

全国水利水电类高职高专统编教材

GONGCHENG SHUILI SHUIWENXUE

工程水力水文学

王金亭 主编



黄河水利出版社

全国水利水电类高职高专统编教材

工程水力水文学

主 编	王金亭	
副主编	刘华平	黄泽钧
	张艳萍	高振芬
主 审	张耀先	

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书是全国水利水电类高职高专统编教材,是根据全国水利水电高职教研会制定的《工程水力水文学》课程教学大纲编写完成的。本书主要介绍水静力学、水流运动的基本原理、有压管流运动、明渠恒定均匀流和非均匀流、泄水建筑物的水力计算、泄水建筑物下游水流衔接与消能、水文循环、频率计算、年径流与洪水的分析及计算、水库调度等内容。

本书可作为水利工程专业、水利水电工程建筑专业、水利工程管理专业、港口与航道工程专业或其他相近专业的教材,也可供相关专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程水力水文学/王金亭主编. —郑州:黄河水利出版社,
2008.8

全国水利水电类高职高专统编教材

ISBN 978 - 7 - 80734 - 483 - 4

I. 工… II. 王… III. ①工程水文学 - 高等学校:技术
学校 - 教材 ②水力学 - 高等学校:技术学校 - 教材
IV. TV1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 126433 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhslwlp@126.com

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:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:16

字数:370 千字

印数:1—4 100

版次:2008 年 8 月第 1 版

印次:2008 年 8 月第 1 次印刷

定价:29.00 元

前 言

本书是根据《国务院关于大力发展职业教育的决定》、教育部《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》、《关于加强高职高专教育人才培养工作意见》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,由全国水利水电高职教研会组织编写的全国统编教材。

本书根据水利工程类专业改革的要求,对专业基础课程进行了有效整合。本书可作为水利工程专业、水利水电工程建筑专业、水利工程管理专业、港口与航道工程专业或其他相近专业的教材,也可供相关专业技术人员参考。

本书主要包括绪论、水静力学、水流运动的基本原理、有压管流运动、明渠恒定均匀流和非均匀流、泄水建筑物的水力计算、泄水建筑物下游水流衔接与消能、水文循环、频率计算、年径流与洪水的分析及计算、水库调度的基本知识与计算等内容。

本书力求概念清晰,计算方法步骤清楚,深入浅出,强化实践,淡化理论,理论上以适度够用为原则,不苟求学科的系统性和完整性,力求结合专业培养技能,突出实用性,体现高等职业技术教育的特点,以学生为本,以培养学生的应用能力为主线。每章均有学习指导与小结,并配有适量的例题和复习题,以方便学生学习。

本书编写分工如下:山东水利职业学院王金亭编写前言、绪论、第 8 章、附录,华北水利水电学院水利职业学院张艳萍编写第 1 章、第 2 章,山东水利职业学院高振芬编写第 3 章、第 4 章,山东水利职业学院王娟编写第 5 章,山东水利职业学院郭青芳编写第 6 章,湖南水利水电职业技术学院刘华平编写第 7 章、第 8 章,湖北水利水电职业技术学院黄泽钧编写第 9 章、第 10 章,山东水利职业学院肖汉编写第 10 章。

本书由王金亭担任主编,并负责全书统稿,由刘华平、黄泽钧、张艳萍、高振芬担任副主编,由黄河水利职业技术学院张耀先主审。

在本书的编写过程中,还参考引用了有关院校编写的教材和生产科研单位的技术文献资料,除部分已列出,其余未能一一注明,在此一并致谢。

由于作者水平有限,不足之处在所难免,我们恳切地希望各位教师和广大学生及其他读者对本书存在的缺点和错误提出批评和指正。

编者

2008 年 5 月

目 录

前 言	
绪 论	(1)
0.1 水资源及其开发利用	(1)
0.2 课程的研究内容与任务	(4)
复习题	(6)
第1章 水静力学	(7)
1.1 液体的主要物理性质	(7)
1.2 静水压强及其特性	(14)
1.3 重力作用下静水压强的分布规律	(14)
1.4 作用于平面壁上的静水总压力	(20)
1.5 作用于曲面壁上的静水总压力	(25)
小 结	(27)
复习题	(28)
第2章 水流运动的基本原理	(31)
2.1 描述液体运动的两种方法	(31)
2.2 恒定总流连续性方程	(35)
2.3 恒定总流的能量方程	(37)
2.4 恒定总流的动量方程	(46)
2.5 水流型态与水头损失	(48)
小 结	(61)
复习题	(61)
第3章 有压管流运动	(65)
3.1 概 述	(65)
3.2 简单短管的水力计算	(66)
3.3 短管应用举例	(73)
3.4 简单长管的水力计算	(78)
小 结	(83)
复习题	(83)
第4章 明渠恒定均匀流和非均匀流	(85)
4.1 概 述	(85)
4.2 明渠均匀流的基本公式	(87)
4.3 明渠水力计算中的几个问题	(88)
4.4 明渠均匀流的水力计算	(90)

