

道路与桥梁工程技术专业实用创新系列图书

# 水力学与桥涵水文

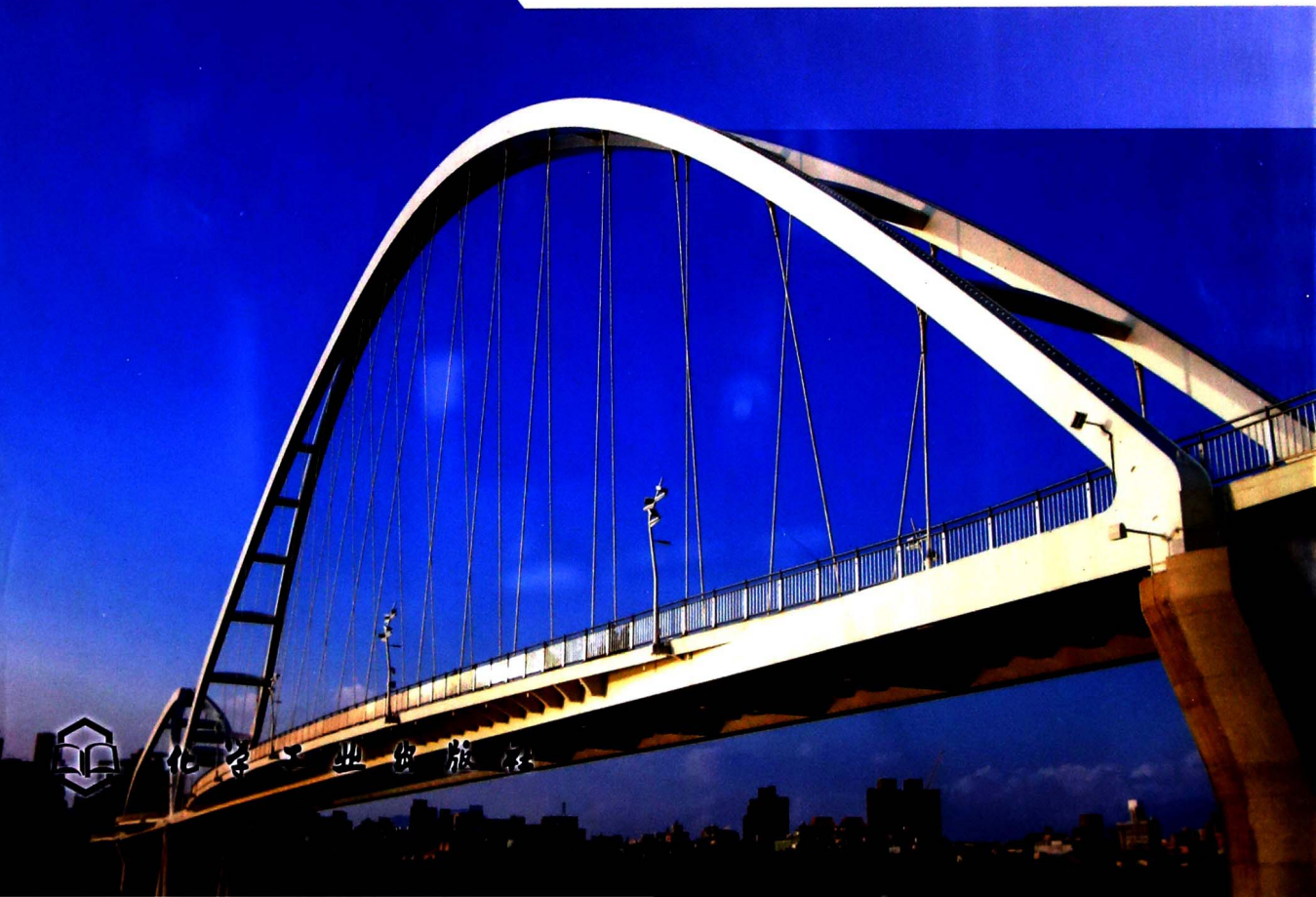
SHUILIXUE YU QIAOHAN SHUIWEN



许珊珊 主编 高伟 主审



化学工业出版社



道路与桥梁工程技术专业实用创新系列图书

# 水力学与桥涵水文

许珊珊 主编  
高 伟 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书根据高等学校土木工程专业应用型本科教学的要求,以土木工程专业(道路与桥梁工程方向)的《水力学与桥涵水文》课程讲授内容为主进行编写,是道路与桥梁专业的通用教材。

