

全国水利水电类高职高专统编教材

水力学

黄河水利职业技术学院 张耀先 主编
长沙电力学院 丁新求



黄河水利出版社

全国水利水电类高职高专统编教材

水 力 学

黄河水利职业技术学院 张耀先 主编
长沙电力学院 丁新求

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书是为高等职业技术学院、普通高等专科学校水利水电工程专业、水利工程专业编写的全国统编教材。全书共分十一章,包括绪论、水静力学、水流运动的基本原理、水流型态与水头损失、有压管道中的恒定流、明渠恒定均匀流、明渠恒定非均匀流、堰流、闸孔和无压洞涵出流、水工建筑物下游水流衔接与消能、高速水流简介、相似原理与水工模型试验、渗流基础、液体旋涡运动与流体绕叶栅流动简介。各章有例题、习题和常用图表。

本书也适用于水文水资源工程、给水排水、水利工程监理、道路与桥梁、水土保持、水电站动力设备、水电站建筑、治河与防洪等专业,并可用于成人专科学校以及普通本科院校的高等职业技术学院同类专业教学,还可供水利水电工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学/张耀先、丁新求主编. —郑州:黄河水利出版社,2002.8

全国水利水电类高职高专统编教材

ISBN 7-80621-592-1

I. 水… II. ①张…②丁… III. 水力学—高等学校:技术学校—教材 IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 061321 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371-6022620

E-mail:yrqx@public2.zz.ha.cn

承印单位:黄委会设计院印刷厂印刷

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:25.5

字数:589 千字

印数:1—5 100

版次:2002 年 8 月第 1 版

印次:2002 年 8 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-592-1/TH·279

定价:39.00 元

前 言

本书是根据教育部《关于加强高职高专人才培养工作意见》和《面向 21 世纪教育振兴行动计划》等文件精神,以及由全国水利水电高职教研会拟定的教材编写规划,报水利部批准,用中央财政安排的“支持示范性职业技术学院建设”项目经费组织编写的水利水电类全国统编教材。

本教材主要是按照高职高专水利水电工程及水利工程专业的“水力学”课程教学大纲编写的,考虑到高职高专教材统编尚属首次,在满足该两专业教学要求的基础上,我们同时参照给水排水、水利工程监理、道路与桥梁、水文水资源、水电站建筑、水土保持、水电站动力设备、治河与防洪等专业教学大纲的要求,增编了部分带 * 号章节选择内容,以供上述各专业教学选用。

本书在编写过程中力求概念清晰、深入浅出,联系实际,理论上以适当够用为度,不求学科的系统性和完整性,力求结合专业,突出实用,体现高职高专教育的特色。

参加本书编写的有长沙电力学院丁新求(第一、十章)、山东水利职业学院者建伦(第二、十二章)、黑龙江水利工程专科学校韩梅(第三、九章)、安徽水利水电职业技术学院吴延枝(第四、十三章)、福建水利电力学校陈柳玉(第五、八章)、杨凌职业技术学院张春娟(第六、七章)、黄河水利职业技术学院张耀先(第七、十一、六章)、广东水利电力职业技术学院张劲(第八、五章)、四川电力职业技术学院邓小玲(第九、三章)、沈阳农业大学高等职业技术学院章喆(第十二、四章)、黄河水利职业技术学院王俊(第十二、二章)。全书由张耀先、丁新求主编,张耀先统稿,邓小玲、张劲、韩梅任副主编。本书由华北水利水电学院孙东坡教授主审,清华大学张红武教授及许多水力学同仁对本书提出了许多宝贵意见,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,不足之处在所难免,恳请广大读者对本书的缺点和错误予以批评指正。

