

高等学校试用教材

Shuilixue yu Qiaohan Shuiwen

水力学与桥涵水文

(公路与城市道路、桥梁、交通工程专业用)

叶镇国 编著

闻德荪 主审

人民交通出版社

## 内 容 简 介

本书为高等学校公路与城市道路、桥梁、交通工程专业本科用全国统编教材;亦可作非水利类有关专业教材及有关专业技术人员的参考用书。

全书共 15 章,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、有压管流与孔口管嘴出流、明渠水流、堰流、闸孔出流及泄水建筑物下游的消能、渗流、河流概论、水文统计的基本原理与方法、桥涵设计流量及水位推算、大中桥位勘测设计、桥梁墩台冲刷及调治构筑物、小桥涵勘测设计、相似原理及量纲分析等。

高等学校试用教材

水力学与桥涵水文

(公路与城市道路、桥梁、交通工程专业用)

叶镇国 编著

闻德荪 主审

插图设计:高静芳 版式设计:崔凤莲 责任校对:刘高彤

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

印刷厂印刷

开本: 印张: 字数: 千

199 年 月 第 1 版

199 年 月 第 版 第 次印刷

印数: 册 定价: 元

ISBN 7-114- -

# 前 言

《水力学与桥涵水文》(本科用)是高等学校路桥及交通工程专业用教材,内容侧重基本原理、方法及其应用,同时还考虑了拓宽知识面的需要。全书由湖南大学叶镇国教授编著,东南大学闻德荪教授主审。

本书对于多年来因水力学与桥涵水文课程分设,教材单行中存在的一些概念提法不一,符号多样等问题作了较规范化统一,加强了水力学与桥涵水文两大部分的有机衔接,尽量引用了最新规范及参考文献。全书共十五章,其中有“\*”符号部分可供各校选讲选学或课外阅读,以利拓宽专业知识面。本书的出版,希望有益于教和学、有益于工程技术人员和广大读者。

本书在拟定编写大纲以及教材编写过程中,曾得到主审闻德荪教授及各兄弟院校老师们的关心支持,提供了许多宝贵的经验和建议,使本书有所集思广益、博采众长,在此特表鸣谢。如有欠妥之处,敬希读者指正。

编著者

1997年5月于长沙

# 目 录

第一章 绪论.....	1
§ 1-1 水力学与桥涵水文的性质与任务 .....	1
§ 1-2 水力学的研究方法 .....	1
§ 1-3 液体的主要物理性质 .....	2
§ 1-4 作用在液体上的力 .....	9
习题 .....	10
第二章 水静力学 .....	12
§ 2-1 静水压强及其特性 .....	12
§ 2-2 静水压强分布规律 .....	14
§ 2-3 重力作用下水静力学基本方程 .....	16
§ 2-4 点压强测量 .....	22
§ 2-5 作用在平面壁上的静水总压力 .....	24
§ 2-6 作用在曲面壁上的静水总压力 .....	28
习题 .....	35
第三章 水动力学基础 .....	40
§ 3-1 描述液体运动的两种方法 .....	40
§ 3-2 欧拉法的基本概念 .....	42
§ 3-3 恒定流连续性方程 .....	49
§ 3-4 恒定流元流能量方程(元流伯诺里方程) .....	51
§ 3-5 恒定流实际液体总流能量方程(总流伯诺里方程) .....	54
§ 3-6 恒定流总流动量方程 .....	61
习题 .....	65
第四章 水流阻力与水头损失 .....	69
§ 4-1 水流阻力与水头损失的类型 .....	69
§ 4-2 液体运动的两种流动型态——层流与紊流 .....	69
§ 4-3 沿程水头损失计算 .....	73
§ 4-4 圆管层流沿程阻力系数 .....	76
§ 4-5 圆管紊流沿程阻力系数 .....	78
§ 4-6 局部水头损失计算 .....	88
* § 4-7 边界层分离现象与绕流阻力 .....	90
习题 .....	95
第五章 有压管流与孔口、管嘴出流.....	97
§ 5-1 有压管路水力计算 .....	97
* § 5-2 孔口出流 .....	106