本书共分为十二章,主要内容包括水力学和桥涵水文两大学科体系,主要讲述了水静力学、水动力学基础、水流阻力与水头损失、明渠水流、堰流与闸孔出流、河川水文基础知识、水文统计的基本原理与方法、桥涵设计流量及水位推算、大中桥孔径设计、桥梁墩台冲刷计算、小桥涵勘测设计等内容。

本书按照我国最新颁布的相关规范来编写,可作为普通高等院校应用型本科道路与桥梁专业的教材,亦可供水力学与桥涵水文学科研、设计、施工等方面的工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

水力学与桥涵水文/许珊珊主编. —北京:化学工业出版社, 2015.7

(道路与桥梁工程技术专业实用创新系列图书)

ISBN 978-7-122-23843-6

I. ①水… II. ①许… III. ①水力学-高等学校-教材  
②桥涵工程-工程水文学-高等学校-教材 IV. ①TV13  
②U442.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第090876号

---

责任编辑:彭明兰

装帧设计:刘丽华

责任校对:吴静

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张14 字数366千字 2015年10月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价: 39.80 元

版权所有 违者必究

# 前言

---

《水力学与桥涵水文》是土木工程专业（交通土建工程方向）的一门重要的专业基础课，课程横跨水力学、水文学、桥梁工程等多个学科。本书根据该课程特点，主要介绍了与桥涵工程相关的水力学和水文学基础知识、基本计算及工程应用。

本书参照《高等教育面向 21 世纪教育内容和课程体系改革计划》，按照应用型本科院校培养目标的要求，突出了以道路与桥梁工程类应用型人才为培养目标的指导思想，在编写中坚持与时俱进的理念，引用最新颁布的技术标准和技术规范的有关规定。

本书将水力学与桥涵水文两门课程合二为一，科学地选择课程理论体系，增强专业教学的针对性，特别强调理论知识的应用部分，加强了水力学与桥涵水文两大部分的有机衔接。全书共十二章，编写中对复杂的知识点进行了整理凝练，力求重点突出、层次分明。在各章后对主要知识点进行归纳总结，并列出示考题。本书篇幅较大，作为教材使用时，相关专业的任课教师可根据教学计划选择合适的内容。

本书的编写参阅了相关资料和一些院校优秀教材的相关内容，均在文献中列出，同时也得到了有关老师的大力支持并且也收到了很多宝贵的修改意见，使得章节安排更具逻辑性和科学性。在此，作者一并表示深深的谢意。

全书的第 1 章、第 7 章由黑龙江建筑职业技术学院高秋生编写；第 2 章、第 6 章由北华航天工业学院周建华编写；第 3 章、第 4 章和 8.1~8.3 节由黑龙江科技大学许珊珊编写；第 5 章、第 9 章中 9.1 节和 9.2 节由哈尔滨职业技术学院李维维编写；第 9 章中 9.3 节和 9.4 节由黑龙江省林业设计研究院交通勘察设计院张晓佳编写；第 10 章、第 11 章、12.1 节和 12.2 节由黑龙江东方学院李军卫编写；第 8.4~8.6 节由北华航天工业学院王玉洁编写；第 12.3~12.5 节由哈尔滨石油学院张佰真铭编写。

由于编者的学识及知识水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2015 年 6 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 课程的性质与任务	1
1.2 液体的主要物理性质	1
1.3 作用在液体上的力	6
1.4 液体的力学模型	6
小结	7
习题	7
<b>第 2 章 水静力学</b>	<b>8</b>
2.1 静水压强及其特性	8
2.2 静水压强分布规律	10
2.3 作用在平面壁上的静水总压力	15
2.4 作用在曲面壁上的静水总压力	19
小结	22
习题	22
<b>第 3 章 水动力学基础</b>	<b>25</b>
3.1 描述液体运动的两种方法	25
3.2 欧拉法的几个基本概念	27
3.3 恒定流连续性方程	30
3.4 恒定流的能量方程	32
3.5 恒定流的动量方程	39
小结	42
习题	43
<b>第 4 章 水流阻力与水头损失</b>	<b>45</b>
4.1 水流阻力与水头损失概念	45
4.2 液体运动的两种流动形态及判别	45
4.3 沿程水头损失计算	49
4.4 圆管沿程阻力系数	51
4.5 局部水头损失计算	55
小结	57
习题	57
<b>第 5 章 明渠水流</b>	<b>59</b>
5.1 明渠均匀流的水力特性和基本公式	59