编 者

2002 年 6 月

第七节 绕流阻力与升力	(115)
本章小结	(118)
习题	(119)
第五章 有压管道中的恒定流	(121)
第一节 概述	(121)
第二节 简单短管的水力计算	(122)
第三节 短管应用举例	(128)
第四节 长管的水力计算	(137)
第五节 复杂管路水力计算	(140)
第六节 水击现象简介	(155)
本章小结	(161)
习题	(162)
第六章 明渠恒定均匀流	(168)
第一节 概述	(168)
第二节 明渠均匀流的特性及其产生条件	(170)
第三节 明渠均匀流的计算公式及有关问题	(172)
第四节 渠道水力计算的类型	(177)
第五节 渠道糙率分析	(182)
第六节 明渠均匀流断面上的流速分布	(186)
本章小结	(190)
习题	(190)
第七章 明渠恒定非均匀流	(192)
第一节 概述	(192)
第二节 明渠非均匀流的一些基本概念	(192)
第三节 水跌与水跃	(203)
第四节 明渠恒定非均匀渐变流基本方程式	(211)
第五节 棱柱体渠道中非均匀渐变流水面曲线的分析	(214)
第六节 棱柱体渠道中非均匀渐变流水面曲线的计算	(223)
第七节 天然河道水面曲线计算	(230)
第八节 天然河道中恒定非均匀流流量和糙率的计算	(239)
第九节 弯道水流简介	(242)
本章小结	(244)
习题	(247)
第八章 堰流、闸孔和无压洞涵出流	(252)
第一节 概述	(252)
第二节 孔口与管嘴出流	(254)
第三节 闸孔出流	(258)
第四节 堰流	(264)

第五节 无压洞涵的水力计算*	(277)
本章小结	(282)
习题	(284)
第九章 水工建筑物下游水流衔接与消能	(287)
第一节 概述	(287)
第二节 底流式衔接与消能	(288)
第三节 底流消能的其他形式及辅助设施	(298)
第四节 挑流消能的水力计算*	(303)
本章小结	(307)
习题	(309)
第十章 高速水流简介*	(310)
第一节 高速水流的压强脉动现象及对建筑物的影响	(310)
第二节 水工建筑物的气蚀问题	(313)
第三节 明渠高速水流掺气	(315)
第四节 明渠急流冲击波现象	(318)
本章小结	(324)
习题	(326)
第十一章 相似原理与水工模型试验*	(327)
第一节 概述	(327)
第二节 量纲分析	(328)
第三节 相似理论与水工模型试验基础	(331)
第四节 水工模型试验设备	(341)
第五节 水工模型试验的测试技术	(344)
第六节 水工模型设计	(349)
第七节 水工模型试验操作技术	(351)
第八节 水工模型试验步骤及设计实例	(354)
本章小结	(357)
习题	(357)
第十二章 渗流基础*	(359)
第一节 渗流的基本概念	(359)
第二节 渗流的基本定律——达西定律	(361)
第三节 地下河槽中无压恒定均匀渗流	(362)
第四节 地下河槽中无压恒定非均匀渐变渗流	(363)
第五节 棱柱体地下河槽中恒定渐变渗流的浸润曲线	(364)
第六节 井的渗流计算	(368)
第七节 水平不透水层上均质土坝的渗流计算	(373)
第八节 有压渗流的计算	(375)
本章小结	(380)

习题.....	(380)
第十三章 流体旋涡运动与流体绕叶栅流动简介	(382)
第一节 旋涡运动简介.....	(382)
第二节 流体绕叶栅流动简介.....	(388)
本章小结.....	(393)
习题.....	(395)
附录 I 梯形和矩形断面明渠正常水深求解图.....	(396)
附录 II 梯形和矩形断面明渠底宽求解图.....	(397)
附录 III 梯形、矩形、圆形断面明槽临界水深求解图.....	(398)
附录 IV 建筑物下游河槽为矩形时收缩断面水深及其共轭水深求解图.....	(399)
参考文献.....	(400)

第一章 绪 论

第一节 水力学的研究对象与任务

一、水力学的定义和研究对象

水力学是研究液体处于平衡和机械运动状态下的力学规律,并探讨运用这些规律解决工程实际问题的一门科学。在诸多种类的液体中,由于工程实际中接触最多的是水,本学科便以水作为液体研究的主要对象,故称之为水力学。水力学的基本原理和一般水力计算方法不仅适用于水,也同样适用于其他一些液体。

水力学由水静力学和水动力学两部分组成。水静力学主要研究液体处于静止(或相对静止)状态下的力学规律及其在工程实际中的应用;水动力学主要研究液体处于机械运动状态下的各种规律及其在工程实际中的应用。

二、水利工程中的水力学问题和任务

在水利工程建设中,水力学占有十分重要的地位,被广泛应用于各个领域,如水利工程建筑、水力发电工程、农田水利工程、机电排灌工程、港口工程、河道整治工程、给排水工程、水资源工程、环境保护工程等。在这些水利工程的勘测、设计、施工和运行管理等各个过程中,都需要解决大量的水力学问题,为其提供合理的依据。