* § 5-3 管嘴出流 .....	109
习题 .....	110
第六章 明渠水流 .....	114
§ 6-1 明渠几何特征与容许流速 .....	114
§ 6-2 明渠均匀流的特性 .....	117
§ 6-3 明渠均匀流基本公式 .....	118
§ 6-4 明渠均匀流水力计算基本问题 .....	120
§ 6-5 明渠非均匀流现象 .....	126
§ 6-6 明渠流干扰微波传播特性及水流状态 .....	128
§ 6-7 临界水深及临界底坡 .....	130
§ 6-8 明渠急变流 .....	135
§ 6-9 明渠恒定渐变流基本微分方程 .....	144
§ 6-10 棱柱形渠道恒定渐变流水面曲线定性分析 .....	146
§ 6-11 明渠恒定渐变流水面曲线计算(分段求和法) .....	149
习题 .....	153
第七章 堰流、闸孔出流及泄水建筑物下游的衔接与消能 .....	156
§ 7-1 堰的类型及流量公式 .....	156
§ 7-2 堰的流量系数、侧收缩系数及淹没系数 .....	159
§ 7-3 宽顶堰水力计算 .....	162
* § 7-4 闸孔出流 .....	167
§ 7-5 泄水建筑物下游的衔接与消能 .....	171
习题 .....	184
*第八章 渗流 .....	186
§ 8-1 渗流达西定律 .....	186
§ 8-2 无压恒定渐变渗流 .....	190
§ 8-3 集水廊道及井的渗流计算 .....	194
习题 .....	202
第九章 河流概论 .....	204
§ 9-1 河川水文现象的特点与桥涵水文的研究方法 .....	204
§ 9-2 河流及流域 .....	205
§ 9-3 河川径流 .....	210
§ 9-4 河川水文资料的收集与整理方法 .....	214
§ 9-5 河流的泥沙运动 .....	218
§ 9-6 河床演变 .....	221
习题 .....	223
第十章 水文统计的基本原理与方法 .....	226
§ 10-1 水文统计的基本概念 .....	226
§ 10-2 经验累积频率曲线 .....	230
§ 10-3 理论累积频率曲线 .....	235
§ 10-4 现行频率分析方法 .....	244

§ 10-5	相关分析 .....	251
	习题 .....	257
第十一章	桥涵设计流量及水位推算 .....	259
§ 11-1	按实测流量资料推算 .....	259
§ 11-2	按洪水调查资料推算 .....	259
§ 11-3	按暴雨资料推算 .....	263
	习题 .....	270
第十二章	大中桥位勘测设计 .....	272
§ 12-1	桥涵分类及一般规定 .....	272
§ 12-2	桥位选择 .....	273
§ 12-3	桥位勘测 .....	275
§ 12-4	大中桥孔径计算 .....	277
§ 12-5	桥面标高计算 .....	284
§ 12-6	调治构造物 .....	290
	习题 .....	295
第十三章	桥梁墩台冲刷计算 .....	297
§ 13-1	墩台冲刷类型 .....	297
§ 13-2	桥下断面一般冲刷深度 .....	298
§ 13-3	墩台局部冲刷深度 .....	304
§ 13-4	桥下河槽最低冲刷线 .....	306
	习题 .....	311
第十四章	小桥涵勘测设计 .....	313
§ 14-1	小桥涵勘测设计内容 .....	313
§ 14-2	小桥涵位置选择 .....	313
§ 14-3	小桥涵勘测与调查 .....	316
§ 14-4	小桥涵类型选择与布置 .....	319
§ 14-5	小桥孔径计算 .....	322
§ 14-6	涵洞孔径计算 .....	328
§ 14-7	小桥及涵洞构造 .....	334
§ 14-8	涵洞进出口沟床的加固与防护 .....	337
	习题 .....	341
*	第十五章 相似原理及量纲分析方法 .....	342
§ 15-1	相似概念 .....	342
§ 15-2	相似准则 .....	343
§ 15-3	模型设计 .....	347
§ 15-4	量纲分析方法 .....	349
	习题 .....	354
附录	.....	355
附录 1(a)	非粘性土的容许不冲刷平均流速 $v_{max}$ .....	355
附录 1(b)	粘性土的容许不冲刷平均流速 $v_{max}$ .....	356

附录 1(c)	人工加固工程的容许不冲刷平均流速 $v_{max}$	357
附录 1(d)	石质土的容许不冲刷平均流速 $v_{max}$	358
附录 1(e)	渠道的不冲容许流速 $v_{max}$ (m/s)	359
附录 2(a)	梯形渠道底宽 $b$ 求解图	360
附录 2(b)	梯形渠道正常水深 $h_0$ 求解图	361
附录 2(c)	梯形、矩形、圆形断面渠道临界水深求解图	362
附录 2(d)	无压圆涵管水跃共轭水深求解图	363
附录 3	桥位设计河段分类表	364
附录 4	各类河段上桥位总体布置的一般要求	366
附录 5	皮尔逊 III 型曲线的离均系数 值表	367
附录 6	三点适线法—— $S$ 与 $C_s$ 值关系表	369
附录 7	常用径流厚度 $h$ 值(简化公式用)	369
附录 8	土壤吸水类属	372
附录 9	暴雨分区各区范围	373
附录 10	植物(或洼地)滞留的径流厚度 $Z$ 值	374
附录 11	折减系数 值	374
附录 12	折减系数 值	375
附录 13	地貌系数 $\alpha$ 值	375
附录 14	折减系数 值	375
附录 15	墩形系数及桥墩计算宽度	375
主要参考书目		379

