成空化现象,即液体内部会出现气体(或蒸汽)空泡或空穴的现象。液体的汽化不但可发生在液面,而且也可发生在液体内部。液体的汽化现象往往可造成许多危害,如使虹吸管水流中断,破坏水泵工作以及对固体边壁产生破坏性的气蚀现象及震动等。欲保证液体不出现汽化的条件为:

$P \geq P_s$ (1-10)

式中 P ——液体内任一点压强;
 P_s ——液体的饱和蒸汽压强。

此外,液体还具有其他方面的物理性质,如表面张力、毛细现象及热传导等,因与本专业关系不大,不再逐一介绍。

三、实际液体与理想液体

具有粘滞性的一切真实液体,称为实际液体;没有粘滞性的液体则称为理想液体。粘滞性是液体最突出、最重要的物理特性,所以理想液体、连续介质及不可压缩液体实际上都不存在,都是一种为简化理论分析的一种假想物理模型。详细描述粘滞性对液体运动的影响十分困难,因此,在流体力学中,通常暂先忽略液体的粘滞性作用,即按理想液体建立基本关系。而后通过实验手段对理论结果加以修正,使其适用于解决实际液体的各类计算问题。

第二节 作用在液体上的力

水力学的任务是研究液体运动和所受外力间的关系。设在运动液体中任取一块隔离体,则作用在这一隔离体上的外力大体上有两类:质量力和表面力。现分述如下:

一、质量力及单位质量力

第一类外力是作用于液体每一质点上且与液体质量成正比的力,称为质量力。如重力及惯性力均属此类。重力是地球对液体质点的吸引力;惯性力是液体作变速运动时因惯性而受到的一种外力,其大小等于该隔离体质量与其加速度的乘积,方向与隔离体加速度的方向相反,故惯性力又称惯性反力。

水力学中的水流通常都在重力作用下,有时亦同时受惯性力的作用。例如,在变速前进时,容器中的液体、旋转容器中的液体以及管道、河渠弯段中的水流,除受到重力作用外,都有惯性力作用。弯曲河道中,凹岸水位略高于凸岸,流速越大,凹凸两岸的水位高差也越大,其原因就

是受到弯道离心惯性力的作用。

考虑到液体物理特性关系,水力学中建立液体平衡和运动的受力关系,通常从液体微元(即液体质点团)入手,并引用单位质量力描述液体质点所受的质量力。所谓单位质量力,即单位质量液体所受的质量力。设液体隔离体的质量为 M ,所受质量力为 F , F 在三维坐标轴上的投影为 F_x, F_y, F_z ,按单位质量力的定义有:

$$\left. \begin{aligned} \vec{f} &= \frac{\vec{F}}{M} = X \vec{i} + Y \vec{j} + Z \vec{k} \\ X &= \frac{F_x}{M} \\ Y &= \frac{F_y}{M} \\ Z &= \frac{F_z}{M} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

式中 $\vec{f}$ ——单位质量力;
 X, Y, Z —— $\vec{f}$ 在 x, y, z 三轴方向的分量;
 $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ —— x, y, z 三轴方向的单位矢量。

单位质量力的单位与加速度单位相同,即 m/s^2 。对于只受重力作用的静止液体有:

$$\begin{aligned} X &= Y = 0 \\ Z &= -g \quad (g \text{ 与 } z \text{ 轴方向相反}) \end{aligned}$$

二、表面力

作用于运动液体隔离体表面的外力,称为表面力。例如,在运动或静止的液体中任取一隔离体,则此隔离体上的全部外力即为表面力。按液体的物理特性,液体隔离体上的拉力可以忽略不计,因此表面力只有压力及切力两类。此外,液体不能像固体那样承受集中力,对于隔离体上某点的外力,只能用应力形式表示:

$$\left. \begin{aligned} p &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \\ \tau &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{dT}{dA} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

式中 P ——某点的压应力或压强(Pa, N/m^2);
 τ ——某点的切应力(Pa, N/m^2);
 ΔA ——包含某点 M 在内的微小面积(m^2);
 ΔP ——作用于 ΔA 上的微小压力(N);
 ΔT ——作用于 ΔA 上的微小切力(N)。