为了明确水力学的任务,我们以水资源综合利用的水利枢纽工程为例,来了解一下工程实际中常见的水力学问题。

为了满足防洪、灌溉、航运、发电和养殖等各方面的需要,常在河道上筑坝以抬高上游水位,形成水库。同时,修建泄洪、通航、引水及输水建筑物、水电站等,组成水利枢纽。这些建筑物的存在,调整和改变了天然的水流形态,使之按人们预定的调度方案运行。另外,由于水流反抗由建筑物所形成的人工边界条件的约束,水流与边界的相互作用形成了新的水流状态。在规划设计时,就必须分析自然河势与天然水流形态,因势利导,妥善布局每一个建筑物,正确确定水库的各种水位和下泄流量;合理设计引水、输水和泄洪建筑物过水断面的形状、尺寸以及过流能力的大小,以充分利用水资源,最大限度地发挥综合利用的效益。

在河道上筑坝后,坝上游水位将沿河道抬高,导致河道两岸的农田、村庄及城镇有可能被淹没,要确定筑坝后水库的淹没范围,必须解决坝上游河道水面曲线的计算问题。

水库蓄水后,大坝就会受到静水或动水压力的作用。在坝前水压力的作用下,水库中的水还会有部分沿坝基土壤或岩石的缝隙向下游渗透。在校核坝体稳定时,必须计算上、下游水对坝体的水压力及渗透对坝基的作用力

泄洪时,因溢流坝段上、下游水位差一般较大,水流下泄时往往具有较大的动能,必须采取有效的工程措施,消除多余有害的动能,防止或削弱高速下泄的水流对下游河床的冲刷,以确保坝体的安全。

以上简单介绍了枢纽工程中的一些水力学问题。归纳实际工程中常见的水力学问题,大致可分为下述六个方面:一是水流对建筑物的作用力问题;二是建筑物的过流能力问题;三是水能利用和能量损失问题;四是河渠水面曲线计算问题;五是泄水建筑物下游水流的消能问题;六是建筑物的渗流问题。此外,还有一些特殊的水力学问题,如管、渠非恒定流问题,高速水流中的掺气、气蚀、脉动、振动和冲击波等问题,挟沙水流问题,有害物质对水资源的污染问题等。

水力学的任务,就是研究液体处于平衡和机械运动状态下的各种基本规律,研究和提出运用这些基本规律来解决工程实际中所遇到的各类水力学问题的具体方法。

第二节 液体的基本特性和主要物理力学性质

一、液体的基本特性

自然界的物质可分为固体、液体和气体三种存在形式。固体的主要特征,是具有固定的形状,在外力的作用下不容易变形。液体和气体统称为流体,流体的共同特征,是容易流动和变形。液体和气体的主要区别在于,液体在外力的作用下不易压缩,而气体在外力的作用下则容易压缩。

二、液体的主要物理力学性质

(一)液体的质量与密度、重量与容重

1. 液体的质量与密度

质量是物体惯性大小的度量。质量愈大的物体,惯性愈大,其反抗改变原有运动状态的能力也就愈强。设物体的质量为 m , 加速度为 a , 则惯性力为

$$F = -ma \quad (1-1)$$

质量的标准单位为 g 或 kg ; 加速度的单位为 m/s^2 。

对于质量是均匀分布的均质液体,其单位体积的质量称为密度,即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中 V ——液体的体积。

密度的单位为 g/cm^3 或 kg/m^3 。

2. 液体的重量与容重

在物理学中我们已知,地球上的物体,都会受到地心引力的作用,这种地球对物体的引力就称为重量(或重力)。重量用 G 表示,重量的单位为 N 或 kN 。对于质量为 m 的液体,其重量为

$$G = mg \quad (1-3)$$

式中 g ——重力加速度,国际计量委员会规定 $g = 9.806\,65\text{m/s}^2$ 为标准重力加速度,为简化计算,本教材采用 $g = 9.80\text{m/s}^2$ 。

对于均质液体,单位体积的重量称为容重,则容重

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-4)$$

容重的单位为 N/m^3 或 kN/m^3 。在水力学中,容重有时也称为重度或重率。

由式(1-3)和式(1-4),可得容重与密度的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

因为液体的体积随着温度和压强的变化而变化,故其容重与密度也将随之而发生变化,但变化很小。通常将水的容重和密度视为常数,在温度为 4°C 、压强为一个大气压的条件下,水的容重为 $9.806\,65\text{kN/m}^3$,密度为 $1\,000\text{kg/m}^3$ 。在水力计算中,为简化计算,一般采用水的容重为 9.80kN/m^3 ,密度为 $1\,000\text{kg/m}^3$;水银的容重为 133.3kN/m^3 。