# 第一章 绪 论

## § 1-1 水力学与桥涵水文的性质与任务

水力学与桥涵水文课程是公路与城市道路、桥梁、交通工程专业的一门技术基础课,侧重介绍有关基本原理与方法,为专业课作前期基础理论应用训练及业务素质的培养。

公路桥涵是跨越河渠、宣泄洪水、沟通两侧灌溉水路及保证道路运行安全的泄水建筑物,其有关水力水文计算原理与方法则是本学科的任务。随着我国改革开放的深入,城镇建设日新月异,高等级立体交叉交通枢纽日益增多,高速公路的里程在迅速增长。本世纪末,我国还将建成贯穿全国的两纵两横国道主干线,这对路桥工程的等级及设计标准提出了新的要求,合理进行水力水文计算亦更具重要意义。

水力学和桥涵水文两大内容在学科方面各有独立的体系,但在理论应用方面却有较密切的关系。本书内容共三大部分:水力学、水文学及桥涵设计。水力学不但是桥涵孔径、管道渠道设计的基本理论,也是水文资料收集与整理的依据,而水文分析与计算的结果则是水力学理论计算必不可少的数据,水力水文计算结果则是桥涵布设与结构设计的依据。因此,三者组成了路桥及交通工程专业中学科建设的新体系,本书亦因此定名。

水力学属于物理学中力学的一个分支,它的任务是以水为模型研究液体平衡与运动的规律、侧重于演绎推导及原理方法的应用,在交通土建、市政工程、水利、环境保护、机械制造、石油工业、金属冶炼、化学工业等方面都有广泛的应用。总的说来,水力学的研究方法包含理论分析、实验验证与补充、并利用现代化的电子技术快速求解。

桥涵水文属于工程河川水文学范畴并独具专业性应用特点。它主要依靠数理统计分析方法,分析实地调查勘测的河川水文资料,预示桥涵工程可能遭遇的未来水文情势、为桥涵设计提供必不可少的设计数据。

## § 1-2 水力学的研究方法

水力学与桥涵水文两部分各有特点、方法各异。关于桥涵水文的研究方法待后详述,下面先介绍水力学的研究方法。总的说来,水力学的研究方法有三类,分述如下:

### 一、理论分析方法

从微观角度看,液体分子间有间距,但极小,在标准状态下,每立方厘米水体中约有  $3.3 \times 10^{22}$  个液体分子,相邻分子间的距离约为  $3 \times 10^{-8}$  cm,但对一般工程问题中所研究的空间尺寸来说,这一间距完全可以忽略不计,而要解决的工程问题只是液体大量分子运动的宏观特性。因此,1753年欧拉(Euler)采用了连续介质假说,即认为液体和气体充满一个空间时,分子间没

有间隙,是一种连续介质,其物理性质和运动要素都是连续分布的。在此基础上,一般还认为液体是均质的,其物理性质具有均匀等向性。而液体中的一“点”,实际上是微观上充分大,宏观上充分小的液体微团,并称之为液体质点。理论分析方法主要是对液体流动现象作物理描述,并建立液体运动的力学模型,以液体质点作对象,运动用机械运动的普遍规律建立液体运动的质量守恒、能量守恒、动量定律等微分方程,从中求解,以确立液体质点各水力要素(如压强、流速等)的空间分布。

## 二、实验方法

科学实验是自然科学发展的基础。水力学中的实验手段主要是验证和充实理论成果,对一些液体复杂运动特性通过一些经验系数加以粗化描述,运用一些经验公式以简化理论分析。常用的实验方法有:

### 1. 原型观测

所谓原型,即实际工程建筑物。原型观测可获得第一性资料,但规律性观测操作难度较大。

### 2. 模型试验

所谓模型,即按一定比例尺将原型缩小或放大的实物或工程建筑物。此法除可作验证理论的手段外,还可预演各种设计条件的结果,是水力学中不可缺少的常用手段。

## 三、数值计算法

此法利用当代电子技术进行快速计算,如有限差分法、有限元法等,它可求解理论分析所得极其复杂的数学模型(数学方程)、还可配合实验研究作数据监测、采集和处理。目前由此发展起来的数据实验和模拟计算已成为新型研究方法,开创了水力学研究的新途径。