4.5	明渠恒定非均匀流的基本概念	(92)
4.6	明渠恒定非均匀渐变流水面曲线的定性分析	(99)
4.7	水跃与水跌	(104)
	小 结	(109)
	复习题	(109)
第5章	泄水建筑物的水力计算	(111)
5.1	概 述	(111)
5.2	孔口与管嘴出流	(113)
5.3	堰 流	(117)
5.4	闸孔出流	(123)
	小 结	(131)
	复习题	(131)
第6章	泄水建筑物下游水流衔接与消能	(133)
6.1	概 述	(133)
6.2	底流式衔接与消能的水力计算	(135)
6.3	挑流消能的水力计算	(146)
	小 结	(150)
	复习题	(151)
第7章	水文循环	(152)
7.1	水文循环	(152)
7.2	径 流	(153)
7.3	降 水	(157)
7.4	蒸发与下渗	(162)
7.5	流域水量平衡	(163)
	小 结	(164)
	复习题	(164)
第8章	频率计算	(167)
8.1	概 述	(167)
8.2	概率、频率与重现期	(167)
8.3	现行水文频率计算方法——适线法	(169)
	小 结	(176)
	复习题	(176)
第9章	年径流与洪水的分析及计算	(178)
9.1	设计年径流	(178)
9.2	设计暴雨	(185)
9.3	设计净雨	(188)
9.4	设计洪水	(190)
9.5	小流域设计洪水	(196)

小 结	(202)
复习题	(202)
第 10 章 水库调度	(205)
10.1 水库兴利调节	(205)
10.2 水库兴利调度图的绘制及应用	(216)
10.3 水库的防洪计算	(218)
10.4 水库防洪调度	(220)
小 结	(222)
复习题	(222)
附 录	(224)
附表 1 皮尔逊Ⅲ型频率曲线的离均系数 Φ_p 值表	(224)
附表 2 皮尔逊Ⅲ型曲线的模比系数 K_p 值表	(227)
附表 3 三点法用表—— S 与 C_s 关系表	(231)
附表 4 三点法用表—— C_s 与有关 Φ 值的关系表	(232)
附表 5 瞬时单位线 S 曲线查用表	(234)
附图 1 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	(246)
参考文献	(247)

绪 论

0.1 水资源及其开发利用

0.1.1 水资源的含义

水是一种重要的自然资源,也是人类乃至整个生态系统赖以存在和发展的基本物质条件。对于水资源,目前还没有非常明确的定义,但普遍认为是有广义和狭义之分的。广义的水资源是指地球水圈内的水,它以气态、固态和液态等形式存在和运动着,如海洋水、湖泊水、河流水、地下水、土壤水、生物水和大气水等。地球上水资源的总储量达 13.86 亿 km^3 ,其中海水占总储量的 96.5%;天然淡水量约 0.35 亿 km^3 ,占总储量的 2.53%,而其中的 99.86% 是深层地下水和两极、高山冰雪等难以为人们所利用的静态水。真正与人类活动密切相关的江、河等河槽淡水量只占淡水总储量的 0.006%,而地下淡水的储量却占淡水总储量的 30%。

因此,从狭义角度讲,水资源是指在目前的经济技术条件下,可供人们开发利用的淡水量;是在一定时间内可以得到恢复和更新的动态量。其一般包括水量和水质两个方面。由地表水、土壤水和地下水及其相互转化构成水资源系统。大气降水是其总补给来源。但是,随着科学技术和社会经济的不断发展,狭义水资源的内涵也在不断发展变化。现在人们常说的水资源,一般是指狭义水资源。