【例 1-1】已知某液体的体积为 6m^3 ,密度为 983.3kg/m^3 ,求该液体的质量和容重。

解 由式(1-2)得,液体的质量:

$$m = \rho V = 983.3 \times 6 = 5\,899.8(\text{kg})$$

由式(1-5)得,液体的容重:

$$\gamma = \rho g = 983.3 \times 9.80 = 9\,636.3(\text{N/m}^3)$$

(二)液体的黏滞性

1. 黏滞性

液体在运动状态下,流层间存在着相对运动,从而产生内摩擦力,具有抵抗剪切变形的能力。液体这种产生内摩擦力,具有抵抗剪切变形能力的特性,称为液体的黏滞性。黏滞性只有在流层间存在相对运动时才显示出来,静止液体是不显示黏滞性的。也就是说,静止状态下的液体是不能承受切力来抵抗剪切变形的。

2. 牛顿内摩擦定律及黏滞系数

为了说明黏滞性的存在对水流运动的影响,现以明渠水流为例予以说明。当渠道中的水流作直线运动,且液体质点是有规则的分层流动不相互掺混时(这种流动称为“层流运动”,将在后续有关章节中予以讨论),测得其垂线上的流速分布如图 1-1(a)所示。在渠道底部,由于黏滞性的存在,水流与边壁之间存在着附着力,液体质点的速度为零;距渠底愈远流速愈大,当忽略表面张力的影响时,自由表面上的流速最大。垂线上各点的流速不等,表明液体内部流层间存在着相对运动。

流层间的相对运动一经形成后,快层的质点将带动慢层的质点,从而在相邻流层的接触面上产生成对的内摩擦力,如图 1-1(b)所示的快、慢层接触面上的 T 与 T' ,它们大小相等、方向相反,作用在不同流层上。内摩擦力一方面作用于质点上使其发生剪切变形运动;另一方面,对液体质点来说,它又是企图抵抗剪切变形运动的力。设图 1-1(a)所示的质团 ABCD 上、下层中心处的流速分别为 $u + du$ 和 u 。因为两流层的速度不等,经 dt 时段后,质团变形呈 $A'B'C'D'$ 形状,这种变形就是因为流层间的接触面上产生的内摩擦力作用的结果。内摩擦力的大小可由牛顿内摩擦定律确定,即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

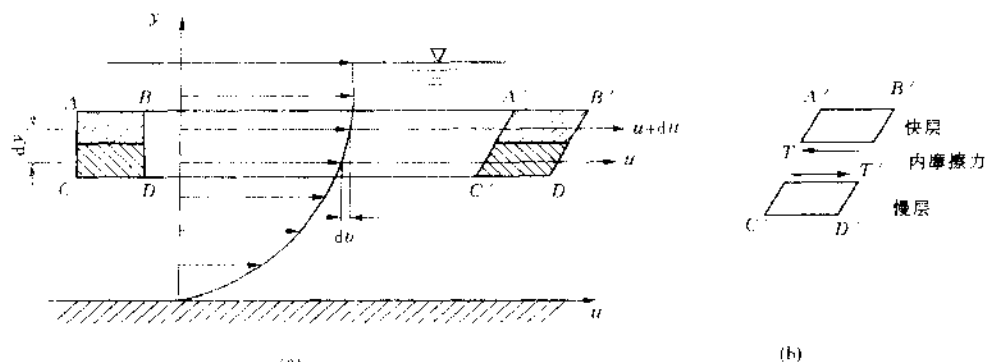


图 1-1

单位面积上的内摩擦力称为黏滞切应力,用 τ 表示,即

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

以上两式中 μ ——动力黏滞系数, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

A ——相邻流层间接触面的面积;

$\frac{du}{dy}$ ——流速梯度,它反映流速沿 y 方向的变化率。

式(1-6)或式(1-7)称为牛顿内摩擦定律。式(1-7)表明切应力与流速梯度呈线性关系。

动力黏滞系数 μ 值与液体的性质和温度有关,它反映了液体的性质对内摩擦力的影响,是度量液体黏滞性大小的物理量。 μ 值大的黏滞性大, μ 值小的黏滞性小。

在水力学中,液体的黏滞性还可另一种形式的黏滞系数 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 来描述, ν 称为运动黏滞系数, ν 的单位为 cm^2/s 或 m^2/s 。