## § 1-3 液体的主要物理性质

液体受力而作机械运动,其状况取决于自身的物理性质。从宏观角度研究的液体主要物理性质有:

### 一、质量和密度

物体中所含物质数量,称为质量,常用符号  $m$  表示;单位体积内所含液体的质量,称为液体的密度、常用符号  $\rho$  表示。按定义有

$$\begin{aligned} \text{均质液体} &= \frac{m}{V} \\ \text{非均质液体} &= \lim_{V \rightarrow 0} \frac{m}{V} = \frac{dm}{dV} \\ \text{一般} &= \rho(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中:  $V$ ——液体体积;

t——时间。

上式表明,液体的密度是空间坐标  $x, y, z$  的函数,而且可随时间过程而变化。一般情况,压强和温度对  $\rho$  的影响极小,而且不随时间变化。在理论分析和工程应用中都把液体看成是均质体,并取  $\rho = \text{Const}$ 。在一个标准大气压下,水的密度见表 1-1,水力计算中常取水的密度  $\rho = 1\text{g/cm}^3 = 1000\text{kg/m}^3$ 。

由表 1-1 可见,在标准大气压下,  $t = 4^\circ\text{C}$  时水的密度最大,  $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ ;  $t = 0^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$  时,密度变化很小,其密度只减小了 0.4%,但当  $t = 80^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$  时,其密度比  $4^\circ\text{C}$  时的密度减小可达 2.8%~4%。因此,在温差较大的热水循环系统中,应设膨胀接头或膨胀水箱以防管道或容器被水胀裂。此外,  $t = 0^\circ\text{C}$  时,冰的密度和水的密度不同。冰的密度  $\rho_{\text{冰}} = 916.7\text{kg/m}^3$ ,水的密度  $\rho_{\text{水}} = 999.87\text{kg/m}^3$ ,有

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

可见在  $t = 0^\circ\text{C}$  时,冰的体积比水约大 9%,故路基、水管、水泵及盛水容器等在冬季均需加防冰冻破坏措施。

## 二、重量和重度

液体所受地球的引力,称为重力,常用符号  $G$  表示;单位体积中的液体重力,称为重度,又称容重、重率,常用符号  $\gamma$  表示。按定义有

$$\text{均质液体} \quad \gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2a)$$

$$\text{非均质液体} \quad \gamma = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{G}{V} = \frac{dG}{dV} = \gamma(x, y, z, t) \quad (1-2b)$$

与密度情况类似,在水力计算中常把液体看成均质体,并取  $\gamma = \text{常数}(\text{Const})$ ,且有

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-3)$$

式中:  $g$ ——重力加速度,一般取  $g = 9.80\text{m/s}^2$ 。

在国际单位制中,质量单位为千克(kg),长度单位为米(m),时间单位为秒(s),力的单位为牛顿(N);在工程单位制中,重量单位为公斤力·秒<sup>2</sup>/米(kgf·s<sup>2</sup>/m),长度单位为米(m),时间单位为秒(s),力的单位为公斤力(kgf),有

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

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

按国际单位制,重度单位为  $\text{N/m}^3$ ,对于工程单位制,重度单位为  $\text{kgf/m}^3$  或  $\text{tf/m}^3$ 。一般情况,压强和温度对重度的影响极小,而且不随时间变化,理论分析和工程应用中,都把水看成为均质体,因而取  $\gamma = \text{Const}$ ,水力计算中常取水的重度  $\gamma = 9800\text{N/m}^3 = 9.8\text{kN/m}^3$ ,水银的重度  $\gamma_{\text{p}} = 133.28\text{kN/m}^3$ 。按工程单位制,水的重度为  $\gamma = 1000\text{kgf/m}^3 = 1\text{tf/m}^3$ 。在一个标准大气压下,不同温度时纯水的重度见表 1-1,几种常见液体的重度见表 1-2,国际单位制与工程单