5.2	明渠均匀流水力计算基本问题	66
5.3	明渠非均匀流	71
5.4	明渠流干扰微波传播特性及两种流态	73
5.5	临界水深及临界底坡	76
5.6	明渠急变流	80
5.7	棱柱体明渠中恒定非均匀渐变流水面曲线分析	86
5.8	明渠渐变流水面曲线的计算	89
	小结	92
	习题	92
<b>第6章</b>	<b>堰流与闸孔出流</b>	<b>94</b>
6.1	堰的类型	94
6.2	宽顶堰水力计算	95
6.3	闸孔出流	99
6.4	泄水建筑物下游的衔接与消能	101
	小结	102
	习题	103
<b>第7章</b>	<b>河川水文基础知识</b>	<b>104</b>
7.1	河流及流域	104
7.2	泥沙运动和河床演变	110
7.3	水文资料的收集与整理方法	115
	小结	121
	习题	121
<b>第8章</b>	<b>水文统计的基本原理与方法</b>	<b>122</b>
8.1	水文现象的特征与分析方法	122
8.2	水文统计的基本概念	123
8.3	经验频率曲线与几率格纸	125
8.4	理论频率曲线与统计参数	127
8.5	现行频率分析方法	132
8.6	抽样误差	139
	小结	141
	习题	142
<b>第9章</b>	<b>桥涵设计流量及水位推算</b>	<b>143</b>
9.1	桥涵分类及一般规定	143
9.2	按实测流量资料推算	144
9.3	无实测资料的流量推算	144
9.4	按暴雨资料推算	148
	小结	158
	习题	158
<b>第10章</b>	<b>大中桥孔径设计</b>	<b>159</b>

10.1	桥位勘测与选择	159
10.2	桥孔布设原则	162
10.3	大中桥孔径计算	167
10.4	桥面标高的设计与计算	171
	小结	181
	习题	181
<b>第 11 章</b>	<b>桥梁墩台冲刷计算</b>	<b>182</b>
11.1	墩台冲刷类型	182
11.2	桥下断面一般冲刷深度	183
11.3	墩台局部冲刷深度	185
11.4	桥下河槽最低冲刷线	193
	小结	197
	习题	198
<b>第 12 章</b>	<b>小桥涵勘测设计</b>	<b>199</b>
12.1	小桥涵的分类与特点	199
12.2	小桥涵勘测	201
12.3	小桥孔径计算	202
12.4	涵洞孔径计算	208
12.5	小桥和涵洞出口处理	212
	小结	217
	习题	217
<b>参考文献</b>		<b>218</b>

# 第1章

## 绪论

### 1.1 课程的性质与任务

《水力学与桥涵水文》是道路与桥梁工程、交通土建工程专业的一门专业基础课，侧重介绍有关水力学的基础原理与方法、桥涵水文要素的分析与计算，从而为专业课学习作前期理论应用训练及业务素质的培养，为今后从事道路桥梁设计工作提供理论基础和设计依据。

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。具体的要求是：掌握确定公路过水建筑物结构的水力荷载、输水能力的计算方法；熟悉野外水文调查与形态勘测的具体方法；掌握在不同情况下推求桥涵断面的设计流量的基本理论和方法；了解合理选择桥位的原则；掌握确定桥孔长度、桥面最低高程、最大冲刷线高程及墩台基底埋置深度的基本理论和方法；了解配置相应的调治构造物的原则；掌握确定小桥、涵洞孔径的计算方法。

水力学是研究水的平衡和运动规律及其实际应用的一门技术科学，是力学的一个分支。同时它是许多工程实践的基础，例如，水利枢纽的设计、港口设计、航道设计、洪峰预测、河流泥砂、城市供水系统中管路布置、水泵选择等问题，都需要运用水力学的知识。桥涵水文是指水力水文知识在公路桥涵设计中的具体应用，主要包含有桥涵位置的选择、孔径大小的计算、桥面最低高程和基础底面埋置深度的确定以及相应配置的调治构造物和陡坡过水建筑物设计等问题。

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。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理论依据，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，二者组成了路桥及交通工程专业中学科建设的新体系。

### 1.2 液体的主要物理性质

物体运动状态的改变都是受外力作用的结果。分析研究液体的运动规律，也要从分析液体的受力状况着手，而任何一种力的作用，都要通过液体自身的性质来表现，外因是变化的条件，内因是变化的根据。所以在研究液体运动规律之前，首先讨论液体（主要是水）的主要物理性质。



### 1.2.1 质量与密度

质量是物质的基本属性之一，是物体惯性大小的量度，常用符号“ $m$ ”表示。质量愈大，惯性愈大，运动状态愈难改变。单位体积液体的质量称为密度，以 $\rho$ 表示，单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。对于均质液体，设其体积为 $V$ ，质量为 $m$ ，则密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