设水温为 t ,以 $^{\circ}\text{C}$ 计,水的运动黏滞系数可用下述经验公式求得:

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

式中 ν 的单位为 cm^2/s ,不同温度条件下水的 μ 和 ν 值见表 1-1。

应当指出,牛顿内摩擦定律,只适用于切应力与流速梯度呈线性关系(即作层流运动)的“牛顿液体”(如水、某些油类、酒精、水银等)。对于非层流状态下的“牛顿液体”或“非牛顿液体”(如泥浆、血浆、牙膏、橡胶、尼龙以及生面团、浓淀粉糊等),其内摩擦力的计算将更为复杂,考虑到水利类各专业的特点,本书对此不予讨论。

【例 1-2】 图 1.2 为一极薄平板,在厚度分别为 4cm 的两种油层中以 $u = 0.8\text{m/s}$ 的速度运动。已知动力黏滞系数 $\mu_{\text{上}}$ 为 $\mu_{\text{下}}$ 的 2 倍,两层油在平板上产生的总切应力 $\tau = 30\text{N}/\text{m}^2$ 。试求上、下油层的动力黏滞系数 $\mu_{\text{上}}$ 及 $\mu_{\text{下}}$ 各为若干。

解 已知: $y = 0.04\text{m}$, $u = 0.8\text{m/s}$, $\tau = 30\text{N}/\text{m}^2$

表 1-1 不同温度条件下水的物理性质

温度 (℃)	容重 γ (kN/m ³)	密度 ρ (kg/m ³)	动力黏滞系数 μ (10 ⁻³ Pa·s)	运动黏滞系数 ν (10 ⁻⁶ m ² /s)	压缩系数 β (10 ⁻⁹ 1/Pa)	弹性系数 K (10 ⁹ Pa)	表面张力系数 σ (N/m)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	0.495	2.02	0.075 6
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	0.485	2.06	0.074 9
10	9.804	999.7	1.306	1.306	0.476	2.10	0.074 2
15	9.798	999.1	1.139	1.139	0.465	2.15	0.073 5
20	9.789	998.2	1.002	1.003	0.459	2.18	0.072 8
25	9.777	997.0	0.890	0.893	0.450	2.22	0.072 0
30	9.764	995.7	0.798	0.800	0.444	2.25	0.071 2
40	9.730	992.2	0.653	0.658	0.439	2.28	0.069 6
50	9.689	988.0	0.547	0.553	0.437	2.29	0.067 9
60	9.642	983.2	0.466	0.474	0.439	2.28	0.066 2
70	9.589	977.8	0.404	0.413	0.444	2.25	0.064 4
80	9.530	971.8	0.354	0.364	0.455	2.20	0.062 6
90	9.466	965.3	0.315	0.326	0.467	2.14	0.060 8
100	9.399	958.4	0.282	0.294	0.483	2.07	0.058 9

$$\frac{du}{dy} = \frac{u}{y} = \frac{0.8}{0.04} = 20(1/s)$$

由 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 得

$$\tau = \tau_L + \tau_F = (\mu_L + \frac{1}{2}\mu_F) \frac{du}{dy}$$

则 $30 = 1.5\mu_L \times 20$

$$\mu_L = \frac{20}{20} = 1.00 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

$$\mu_F = \frac{1}{2}\mu_L = 0.50 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

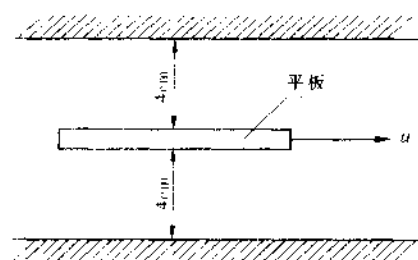


图 1-2

(三)液体的压缩性

1. 压缩性

液体不能承受拉力,只能承受压力,抵抗体积压缩变形,当压力除去后又恢复原状,消除变形。液体具有的这种性质称为液体的压缩性,亦可称之为弹性。

2. 体积压缩系数和体积弹性系数

液体压缩性的大小可用体积压缩系数 β 来表示。设质量一定的液体,其体积为 V ,当压强增加 dp 时,体积相应减小 dV ,其体积的相对压缩值为 $\frac{dV}{V}$,则体积压缩系数为

$$\beta = - \frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1-9)$$

由于液体的体积总是随压强的增大而减小的,则 dV 与 dp 的符号总是相反的,规定 β 取正值,故上式的右端冠以负号。该式表明, β 值愈小愈不易压缩。体积压缩系数 β 的单位为 m^2/N 或 $1/\text{Pa}$ 。