位制的换算关系见表 1-3。

不同温度下纯水的物理特性

表 1-1

t ( )	(kN/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	$\mu \times 10^3$ (Pa·s)	$\times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	P <sub>s</sub> (kPa)	(N/m)	E × 10 <sup>-6</sup> (kPa)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	0.61	0.0756	2.02
4	9.800	1000.0	1.567	1.567	—	—	—
10	9.804	999.7	1.307	1.306	1.23	0.0742	2.1
15	9.798	999.1	1.139	1.139	1.70	0.0735	2.15
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.34	0.0728	2.18
25	9.777	997.0	0.890	0.893	3.17	0.0720	2.22
30	9.746	995.7	0.798	0.800	4.24	0.0712	2.25
40	9.730	992.2	0.653	0.658	7.38	0.0696	2.28
50	9.689	988.0	0.547	0.553	12.33	0.0679	2.29
60	9.642	983.2	0.466	0.474	19.92	0.0662	2.28
70	9.589	977.8	0.404	0.413	31.16	0.0644	2.25
80	9.530	971.8	0.354	0.364	47.34	0.0626	2.20
90	9.466	965.3	0.315	0.326	70.10	0.0608	2.14
100	9.399	958.4	0.282	0.294	101.33	0.0589	2.07

注：t——水温；——重度；——密度； $\mu$ ——动力粘度；——运动粘度；P<sub>s</sub>——汽化压强；——表面张力；E——体积弹性模量。

几种常见液体的重度

表 1-2

名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
t( )	20	0	15	15	20	15
(kN/m <sup>3</sup> )	0.01182	133.28	6.664 ~ 7.35	7.7783	15.6	9.996 ~ 10.084

国际单位制与工程单位制换算关系

表 1-3

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 <sup>2</sup> /米(kgf·s <sup>2</sup> /m)	1kgf·s <sup>2</sup> /m = 9.8kg 1kg = 0.102kgf·s <sup>2</sup> /m
密度	千克每立方米(kg/m <sup>3</sup> )	公斤力·秒 <sup>2</sup> /米 <sup>4</sup> (kgf·s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> )	1kgf·s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> = 9.8kg/m <sup>3</sup> 1kg/m <sup>3</sup> = 0.102kgf·s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup>
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 <sup>2</sup> ) 1Pa = 1N/m <sup>2</sup>	公斤力/米 <sup>2</sup> (kgf/m <sup>2</sup> ) 公斤力/厘米 <sup>2</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	1kgf/cm <sup>2</sup> = 9.8kPa 1kgf/cm <sup>2</sup> = 9.8N/cm <sup>2</sup>

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
-----	--------------------------------------	-------------	------------------------------------

续上表

物 理 量	国际单位制和符号	工程单位制和符号	换 算 关 系
功率	瓦 (W) 1 千瓦 (kW) = 1000 W 1 焦[耳] 每秒 (J/s) = 1 W	公斤力·米/秒 (kgf·m/s) 马力 (HP)	1kgf·m/s = 9.8 W 1kW = 102kgf·m/s 1HP = 75kgf·m/s
动力粘度	1 帕[斯卡]秒 (Pa·s) 1Pa·s = 1N·s/m <sup>2</sup>	泊 (P) 公斤力·秒/米 <sup>2</sup> (kgf·s/m <sup>2</sup> )	1P = 10 <sup>-1</sup> Pa·s 1kgf·s/m <sup>2</sup> = 9.80665Pa·s
运动粘度	平方米每秒 (m <sup>2</sup> /s)	斯托克斯, 斯 (St) 平方厘米每秒 (cm <sup>2</sup> /s) 1St = 1cm <sup>2</sup> /s	1St = 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s

### 三、易流动性与粘滞性

静止时,液体不能承受切力、抵抗剪切变形的特性,称为易流动性,在运动状态下,液体所具有抵抗剪切变形的能力,称为粘滞性。在剪切变形过程中,液体质点间存在着相对运动,使液体不但在与固体接触的界面上存在切力,而且使液体内部的流层间也会出现成对的切力,此称为液体内摩擦力。它是液体分子间动量交换和内聚力作用的结果。当温度增高时,液体分子间距增大,内聚力小,而动量交换对,液体的粘性作用不大,因此液体的粘滞性随温度升高而减小;气体也有粘滞性,当温度升高时动量加剧,因而粘滞性将随温度升高而增大。通常压强对粘滞性的影响不大,可以忽略不计。由于液体中存在粘滞性,运动液体需要克服内摩擦力做功,因此它也是运动液体机械能损失的根源。

1686年,牛顿(Newton),通过著名的平板实验,发现了流体的粘滞性,提出了牛顿内摩擦定律。

牛顿的平板实验装置如图 1-1a)所示。它由两平行平板组成,其间距为  $h$ ,其中充满了液

图 1-1

体,上板可作平行滑动,下板固定不动。上板受力  $F$  后可作水平方向滑动,当上板出现匀速运动时,显然,应有  $F = T$ ,此处  $T$  为液层间的内摩擦力,其隔离体如图 1-1b)所示,因此,液体的内摩擦力  $T$  可以通过外加力  $F$  的大小测得。当上板以匀速  $U$  作水平滑动时,紧贴板面的液体将随板作同样速度运动。实验得出,当  $U$  不大时,沿  $y$  轴方向液体中各点流速  $u$  一般呈线性分布(如图 1-1c)所示):有

$$u(y) = \frac{u}{h}y \quad (1-4)$$

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

设平板面积为  $A$ , 牛顿实验得出液体内摩擦力关系有

$$\tau = \frac{Au}{h}$$

由此有

$$\tau = \mu A \frac{u}{h} = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

$$= \frac{\tau}{A} = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{u}{h}$$