对于非均质液体，密度随各点而异。在液体中取包含某点在内的微小体积 $\Delta v$ ，该体积内液体的质量为 $\Delta m$ ，则该点液体的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta v} = \frac{dm}{dv}, \quad \rho = \rho(x, y, z, t) \quad (1.2)$$

上式表明，液体的密度是空间坐标 $(x, y, z)$ 的函数，并随时间过程而变化。

液体的密度随温度和压强的变化而变化。通常由于其变化甚微，在实际计算中可视为常数。水力学中以在一个标准大气压下，温度为 $4^\circ\text{C}$ 时的水的最大密度 $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ 作为计算值。在不同温度下水的密度见表 1.1。由表中可知，温度在 $0 \sim 30^\circ\text{C}$ 之间，其密度较 $4^\circ\text{C}$ 时只减小 $0.4\%$ ；但当温度在 $80 \sim 100^\circ\text{C}$ 之间，其密度较 $4^\circ\text{C}$ 时减小 $2.8\% \sim 4\%$ 。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止管道被水胀裂。此外，当温度为 $0^\circ\text{C}$ 时，冰的密度 $\rho_{\text{冰}} = 916.7\text{kg}/\text{m}^3$ ，水的密度 $\rho_{\text{水}} = 999.9\text{kg}/\text{m}^3$ ，二者的密度不同，冰的体积比水的体积约大 $9\%$ ，故路基、水管、水泵等在冬期温度过低时应增加防冰冻措施。

表 1.1 不同温度下水的物理性质（在一个标准大气压下）

水温 $t$ / $^\circ\text{C}$	密度 $\rho$ / $(\text{kg}/\text{m}^3)$	重度 $\gamma$ / $(\text{kN}/\text{m}^3)$	动力黏度 $\mu$ / $(10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s})$	运动黏度 $\nu$ / $(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	体积弹性系数 $k$ / $(10^9\text{N}/\text{m}^2)$	表面张力系数 $\sigma$ / $(\text{N}/\text{m})$
0	999.9	9.799	1.787	1.787	2.04	0.0762
4	1000.0	9.800	1.568	1.568	—	—
10	999.7	9.797	1.304	1.304	2.11	0.0748
15	999.1	9.798	1.137	1.138	2.14	0.0741
20	998.2	9.783	1.002	1.004	2.20	0.0736
25	997.0	9.777	0.891	0.894	2.22	0.0726
30	995.7	9.758	0.789	0.802	2.23	0.0718
40	992.2	9.724	0.654	0.659	2.27	0.0701
50	988.1	9.683	0.548	0.554	2.30	0.0682
60	983.2	9.636	0.467	0.475	2.28	0.0668
70	977.8	9.589	0.405	0.414	2.25	0.0650
80	971.8	9.524	0.355	0.366	2.21	0.0630
90	965.3	9.466	0.316	0.327	2.16	0.0612
100	958.4	9.392	0.283	0.295	2.07	0.0594

### 1.2.2 重量和重度

地球对地球表面附近物体的引力称为重力，常用符号 $G$ 表示。重力的大小称为重量，一质量为 $m$ 的液体，所受重力的大小为：

$$G = mg \quad (1.3)$$

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

单位体积液体所具有的重量，称为重度，又称容重。用  $\gamma$  表示，其单位为  $\text{N/m}^3$ 、 $\text{kN/m}^3$ 。对某一重量为  $G$ ，体积为  $V$  的均质液体，其容重为

$$\gamma = G/V \quad (1.4)$$

根据式(1.3)和式(1.4)可得：

$$\gamma = \rho g \quad \text{或} \quad \rho = \gamma/g$$

不同液体的容重是不相同的，几种常见液体的重度如表 1.2 所示。

表 1.2 几种常见液体的重度 (标准大气压下)

名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
测定温度 $t/^\circ\text{C}$	20°	0°	15°	15°	20°	15°
重度 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	0.01182	133.28	6.664~7.35	7.7783	15.6	9.996~10.084

### 1.2.3 易流动性与黏滞性

液体具有易流动性，对于像水这样的液体，不论多么微小的切向作用力作用于静止液体时，其原来的静止状态将被破坏而开始变形，即开始流动。但是当液体一旦流动时，液体分子间的作用力立即显示为对流动的阻抗作用，即显示出所谓的黏滞性阻力。液体的这种阻抗变形运动的特性称为黏滞性。