对于静止液体或相对静止的液体,由牛顿内摩擦定律可知,因 $u=0$ 或 $u=\text{常数}$,故 $\tau=0$,所以静止液体或相对静止的液体的隔离体表面只有压力(或压应力)。

* 第三节 国际单位制和工程单位制

所谓单位制即一系列量度单位的总称,它由选定的基本单位和导出单位组成。
 国际单位制(SI制)是在1960年的第11届国际计量大会上通过的。由于它有许多优点,目前许多国家均

在积极推广。连英制根深蒂固的英国、美国也已采用或向国际单位制过渡。我国于 1977 年 5 月 27 日颁布了《中华人民共和国计量管理条例》(试行),开始了积极的推广工作,并统一规定采用国际单位制。我国过去大量采用的是工程单位制,了解这两种单位制的相互关系及其换算,自然有利于国际技术交流和阅读各种技术文献,因此极为必要。

通常用于水力学中的基本物理量有 4 个,即力、质量、长度、时间。对于上述两种单位制,其基本单位分述如下:

1. 工程单位制的基本单位

长度单位:米(m)

力的单位:公斤力(kg·f)

时间单位:秒(s)

2. 国际单位制的基本单位

长度单位:米(m)

质量单位:公斤(kg)

时间单位:秒(s)

由上可知,国际单位制和工程单位制不同处是以“公斤”作为质量单位,而不是作力的单位。在国际单位制中,力的单位用牛顿(N);工程单位制中,力的单位用公斤力(kgf),二者的重量换算基本关系是:

$$1\text{kgf} = 9.8\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.8\text{N}$$

质量换算基本关系是:

$$1\text{kg} = 0.102\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$$

水力学中常见物理量的国际单位制与工程单位制的换算关系如表 1-5 所列。

〔例 1-2〕 求出温度 $t=4^\circ\text{C}$ 时的水和温度 $t=20^\circ\text{C}$ 时的水银的密度,并分别用 SI 制和工程单位制表示。

解:由表 1-1,1-2 查得:

$$\gamma_{\text{水}(4^\circ\text{C})} = 9.8\text{kN/m}^3, \gamma_{\text{汞}(20^\circ\text{C})} = 133.28\text{kN/m}^3$$

1. SI 制

$$\begin{aligned} \rho_{\text{水}(4^\circ\text{C})} &= \frac{\gamma_{\text{水}(4^\circ\text{C})}}{g} = \frac{9.8\text{kN/m}^3}{9.8\text{m/s}^2} = 1 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} = 1000 \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} \\ &= 1000 \frac{9.8/9.8\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m}^4} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{1000}{1000} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{L}} \\ &= 1\text{kg/L} \\ \rho_{\text{汞}(20^\circ\text{C})} &= \frac{\gamma_{\text{汞}(20^\circ\text{C})}}{g} = \frac{133.28\text{kN/m}^3}{9.8\text{m/s}^2} \\ &= 13.6 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} = 13600 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m}^4} \\ &= 13.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 13.6\text{kg/L} \end{aligned}$$

2. 工程单位制

$$\begin{aligned} \rho_{\text{水}(4^\circ\text{C})} &= \frac{\gamma_{\text{水}(4^\circ\text{C})}}{g} = \frac{1000\text{kgf/m}^3}{9.8\text{m/s}^2} \\ &= 102\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 \\ \rho_{\text{汞}(20^\circ\text{C})} &= \frac{\gamma_{\text{汞}(20^\circ\text{C})}}{g} = \frac{13600\text{kgf/m}^3}{9.8\text{m/s}^2} = 1387.8\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 \\ &\quad (\text{注: } 1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2, 1\text{N} \cdot \text{s}^2 = 1\text{kg} \cdot \text{m}, 1\text{m}^3 = 1000\text{l} = 10^6\text{cm}^3) \end{aligned}$$