式中:  $\tau$ ——液体内摩擦切应力;

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

$\mu$ ——动力粘度, 又称绝对粘度或动力粘滞系数, 其单位为: 帕斯卡·秒, 即  $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$  或  $\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s}$ 。  $1 \text{Pa} \cdot \text{s} = 10$  泊。

公式(1-5)即牛顿内摩擦定律。在水力计算中,  $\mu$  与  $\nu$  常在同一公式中出现, 为简化计, 有

$$\mu = \nu \rho \quad (1-6)$$

式中:  $\nu$ ——液体的运动粘度, 又称粘滞运动系数, 其单位为米<sup>2</sup>/秒 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )。

水的运动粘度可按泊肃叶 (Poiseuille) 公式计算

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

式中:  $t$ ——水温,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\nu$ ——运动粘度,  $\text{cm}^2/\text{s}$ 。

由公式(1-5)可知:

当  $u = 0$  (静止液体),  $u = \text{Const}$  (无相对运动液体) 时,  $\frac{du}{dy} = 0$ ,  $\tau = 0$ 。考虑了液体的粘性后, 将使液体运动的理论分析变得十分复杂。在水力学中, 为了简化分析, 常暂不考虑液体的粘性, 先建立液体运动的物理数学模型, 而后通过实验对所得理论结果加以修正。这也是水力学研究的基本方法。

没有粘滞性的液体, 称为理想液体。它是一种假想的物理模型。在理想液体模型中,  $\mu = 0$ 。存在粘滞性的液体, 称为实际液体, 即真实的液体。此外, 具有粘滞性的液体还有多种类型。凡  $\tau$  与  $\frac{du}{dy}$  呈过原点的正比例关系的液体, 称为牛顿液体。凡与牛顿内摩擦定律不相符的液体, 称为非牛顿液体。一些多分子结构简单的液体, 如水、酒精、苯、各种油类、水银和一般气体多属于牛顿液体。泥浆、血浆、重水中悬浮核燃料颗粒而形成的流体, 胶溶液、橡胶、纸浆、血液、牛奶、水泥浆、石膏溶液、油漆、高分子聚合物溶液等均属非牛顿流体。本书所讨论的液体限于牛顿流体。

例 1-1 如图 1-2 所示, 其轴承的  $D = 10\text{cm}$ , 长  $L = 8\text{cm}$ , 转轴外径  $d = 9.96\text{cm}$ , 轴间润滑油的动力粘度  $\mu = 0.16\text{Pa} \cdot \text{s}$ , 转速  $n = 1000\text{r}/\text{min}$ 。求转轴所受的扭矩  $M$ 。

解: 转轴与轴承的间隙很小, 可认为流速近似于直线分布。其中

转轴的线速度 
$$U = \frac{nd}{60} = \frac{1\,000 \times 9.96}{60}$$

$$= 521.5 \text{ cm/s}$$

转轴与轴承间隙 
$$\frac{D-d}{2} = \frac{10 - 9.96}{2} = 0.02 \text{ cm},$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{U}{h} = \frac{521.5}{0.02}$$

图 1-2

$$= \mu \frac{du}{dy} = \mu \cdot \frac{U}{h} = 0.16 \cdot \frac{521.5}{0.02} = 4172 \text{ Pa}$$

$$M = \rho \cdot d \cdot L \cdot \frac{d}{2} = 4172 \times \frac{0.0996^2}{2} \times 0.08$$

$$= 5.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

#### 四、压 缩 性

液体宏观体积可随压强增大而减小的特性,称为压缩性,解除外力后又能恢复原状的特性,称为弹性。

液体的压缩性和弹性,常用压缩系数  $\beta$  和弹性系数  $E$  表示:

$$\beta = - \frac{\frac{dV}{V}}{dp} = - \frac{d}{dp}$$

(1-8)

$$E = \frac{1}{\beta} = - \frac{dp}{\frac{dV}{V}}$$

式中:  $\beta$ ——压缩系数 ( $\text{m}^2/\text{N}$ );

$E$ ——弹性系数;

$\rho$ ——液体密度;