在材料力学中,我们已经知道,弹性系数的一般定义为应力与应变之比。若用 K 表示液体的体积弹性系数,可见体积压缩系数的倒数就是体积弹性系数,即

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1-10)$$

K 的单位为 N/m^2 或 Pa 。 K 值愈大则表明液体愈不易压缩,当 $K \rightarrow \infty$ 时就表示液体绝对不可压缩,也就是不存在弹性变形。

液体的体积压缩系数和体积弹性系数与液体的性质有关,同一种液体的 β 和 K 值也随温度和压强的变化而变化,但变化不大,一般视为常数。不同温度下的 β 和 K 值,见表 1-1。对于水,在普通水温的情况下,每增加一个标准大气压强,水的体积比原体积缩小约 $1/21\,000$,可见水的压缩性是很小的。在实际应用中,除某些特殊问题外,通常情况下,我们认为液体是不可压缩的,即认为液体的体积和密度是不随温度和压力的变化而变化的。

(四)液体的表面张力特性

1. 表面张力特性

由于液体表层分子之间的相互吸引,因此使得液体表层形成拉紧收缩的趋势。液体的这种在表面薄层内能够承受微小拉力的特性,称为表面张力特性。表面张力不仅存在于液体的自由表面上,也存在于不相混合的两层液体之间的接触面上。表面张力很小,通常情况下可以忽略不计,仅当液体的表面曲率很大时才需考虑。由于水利工程中所接触到的水面一般较大,自由表面的曲率很小,故在水力学问题中,一般不考虑表面张力的影响。

应当指出的是,在水力学试验中,经常使用玻璃管(测压管)测量水压强或水面高度,当玻璃管的内径较小时,则必须考虑由于表面张力引起的毛细管现象所造成的影响,如图 1-3 所示。

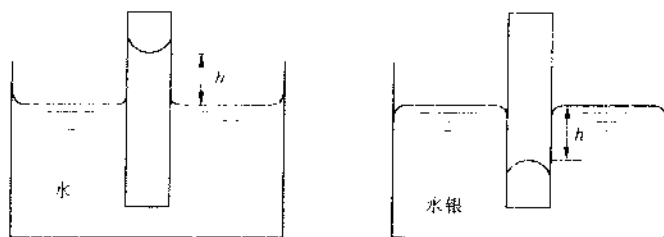


图 1-3

对于温度为 20°C 的水,玻璃管中水面高出容器中水面的高度为

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

对于温度为 20°C 的水银,玻璃管中水银面低于容器中水银面的高度为

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

上两式中 d ——玻璃管的内径, mm

由两式可见, d 愈小时 h 愈大。所以试验用的测压管内径不宜太小, 一般以 $d \geq 10\text{mm}$ 内径的玻璃管为宜, 否则应考虑由毛细管作用所带来的试验误差。

2. 表面张力系数

液体表面张力的大小, 可以用表面张力系数来度量。液面上单位长度所受的拉力称为表面张力系数, 用 σ 表示, σ 的单位为 N/m 。表面张力系数的大小与液体的性质、温度以及表面接触情况有关。与空气相接触的水面在不同温度情况下的表面张力系数 σ 值, 见表 1-1。

第三节 连续介质假设与理想液体的概念

一、连续介质假设

液体和其他物质一样, 基本结构都是由分子所组成。由于分子间距的存在, 分子与分子之间就具有一定的空隙。此外, 组成液体的分子还在不停地进行着复杂的分子热运动, 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, 致使液体的各项物理量在空间和时间上均呈现不连续变化, 给液体运动的研究带来了困难。

由于水力学主要是为工程服务的, 所以并不需要研究液体分子的微观运动, 而只需研究整个液流宏观的机械运动规律。同时, 由于液体分子之间的空隙与我们所研究的液体范围相比要小得多, 例如水在标准状态下, 相邻的分子间距约为 $3 \times 10^{-8}\text{cm}$, 可见水的分子间距是相当微小的。因此, 在水力学的研究中, 将液体假设成为一种由无数没有微观运动的质点所组成且毫无空隙地充满所占据空间的连续体。这种抽象化了的液体模型, 就是 1753 年由欧拉提出来的连续介质假设。