0.1.2 水资源的开发利用

水资源是一种动态资源。其特点主要表现为可恢复性、有限性、时空分布不均匀性和利害双重性。人们在长期的生产、生活过程中,为了自身和环境的需要而不断地认识和开发利用水资源,其内容包括兴水利、除水害和保护水环境。兴水利主要指农田灌溉、水力发电、城乡给排水、水产养殖、航运等;除水害主要是指防止洪水泛滥成灾;保护水环境主要是指防治水污染,维护生态平衡,为子孙后代的可持续利用和发展留一片绿水青山。

水资源的开发利用主要是通过各种各样的工程措施来实现的。

按照开发利用水资源的目的,工程措施可分为:

兴利工程——农田灌溉工程、水力发电工程、城乡给排水工程、航道整治工程等。

防洪工程——水库工程、堤防工程、分洪工程、滞洪工程等。

水环境保护工程——治污工程、水土保持工程、天然林保护工程等。

按照开发利用水资源的类型,工程措施可分为:

地表水资源开发利用工程——引水工程、蓄水工程、扬水工程、调水工程等。

地下水资源开发利用工程——管井、大口井、辐射井、渗渠等。

综上所述,无论哪种工程措施都与水密切相关。所以,工程的规划设计、施工和管理运用都必须用到关于水的科学知识。

0.1.3 我国水资源的特点

0.1.3.1 水资源总量多,但人均、亩^①均占有量少

据统计,我国平均年降水量为 648 mm,年水资源总量约为 28 124 亿 m^3 ,其中河川径流量为 27 115 亿 m^3 。就总量而言,在世界上仅次于巴西、俄罗斯、加拿大、美国和印度尼西亚,居第六位。但中国人口众多,人均水资源占有量仅为世界平均值的 1/4,相当于日本人均占有量的 1/2、美国的 1/4、俄罗斯的 1/12、巴西的 1/20、加拿大的 1/44。在统计的 149 个国家中,我国排第 109 位,属于人均水资源贫乏的国家之一。耕地亩均占有河川径流量也只有 1 900 m^3 ,相当于世界亩均水量的 2/3 左右,远低于印度尼西亚、巴西、日本和加拿大。因此,我国水资源总量从绝对数量来看还算丰富,但人均、亩均水量却很少。

0.1.3.2 水资源地区分布不均匀,水土资源配置不均衡

我国水资源的地区分布很不均匀,南多北少,相差悬殊,与耕地和人口的分布极不适应,是我国水资源开发利用中的一个突出问题。总趋势是南方水多地少,北方水少地多。西南诸河流域片水资源最为丰富,而海河流域片水资源最为匮乏。

0.1.3.3 水资源年际、年内变化大,水旱灾害频繁

我国大部分地区受季风的影响,水资源的年际、年内变化较大。南方地区年降水量的最大值与最小值的比值达 2~4,北方地区为 3~6;最大年径流量与最小年径流量的比值,南方为 2~4,北方为 3~8。水量的年内分配也不均衡,主要集中在汛期,汛期的水量占年水量的比重,从长江以南地区的 60% 左右(4~7 月),到华北平原等部分地区河流的 80% 以上(6~9 月)。大部分水资源量集中在汛期,以洪水形式出现,利用困难,且易造成洪涝灾害。近一个世纪以来,受气候变化和人类活动的影响,我国水旱灾害更加频繁,平均每 2~3 年就有一次水旱灾害,如 1991 年长江大水、1998 年的长江和松花江大洪水,1999 年、2000 年北方及黄淮流域的大旱,灾害损失愈来愈严重。水旱灾害仍然是中华民族的心腹之患。

0.1.3.4 水土流失和泥沙淤积严重

随着人口的膨胀,过度砍伐树木、放牧、山坡垦田和不合理的耕作使地面被覆遭到严重破坏,水土流失严重。据统计,到 1992 年全国水土流失面积已扩大到 367 万 km^2 ,占全国陆地面积的 38.2%,每年流入江河的泥沙有 50 亿 t,流失的肥力相当于全国化肥年产量的 9 倍之多。水土流失不但造成土壤瘠薄、农业低产、生态环境恶化,而且同时造成河道、湖泊淤积严重,使其行洪、防洪能力减小,防洪难度加大。比如,1998 年长江大洪水的洪峰流量比 1954 年的小,而洪水位却超过了 1954 年的。泥沙淤积还使水库库容减少、效益降低。此外,多沙河流在引水灌溉、供水方面的泥沙处理也是个难题。