$V$ ——液体体积;

$p$ ——外加压强。

$\beta$  值越大,液体越易压缩,  $E$  值越大,液体越不易压缩。同一种液体的  $\beta$  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。因  $dV$  与  $dp$  的符号相反,为使  $\beta$  和  $E$  保持正值,故式中引入“-”号。

如表 1-1,水的弹性系数  $E = 2.1 \times 10^6 \text{ Pa}$ ,若  $dp = 1 \text{ Pa}$  ( $\text{Pa}$ ——工程大气压,  $1 \text{ Pa} = 98 \text{ kN/m}^2$ ) 则有

$$\frac{dV}{V} = - \frac{dp}{E} = - \frac{98}{2.1 \times 10^6} = - \frac{1}{20000}$$

即此时水的体积压缩量只有两万分之一,因此除水击现象等特殊情况需要考虑水的压缩性外,一般工程的水力计算均忽略水的压缩性。

通常,在水力学中,常把液体看成为不可压缩的,并以不可压缩液体作为简化理论分析的

物理模型。

## 五、气化特性和表面张力

液体分子逸出液面向空间扩散的现象,称为气化。沿液体自由表面,液体分子引力所产生的张力,称为表面张力。

液体气化为蒸气,蒸气凝结又可成为液体,其中凝结是气化的逆过程。在液体中,气化和凝结同时存在,当这两个过程达到动态平衡时,宏观气化现象随之停止,此时液体的绝对压强(即液体中的实有压强)称为气化压强或饱和蒸气压强,常用  $p_s$  表示。液体的气化压强与温度有关。水的气化压强见表 1-1。液体发生气化的条件是

$$p_{abs} = p_s \quad (1-9)$$

式中:  $p_{abs}$ ——液体中某处的绝对压强;

$p_s$ ——气化压强。

液体气化,不但可发生在液面,而且也可以发生在液体内部。液体气化即在其内部出现气体空泡,又称为空泡或空化现象,它可造成虹吸管真空条件破坏而中断流动,也可造成水泵工作破坏、对固体边壁产生破坏性的气蚀现象及引起建筑物震动等。因此,预防气化出现则是水力计算的问题之一。

表面张力常用表面张力系数  $\sigma$  来度量。单位长度的表面张力,称为表面张力系数,其单位为  $N/m$ ,它随液体种类和温度而变化。水的表面张力系数,当  $t=20$  时,  $\sigma=0.074 N/m$  详见表 1-1;水银,  $\sigma=0.54 N/m$ 。

表面张力的作用是使液面拉紧,促使体积很小的液体形成球状液滴。它的作用不但可发生在气体与液体分界的自由表面,也可发生在不同液体相接触的界面处,还可发生在液体与固体接触的界面上。表面张力可导致液体内部产生附加压强,对于一些实验装置不可忽视。例如,水银内聚力大于附着力,在玻璃测压管中,呈上凸的弯曲自由表面,表面张力产生的附加压力指向其内部,方向向下,使管内外出现高差  $h$ ,管内水银面低于管外,如图 1-2a)所示;水的内聚力小于附着力,在玻璃测压管中,呈下凹的弯曲自由表面,表面张力的附加压力指向液面外法向,方向向上,因而可使管中液面高于管外液面并出现液面差  $h$ ,如图 1-2b)所示。土壤、岩石裂隙及细玻璃管中的毛细现象都是水的表面张力作用的结果。实验得出,对于  $t=20$  的水及水银,测压管内外的液面差有

$$\begin{aligned} \text{水} \quad h &= \frac{29.8}{d} \\ \text{水银} \quad h &= \frac{10.15}{d} \end{aligned} \quad (1-10)$$

式中:  $d$ ——管径,  $mm$ ;

$h$ ——管内外液面高差  $mm$ (见图 1-3 所示)。

上式表明,若测压管的直径  $d$  过小,将使读数出现较大的偏差,通常应选用  $d \geq 10mm$ 。

一般土木工程问题,由于表面张力很小,而且它只在液体界面上起作用,液体内部并不存在其作用,因此常忽略不计。但在研究雨滴的形成,水舌簿而曲率大的过堰水流(见第七章)以及波长较小(小于  $4cm \sim 7cm$ )的微幅波运动中,表面张力的影响不可忽略。

## § 1-4 作用在液体上的力

由前可知,分析液体微元隔离体的平衡或运动规律,并从中建立基本方程,这是水力学的基本研究手段。所谓作用在液体上的力,即作用在隔离体上的外力。

图 1-3

按力的物理性质区分可有粘性力、重力、惯性力、弹性力和表面张力等,按力的作用特点区分可有质量力和表面力两类。

### 一、质量力

作用在液体每一质点上,其大小与受作用液体质量成正比例的力,称为质量力。在均质液体中,质量与体积成正比,则此时的质量力必与液体体积成正比,故又称体积力。水力学中常遇的质量力有重力和惯性力。