在连续介质假设的基础上, 一般还认为液体是均质的, 液体质点的物理性质在液体内部各部分和各方向上是相同的, 即认为液体具有均匀等向性。

有了连续介质假设, 则液体中的一切物理量(如速度、加速度、压强、密度等)均可视为空间坐标和时间的连续函数, 这为运用高等数学中的连续函数理论来研究液体的运动规律提供了很大的方便。

长期的生产实践和科学试验证明, 在连续介质假设条件下所得到的结论与客观实际十分相符, 完全能够满足工程实际的需要。因此, 在水力学的研究中, 除某些特殊问题外, 一般都是以连续介质假设为基础的。

二、理想液体的概念

通过前面对液体物理性质的讨论, 我们已经知道, 实际液体除存在其他一些物理性质外, 还具有黏滞性、压缩性和表面张力特性, 这些特性均不同程度地影响液体的运动。其中, 黏滞性是液体最突出、最重要的物理特性, 它对液体运动的影响极为复杂, 也给用数学方法描述和研究液体的运动带来了很大的困难。为了简化问题, 便于分析和研究, 水力学引进了一种研究液体运动的简化模型——理想液体。理想液体就是指绝对不可压缩、不

能膨胀,没有黏滞性、也没有表面张力特性的液体。这种液体与固体的性质相近,就可以把固体运动的规律引入到液体去。显然,理想液体并不是实际液体,只是为了研究方便而引出的一种理想化了的液流模型。由于实际液体的压缩性、膨胀性和表面张力均很小,与理想液体差别不大,但黏滞性是否存在则是理想液体和实际液体最重要的差别。除了少数液流问题黏滞性的影响本来就很小,可作为理想液体来考虑外,一般按理想液体所得出的结论,在应用到实际液体时,均应考虑由黏滞性的影响而带来的偏差并加以修正。

第四节 作用于液体上的力

液体无论处于平衡或运动状态,均受到各种力的作用。作用于液体上的力,按其物理性质的不同有惯性力、重力、弹性力、摩擦力和表面张力等。为便于分析液体的运动规律,在水力学中,又按其作用特点将这些力分为面积力和质量力两种类型。

一、面积力

面积力是指作用于液体的表面上,其大小与受作用液体的表面积成比例的力,如一部分液体对另一部分液体在其接触面上产生的水压力、液层与液层之间产生的内摩擦力、固体边界对液体的摩擦力、边界对液体的反作用力等都属于面积力。根据面积力与作用面之间的关系,面积力又可分为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力两种。由于面积力作用在液体的表面上,故又称为表面力。

面积力的大小既可用总作用力来度量,也可用单位面积上所受的力来度量,如单位面积上的压力(压强)和单位面积上的切力(切应力)等。

二、质量力

质量力是指作用于所研究液体的每一个质点上,其大小与液体的质量成比例的力,如惯性力、重力等。对于均质液体,因液体的质量与其体积成正比,故质量力又称为体积力。与面积力一样,质量力的大小除可用总作用力来度量外,也常用单位质量液体上所受的质质量力来度量,这种单位质量液体上所受的质质量力称为单位质质量力,其单位为 m/s^2 。设质量为 m 的液体,其上所作用的总质质量力为 F ,则单位质质量力为

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

若设总质质量力 F 在各个坐标轴上的投影为 F_x 、 F_y 、 F_z ,单位质质量力 f 在相应坐标轴上的投影为 X 、 Y 、 Z ,则有

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

如取 z 轴与铅垂方向一致且规定向上为正,则作用于单位质质量液体上的重力在各坐标轴上的分力为: $X = Y = 0, Z = -mg/m = -g$ 。

第五节 水力学的研究方法

每门学科,由于其学科特点和研究对象的不同而有各自不同的研究方法。水力学主要采用的是理论分析法、试验研究法和数值计算法。

一、理论分析法

水力学是以古典力学为基础的。理论分析法就是根据古典力学中机械运动的普遍原理,如力系平衡原理、质量守恒原理、能量守恒与转化原理、动能原理、动量原理等,结合液体运动的特点,运用严密的数理分析方法,来建立液体平衡和机械运动的基本规律,并通过生产实践检验、补充、发展和完善其理论体系。理论分析方法在建立水流运动的一般规律方面,已经比较成熟。但由于实际水流运动的多样性和复杂性,对于某些复杂的水流运动形式和复杂的边界条件,单靠理论分析方法往往难以求得解答。