0.1.3.5 天然水质好,但人为污染严重

我国河流的天然水质是相当好的,但由于人口的不断增长和工业的迅速发展,废污水的排放量增加很快,水体污染日趋严重。1999 年废污水日排放量达 606 亿 t,80% 以上的

① 1 亩 = 1/15 hm^2 。

废污水未经任何处理直接排入水域,使河流、湖泊遭受了不同程度的污染。根据 1999 年水质监测结果,全国 11 万 km 长的河流中有 37.6% 被污染(Ⅳ类水质以上),被调查的 24 个湖泊中有 5 个湖泊部分水体受到污染,9 个湖泊受到严重污染。水资源污染后失去了使用价值,严重的甚至破坏生态平衡,造成水资源的污染性短缺,加剧了缺水的危机。

0.1.4 地下水资源的特点

地下水因储存在地表以下的岩石空隙中,所以与地表水相比,用地下水作为供水水源有下列优点:地下水在地层中渗透,经过天然过滤,水质透明无色,一般不需净化处理;地下水(特别是深层地下水)因有上部岩层作为天然屏障,一般不易受地表污物的污染,卫生条件较好;地下水温较低,常年变化不大,特别适宜于冷却和空调用水;地下水取水构筑物可适当地靠近用水户,输水管道较短,构筑物较简单,基建费用较低,占地面积也小;水量、水质受气候影响较小,一般能保持较稳定的供水能力,因此在很多缺少地表水的地区(如干旱半干旱的山前地区、沙漠、岩溶山地),地下水常常是唯一的供水水源;可以利用含水层调蓄多余的地表水,增加有效水资源总量,工业上还可利用含水层的保温和隔热效应开展地面水的回灌循环,达到节能、储水、节水的目的。

0.1.5 我国水资源开发利用现状

新中国成立以来,水利事业取得了长足的发展,水资源开发利用成绩斐然。据统计,截至 1996 年底,全国已整修、新修江河堤防 24.8 万余 km,形成了一个初具规模的防洪体系。建成水库约 8.5 万座,总蓄水库容 4 571 亿 m^3 。其中,大型水库 394 座,总库容 3 260 亿 m^3 ;中型水库 2 618 座,总库容 724 亿 m^3 ;小型水库 81 893 座,总库容 587 亿 m^3 。同时,灌溉事业也得到了蓬勃发展,建成万亩以上灌区 5 606 处,配套机电井 333 万眼,机电排灌动力发展到 7 020 万 kW,全国灌溉面积发展到 5 116 万 hm^2 (7.67 亿亩)。累计治理水土流失面积达 61.3 万 km^2 ,累计解决饮水困难地区 1.59 亿人的吃水问题。目前,全国水电装机总量约 4 770 万 kW,年发电量达 1 560 多亿 kWh。

全国总用水量从 1949 年的 1 000 多亿 m^3 增加到 2000 年的 5 498 亿 m^3 。其中,工业用水占 20.7%,农田灌溉用水占 63.0%,林牧渔用水占 5.8%,生活用水占 10.5%(其中,城镇生活用水占 5.2%,农村生活用水占 5.3%)。但是,与世界发达国家相比,工业和城镇生活用水所占的比例较低,农业用水占的比例过大,总用水水平较低。例如,我国 1997 年工业万元产值用水量 136 m^3 ,是发达国家的 5~10 倍。据统计,我国工业用水的重复利用率为 30%~40%,实际可能更低,而发达国家为 75%~85%。全国城市输配水管网和用水器具的漏水损失高达 20% 以上;农业灌溉水的利用系数平均约为 0.45,而发达国家为 0.7,有的甚至达到 0.8;消耗每立方米水所能生产的粮食平均只有 1.1 kg,也与发达国家相差较远。

据有关资料显示,我国总人口的 75% 在饮用地下水。北方地区由于比较干旱,地表水源较少,地下水常常是重要的供水水源,如北京、西安、沈阳、太原、济南、石家庄、呼和浩特、兰州、包头等很多大中城市都在利用地下水作为供水水源,至于一般中小城市和广大农村对地下水的利用更为普遍。在地表水比较丰富的一些地区,由于地表水体容易被工