国际单位制与工程单位制换算关系

表 1-5

物理量	国际单位制和符号	工程单位制和符号	换算关系
质量	千克,公斤(kg)	公斤力·秒 ² /米(kgf·s ² /m)	1kgf·s ² /m=9.8kg 1kg=0.102kgf·s ² /m
密度	千克每立方米(kg/m ³)	公斤力·秒 ² /米 ⁴ (kgf·s ² /m ⁴)	1kgf·s ² /m ⁴ =9.8kg/m ³ 1kg/m ³ =0.102kgf·s ² /m ⁴
动量	千克米每秒(kg·m/s)	公斤力·秒(kgf·s)	1kgf·s=9.8kg·m/s
力,重量	牛[顿](N)	公斤力(kgf)	1kgf=9.8N 1N=0.102kgf
力矩	牛[顿]米(N·m)	公斤力·米(kgf·m)	1kgf·m=9.8N·m
压强 应力	帕[斯卡](Pa) 1千帕(kPa)=1000Pa 牛[顿]每平方米(N/m ²) 1Pa=1N/m ²	公斤力/米 ² (kgf/m ²) 公斤力/厘米 ² (kgf/cm ²)	1kgf/cm ² =9.8kPa 1kgf/cm ² =9.8N/cm ²
功,能	焦[耳](J) 牛[顿]米(N·m) 1J=1N·m	千瓦小时(kW·h)	1kW·h=3600kJ 1kW·h=3600kN·m
功率	瓦(W) 1千瓦(kW)=1000W 1焦[耳]每秒(J/s)=1W	公斤力·米/秒(kgf·m/s) 马力(HP)	1kgf·m/s=9.8W 1kW=102kgf·m/s 1HP=75kgf·m/s
动力粘度	1帕[斯卡]秒(Pa·s) 1Pa·s=1N·s/m ²	泊(P) 公斤力·秒/米 ² (kgf·s/m ²)	1P=10 ⁻¹ Pa·s 1kgf·s/m ² =9.80665Pa·s
运动粘度	平方米每秒(m ² /s)	斯托克斯,斯(St) 平方厘米每秒(cm ² /s) 1St=1cm ² /s	1St=10 ⁻⁴ m ² /s

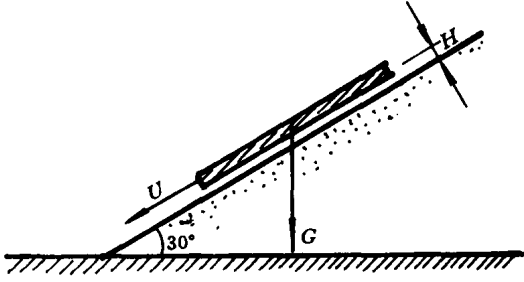
习 题

- 1-1 水力学的定义是什么?
- 1-2 试说明连续介质假说的意义。水力学对液体的物理特性作了哪些模型化假设?
- 1-3 什么情况下需要考虑液体内摩擦力的影响?液体内摩擦力是表现在液体与固体接触面上,还是表现在整个运动液体之中?
- 1-4 设水温为 30℃,试求 0.001m³ 水的质量和重量。
- 1-5 已知 500l 水银的质量为 6795kg,求水银的密度和重度。
- 1-6 水温从 5℃增加到 100℃时,其体积比原有体积增加百分之几?
- 1-7 0℃时,冰的密度 $\rho' = 916.7\text{kg/m}^3$,其体积比同样温度下水的体积大还是小? 体积比为多少?
- 1-8 封闭容器盛水,在地面上静止时水所受单位质量力为若干? 封闭容器从空中自由下

落时,其单位质量力又为若干? ($g=9.8\text{m/s}^2$)

1-9 设水的重度 $\gamma=9.7\text{kN/m}^3$,动力粘度 $\mu=0.599\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$,求其运动粘度。

1-10 如习题 1-10 图所示,设有底面积为 $40\times 45\text{cm}^2$ 的矩形木板,质量为 5kg ,沿斜面下滑的速度 $U=1\text{m/s}$,斜面倾角为 30° ,木板与斜面间有油层,厚度 $H=1\text{mm}$,求油的动力粘度。



习题图 1-10

1-11 已知圆管半径为 R ,断面流速分布 $u(r)=a_0(R^2-r^2)$,其中 a_0 为常数, r 为由管轴起算的径向坐标,试求内摩擦切应力沿管径的分布关系,并绘出内摩擦切应力沿管径的分布图。

1-12 某轴承的内径 $D=10\text{cm}$,长 $L=8\text{cm}$,转轴的外径 $d=9.96\text{cm}$,润滑油的动力粘度 $\mu=1.6\times 10^{-1}\text{Pa}\cdot\text{s}$,当转速 $n=1000\text{r/min}$ 时,试求转轴的扭转力矩 M 。