二、试验研究法

由于理论分析法的局限性,试验研究法就成为水力学研究的一种必不可少的手段,现阶段水力学试验研究主要有以下几个方面:

1. 原型观测

对天然的以及工程中的实际水流现象直接进行现场观测,收集第一手资料,为检验理论分析成果,总结、探索水流运动的某些基本规律提供依据。

2. 模型试验

在实验室内,将实际工程按一定的比例缩小成物理模型,并在模型上模拟相应的实际水流运动,从而得出模型水流的规律性,再把模型水流上的试验成果按一定的关系换算成实际水流的成果,为工程设计提供依据。在水力学中,模型试验通常可分为三种类型:

(1)比尺模型试验。根据实际水流的特点,按水力相似原理,依一定的比尺将原型中的实际水流缩小为模型水流,进行试验。

(2)系统试验。有时因为野外观测受到某些条件的限制或某种水流的相似规律在理论上还没有建立起来,则可在实验室内,小规模地造成某种水流运动来进行系统试验观测,从中找出实际水流的规律。

(3)模拟试验。根据水流和电流的相似性,用电流场来模拟水流场,进行水电比拟试验研究,从而找出水流的运动规律。

应该指出,理论分析法和试验研究法有着密切的辩证关系,如果没有试验研究相配合,理论分析所得结论的正确性就无法得以验证,也无法确定数学模型中的系数值。如果没有理论分析方法作为指导,设计试验方案,分析试验成果,建立经验或半经验理论公式等,试验分析法也无法进行。可见,二者是相互结合、相辅相成、不可分割的。

在水力学的试验研究中,为了找出水流运动的规律性,还必须使用一些分析方法,如量纲分析法、矛盾分析法以及其他数理分析方法等。运用这些分析手段,对试验所得到的资料进行分析处理,达到去粗取精,去伪存真,由此及彼,由表及里,抓住水流运动的特点

与力学本质,从而得出符合客观实际的水流运动规律。

三、数值计算法

近十几年来,随着计算机技术的不断发展,数值计算方法已成为水力学研究中的基本方法。在水力学的研究中,有时水流运动的基本方程和边界条件都比较复杂,当用常规的数理方法一般很难得到其理论解析解,而试验又受到客观条件的限制时,就往往需要运用数值计算方法来寻求其近似解,以满足工程实际的需要。所谓数值计算法,就是对水力学中由基本方程、边界条件、初始条件所构成的完整的数学模型,通过如有限差分、有限元及边界元等一些特定的计算方法,用计算机来求出其数学近似解。可见,数值计算法有时弥补了理论分析法和试验研究法的某些不足,为水力学研究开辟了新的途径。

本章小结

1. 水力学的定义

水力学是研究液体处于平衡和机械运动状态下的力学规律,并探讨运用这些规律解决工程实际问题的一门科学。

2. 液体的主要物理力学性质

液体的质量与密度、重量与容重。均质液体的质量与密度、重量与容重的关系为:

$$\rho = \frac{m}{V}, \gamma = \frac{G}{V}, \gamma = \rho g。$$

液体的黏滞性。①黏滞性的定义:液体具有抵抗剪切变形的能力的特性。②牛顿内摩擦定律。对于作层流运动的牛顿液体,流层间的内摩擦力 T 或单位面积上的内摩擦力 τ 为 $T = \mu A \frac{du}{dy}$ 或 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$, 称为牛顿内摩擦定律。③液体的运动黏滞系数和动力黏滞系数之间的关系为 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 。

液体的压缩性。液体的压缩系数 β 与弹性系数之间的关系为 $\beta = \frac{1}{K} = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp}$ 。

液体的表面张力特性(略)。

3. 连续介质假设与理想液体的概念

(1)连续介质假设:假设液体是由无数没有微观分子运动的质点所组成且无空隙地充满所占据空间的连续体。

(2)理想液体的概念:易流动的、绝对不可压缩、不能膨胀、没有黏滞性也没有表面张力特性的液体。

4. 作用于液体上的力

(1)作用于液体上的力可分为:面积力(如水压力、摩擦力等)
质量力(如惯性力、重力等)

(2)单位质量力 $f = \frac{F}{m}$; f 在 x, y, z 轴上的投影 $X = \frac{F_x}{m}, Y = \frac{F_y}{m}, Z = \frac{F_z}{m}$ 。