设液体的质量为  $m$ , 加速度为  $a$ , 则其所受质量力有

$$\begin{aligned} F_1 &= - m a \\ F_2 &= - m g \end{aligned} \quad (1-11)$$

式中:  $g$ ——重力加速度。

上式表示液体所受的质量力与加速度  $a$  或重力加速度  $g$  的方向相反。水力学中隔离体外力常采用单位质量力  $f$  作受力分析。设液体所受质量力为  $F$ , 质量为  $m$ , 则

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-12)$$

设  $F$  在三坐标轴方向的分量为  $F_x, F_y, F_z$ , 则有

$$\begin{aligned} f &= \frac{F}{m} = X i + Y j + Z k \\ X &= \frac{F_x}{m} \\ Y &= \frac{F_y}{m} \\ Z &= \frac{F_z}{m} \end{aligned} \quad (1-13)$$

式中:  $i, j, k$ ——单位矢量;

$X, Y, Z$ —— $f$  在三坐标轴方向的分量。

单位质量力  $f, X, Y, Z$  的单位与加速度单位相同, 即  $[m/s^2]$ 。对于只受重力作用的液体, 称为重力液体, 有

$$X = Y = 0, \quad Z = - g$$

### 二、表面力

作用于液体隔离体表面上的力, 称为表面力。按液体的物理性质, 液体界面上的拉力可以

忽略不计,只有压力和切力两类。它是相邻液体或固体边壁与隔离体界面间相互作用的结果。按连续介质假说,表面力应连续分布在隔离体表面上,由于液体不能承受集中力,对隔离体表面某点所受的外力,只能用应力形式表示,即

$$\begin{aligned} p &= \lim_0 \frac{P}{A} = \frac{dP}{dA} \\ &= \lim_0 \frac{T}{A} = \frac{dT}{dA} \end{aligned} \quad (1-14)$$

式中:  $p$ ——某点压强,又称为某点的水压力;

$A$ ——受压面积或受剪切面积;

$P$ ——面积  $A$  上所受总压力;

$T$ ——面积  $A$  上所受的切力;

——某点切应力。

由此可知,液体的平衡与运动状态只是上述质量力与表面力相互作用的结果。显然,在静止液体或无相对运动的液体中,  $\rho = 0$ , 此时作用于隔离体表面的表面力只有压力。

压强及切应力的基本单位与应力相同,即帕斯卡(Pa),简称“帕”。在国际单位制(SI)中

$$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$$

在工程单位制中,压强和切应力的单位为  $[\text{kgf}/\text{m}^2]$ 。

## 习 题

1-1 水力学为什么侧重于演绎推理方法,桥涵水文为什么侧重于统计分析方法?

1-2 水力学对液体作了哪些物理模型化假设?

1-3 液体内摩擦力有哪些特性?什么情况下需要考虑内摩擦力的影响?

1-4 如习题 1-4 图所示,其套筒内径  $D = 12\text{cm}$ , 活塞外径  $d = 11.96\text{cm}$ , 活塞长  $L = 14\text{cm}$ , 润滑油动力粘度  $\mu = 0.172\text{Pa}\cdot\text{s}$ , 活塞往复运动速度(匀速)  $U = 1\text{m}/\text{s}$ , 求作用于活塞杆上的力  $F$ 。

习题 1-4 图

1-5 设水温  $t = 30^\circ\text{C}$ , 求 1L 水的质量和重量。

1-6 已知 500L 水银的质量为 6795kg, 求水银的密度和重度。

1-7 水温从  $t = 5^\circ\text{C}$  升高到  $100^\circ\text{C}$ , 求水的体积将比原有体积增加百分之几?

1-8 设水的重度  $\gamma = 9.71\text{kN}/\text{m}^3$ , 动力粘度  $\mu = 0.599 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ , 求其运动粘度。

1-9  $t = 0^\circ\text{C}$  时, 冰的密度  $\rho_{\text{冰}} = 916.7\text{kg}/\text{m}^3$ , 其体积比同样温度下水的体积大还是小? 其二者体积比为多少?

1-10 封闭容器盛水从空中自由下落时, 求液体所受单位质量力  $X, Y, Z$ 。

1-11 底面积为  $(40 \times 45)\text{cm}^2$  的矩形平板, 质量  $m$

习题 1-11 图