业排除的废物所污染,而地下水则有水质好、水温低、不易污染、比较经济等优点,因而一般优先利用地下水作为供水水源,尤其是作为饮用水源。

0.2 课程的研究内容与任务

0.2.1 研究对象

工程水力水文学包括水力学与水文学两部分内容。

水力学是以水作为主要研究对象,研究流体处于平衡和机械运动状态下的力学规律,并利用这些规律解决实际工程问题的一门科学。水力学的基本原理和一般水力计算方法不仅适用于水,还适用于其他一些流体。水力学主要包括水静力学和水动力学。水静力学主要研究液体处于静止或相对平衡状态时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力学规律及其在工程实际中的应用。

水文学是以水体作为主要研究对象,研究地球上水体的存在、循环和分布规律;探讨水体的物理和化学性质以及它们对环境的作用。本课程主要研究水循环的基本规律和径流形成过程的物理机制;根据长期实测和调查的水文资料,运用数理统计法预估未来长期的水文情势,为水资源开发利用措施的规划、设计、施工和运用提供水文数据;在水文分析计算的基础上,综合研究水文情势、用水需要、调节方法等方面,针对水利工程的规模和工作情况,提出经济合理的决策。

0.2.2 课程任务

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、农田水电工程、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、施工和运行管理的各个阶段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中常见的水力学问题:

(1)为了满足防洪、灌溉、航运、发电、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形态。因此,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,妥善布置每一个建筑物,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。

(2)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、村庄和城镇有可能被淹没,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。

(3) 水库蓄水后,大坝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。

(4) 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,大致可分为以下六个方面: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,研究和提出利用这些基本规律来解决实际工程中所遇到的各种水力学问题的具体方法。

水资源的合理开发利用和水害的防治是国民经济建设中非常重要而艰巨的任务,它与国民经济各部门息息相关,直接影响着工农业生产的发展和人民生活水平的提高。水资源开发利用的各种措施(包括工程措施与非工程措施)都必须是在充分掌握水体的水文变化规律的基础上制订和实施的。

对于水利水电工程建设来说,每一项工程在实施过程中都可以划分为规划设计、施工、管理运用三个阶段。每一个阶段都需要进行水文水利计算。而每个阶段水文水利计算的任务又是各不相同的:①在规划设计阶段主要是通过对比不同方案的投资和效益,选定最优方案。而水文计算和水利计算是计算工程投资和效益的基础。例如,设计水库时,若来水和调节库容估算偏大,据以设计的水库容量就会过大,不能充分发挥工程效益,造成资金的浪费;反之,来水估算和水利计算失误使工程容量设计偏小,水资源就不能得到充分利用,特别是对河流洪水量的估算,更关系到工程本身的安全和下游人民生命财产的安全。因此,在工程规划设计阶段,水文计算的任务是为工程设计提供水文数据,如设计年径流、设计洪水等。水利计算的任务是根据设计水文数据,通过调节计算选择枢纽参变数(如正常蓄水位、死水位、装机容量等),并确定主要建筑物尺寸(如坝高、溢洪道尺寸、引水渠道尺寸等),然后再详细计算各项水利经济指标,进行论证。应该指出,在进行水利计算时,必须按照国家的方针政策,根据国民经济各部门的要求,进行多用途(如防洪、灌溉、发电、航运及旅游等)和多工程目标的流域系统开发,使流域内的水利与土地资源得到充分的综合利用。②在施工阶段,为了修建临时性水工建筑物,如围堰、导流隧洞等,需计算施工期设计洪水。显然,施工期设计洪水的大小关系到施工建筑物的造价与安全。③在管理运用阶段,需要根据当时的和预报的水文情况编制工程调度运用计划,以充分发挥现有工程的效益。例如,对于具有防洪任务的水库,需要进行洪水预报,以便提前腾空库容或及时拦蓄洪水,更有效地减轻洪水灾害。此外,在工程建成以后,流域自然情况有所变化,随着观测资料的增多,有时还要复核和修改设计阶段的水文水利计算成果,必要时需对工程进行改建。譬如,有的工程就因当初设计洪水估算偏小,不得不在建成后再扩

建溢洪道或加固工程。

复习题

- 0-1 如何理解水资源的有限性和可恢复性？
- 0-2 中国水资源的特点是什么？
- 0-3 如何理解水资源的含义及其特点？
- 0-4 解释水资源的可持续利用。
- 0-5 举例说明水资源的不合理开发给国民经济带来的危害。
- 0-6 我国水资源存在的问题及其对策是什么？

第 1 章 水静力学

学习指导

目标

- 掌握液体密度、容重的定义及计算,黏滞性含义及牛顿内摩擦定律,静水压强的定义及特性,静水压强基本方程及其几何意义、物理意义,压强的单位及量测,绝对压强、相对压强、真空压强的概念及其相互间的关系,平面壁及曲面壁上的静水总压力的计算。

- 理解表面力、质量力的含义及其表示方法,位置水头、压强水头及测压管水头的概念。

重点

掌握重力作用下的静水压强基本方程及其应用,平面壁及曲面壁上的静水总压力的计算。

液体的“静止状态”有两种:一是液体相对地球处于静止状态,如水库、蓄水池中的水;二是液体对地球有相对运动,但液体质点之间不存在相对运动,而处于相对静止状态,如做加速运动的油罐车中的油。本章主要研究相对地球处于静止状态的液体。

水静力学的主要任务是根据力的平衡条件导出静止液体中的压强分布规律,并根据其分布规律,进而确定各种情况下的静水总压力。因此,水静力学是解决工程中水力荷载问题的基础,同时也是学习水动力学的基础。

1.1 液体的主要物理性质

自然界的物质一般有三种形式,即固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。固体分子的间距很小,内聚力很大,所以它能保持固定的形状和体积,承受一定的拉力、压力和剪切力;流体则不同,由于流体分子间距较大,内聚力较小,几乎不能承受拉力,所以流体不能保持固定的形状。

液体与气体相比,液体分子间的距离比气体小,内聚力比气体大得多,所以能保持一定的体积。气体没有固定的形状,也没有一定的体积,极易膨胀和压缩,液体的压缩性很小,气体和液体的主要区别在于它们的可压缩程度不同。因此,液体是易流动的、不易被压缩的。

液体运动状态的改变,一方面是受外力作用的结果,另一方面取决于液体自身的物理性质。所以,我们在研究液体的机械运动规律之前应首先了解液体的物理特性。

1.1.1 液体的主要物理性质

1.1.1.1 液体的密度和容重

单位体积液体的质量称为液体的密度,以符号 ρ 表示,单位为 kg/m^3 或 g/cm^3 。它的

通用微分表达式为

$$\rho = \rho(x, y, z, t) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-1)$$

式中 x, y, z ——液体所在的空间位置坐标;

t ——时间;

m ——液体质量;

V ——液体体积。

对于质量均匀分布的均质液体,其表达式可写成

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

单位体积液体的重量称为容重,也称重度或重率,以符号 γ 表示,单位为 N/m^3 或 kN/m^3 。它的通用微分表达式为

$$\gamma = \gamma(x, y, z, t) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-3)$$

对于均质液体,其表达式为

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

式(1-4)表明液体的容重 γ 与液体的密度 ρ 和液体所处位置的重力加速度 g 有关。 g 一般作为常数,取 9.8 m/s^2 。

因为液体的体积随着温度和压强的变化而变化,故其密度和容重也将随之发生变化,但变化很小,如表 1-1 所示。通常将水的密度和容重视为常数。在一个标准大气压、温度为 4°C 的条件下,水的密度为 1000 kg/m^3 或 1 g/cm^3 ,容重为 9800 N/m^3 或 9.8 kN/m^3 。几种常见液体的容重见表 1-2。

1.1.1.2 液体的黏滯性

液体在运动状态下,流层间存在着相对运动,从而在相邻流层间及液体与固体边壁的接触面上成对地产生内摩擦力,具有抵抗液体的剪切变形。液体所具有的这种产生内摩擦力,具有抵抗剪切变形能力的特性,称为液体的黏滯性。黏滯性是液体的固有属性,但静止液体不显示黏滯性,也就是说,静止液体是不能承受切力来抵抗剪切变形的,只有液体流层间存在相对运动时,液体的黏滯性才显示出来。

在两层很大的平行平板间夹一层很薄的液体,如图 1-1(a) 所示。将下层平板固定,而使上层平板以速度 v 运动。在液体底部,由于黏滯性的存在,水流与边壁之间存在着附着力,液体质点的速度为零,距下层平板顶部愈远流速愈大,与上层平板底部接触的液体质点流速最大,等于平板速度 v ,垂线上的流速呈直线分布,如图 1-1(a) 所示。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。

设液体质团 $ABCD$ 上、下层中心处的坐标分别为 $y + dy$ 和 y ,其对应的流速分别为 $u + du$ 和 u 。因为两流层的速度不等,所以在两流层间存在相对运动,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,它们大小相等,方向相反,作用在不同流层上。

表 1-1 不同温度条件下水的物理性质

温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)	容重 γ (kN/m^3)	动力黏滞系数 μ ($\times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)	运动黏滞系数 ν ($\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)	压缩系数 β ($\times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$)	弹性系数 K ($\times 10^9 \text{ Pa}$)	表面张力系数 σ (N/m)
0	999.9	9.779	1.781	1.775	0.495	2.02	0.075 6
4	1 000.0	9.800	1.518	1.559	0.485	2.06	0.074 9
10	999.7	9.797	1.306	1.306	0.476	2.10	0.074 2
15	999.1	9.791	1.139	1.141	0.465	2.15	0.073 5
20	998.2	9.782	1.002	1.007	0.459	2.18	0.072 8
25	997.0	9.771	0.890	0.896	0.450	2.22	0.072 0
30	995.7	9.758	0.798	0.803	0.444	2.25	0.071 2
40	992.2	9.724	0.653	0.657	0.439	2.28	0.069 6
50	988.0	9.682	0.547	0.548	0.437	2.29	0.067 9
60	983.2	9.635	0.466	0.465	0.439	2.28	0.066 2
70	977.8	9.582	0.404	0.400	0.444	2.25	0.064 4
80	971.8	9.524	0.354	0.347	0.455	2.20	0.062 6
90	965.3	9.460	0.315	0.305	0.467	2.14	0.060 8
100	958.4	9.392	0.282	0.270	0.483	2.07	0.058 9

表 1-2 几种常见液体的容重

液体名称	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
$t(^{\circ}\text{C})$	0	15	15	20	15
$\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	133.28	6.664 ~ 7.35	7.778 3	15.6	9.996 ~ 10.084

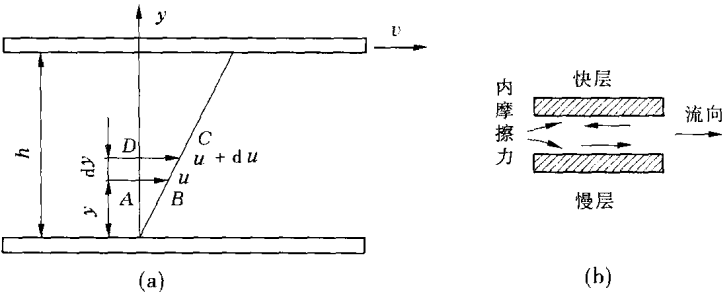


图 1-1

内摩擦力的大小可由牛顿内摩擦定律确定,即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \tag{1-5}$$

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, m^2 ;

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

内摩擦力的大小也可用单位面积上的内摩擦力表示, 称为黏滞切应力, 可表示为

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

式(1-6)表明黏滞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 值大的液体黏滞性大, μ 值小的液体黏滞性小。

液体的黏滞性还可由运动黏滞系数 ν 来表示。 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, 单位为 cm^2/s 或 m^2/s 。

设水温为 t , 以摄氏度($^{\circ}\text{C}$)计, 水的运动黏滞系数可用下式求得, 即

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-7)$$

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

注意: 牛顿内摩擦定律只适用于做层流运动的牛顿流体, 如水、空气、汽油、甲苯、乙醇等。

1.1.1.3 液体的膨胀性和压缩性

液体随温度变化而体积发生变化的特性称为液体的膨胀性。一般物体都有热胀冷缩的性质, 而水的温度为 4°C 时体积最小。当水的温度大于 4°C 时体积随温度的升高而增大; 当水的温度小于 4°C 时体积随温度的升高而降低。水体结冰时, 体积比水体增大 10%, 水的这种特性在工程中危害比较大, 故水管、水泵、公路路基等要注意防冻。

液体不能承受拉力, 但可以承受压力, 会由于抵抗体积压缩而变形, 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, 也称弹性。

液体压缩性的大小可用体积压缩系数 β 表示。设质量一定的液体体积为 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

$$\beta = - \frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1-8)$$

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, 故在式(1-8)的右端加“ $-$ ”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 Pa^{-1} 。

β 的倒数为弹性系数 K , 即

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

K 愈大则表明液体愈不易压缩, K 的单位为 N/m^2 或 Pa 。

液体的种类不同, 压缩性也不同, 同一种液体的压缩性也随温度和压强的变化而变