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边壁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剪切力，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，内聚力变小，而动量交换时，液体的黏性作用不大，因此液体的黏滞性随温度升高而减小；由于液体中存在黏滞性，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，牛顿通过著名的平板实验，发现了液体的黏滞性，提出了牛顿内摩擦定律。

牛顿的平板实验装置如图 1.1(a) 所示。它由两平行平板组成，其间距为  $h$ ，其中充满了液体，上板可作平行滑动，下板固定不动。上板受力  $F$  后可沿水平方向滑动，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 1.1(b) 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 1.1(c) 所示]，有

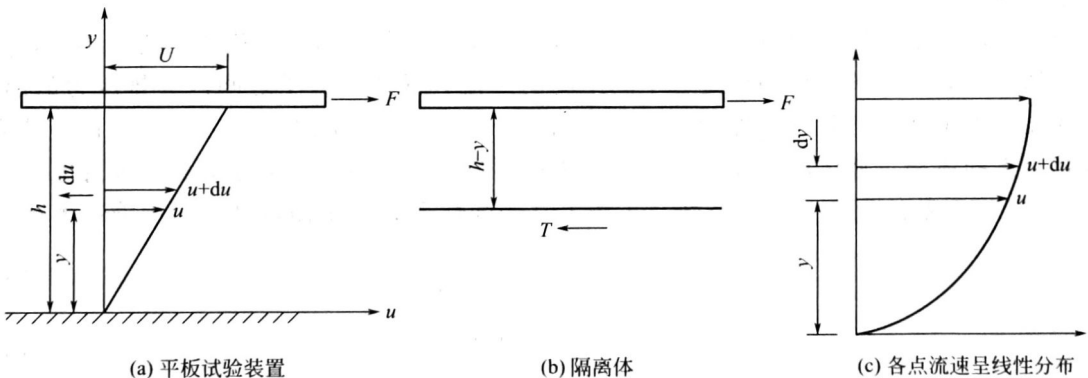


图 1.1 牛顿平板试验

$$\left. \begin{aligned} u(y) &= \frac{U}{h}y \\ \frac{du}{dy} &= \frac{U}{h} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

设平板面积为  $A$ ，牛顿实验得出液体内摩擦力的数学表达式为：

$$\left. \begin{aligned} T &= \mu A \frac{U}{h} = \mu A \frac{du}{dy} \\ \tau &= \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{U}{h} \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

式中  $\tau$ ——黏性切应力，是单位面积上的内摩擦力；

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

$\mu$ ——动力黏度，又称绝对黏度或动力黏滞系数， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

式(1.5)、式(1.6)称为牛顿内摩擦定律。它可以表述为：做层流运动的液体，相邻液层间单位面积上所作用的内摩擦力（或黏滞力），与流速梯度成正比，同时与液体的性质有关。

在水力计算中， $\mu$  与  $\rho$  常以比值的形式出现，将其定义为液体的运动黏度  $\nu$ 。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.7)$$

$\nu$  亦反应液体黏滞性大小，因其量纲中含有运动学的量纲，故称为运动黏滞性系数，单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ 。液体的  $\mu$  和  $\nu$  值与液体的种类和温度有关。在一个标准大气压下，水在不同温度时的运动黏滞性系数见表 1.1。

液体在流动过程中，黏滞力做功不断消耗机械能，这种液流机械能的消耗称为液流的能量损失。因此，黏滞性是引起液体能量损失的主要根源，相关问题将在本书第 4 章中论述。

在分析水力学问题时，为了简化起见，有时不考虑液体黏滞性的影响， $\mu=0$  的液体称为无黏滞性液体。无黏滞性液体实际上是不存在的，它只是一种简化的力学模型。这种假想无黏滞性的液体称为理想液体，而具有黏滞性的液体则称为实际液体。分析理想液体所获得的研究成果可作为进一步探讨实际液体运动规律的手段，我们将这种处理方法称之为理想液体假定。

#### 1.2.4 压缩性与膨胀性

液体受压，体积缩小，密度增大的性质，称为液体的压缩性。液体受热，体积膨胀，密度减小的性质，称为液体的膨胀性（亦称热胀性）。

液体不能承受拉力，但可以承受压力。液体分子间的距离与气体相比是比较小的，当对液体施加压力时，体积的压缩也是分子间距离的缩短，导致了分子之间巨大排斥力的出现，并和外加压力维持平衡状态，外加力一旦取消，分子立即恢复原来的相互距离，即液体立即恢复其原来的体积。液体的压缩性用单位压强所引起的体积变化率表示，称为压缩系数，以  $\beta$  表示。压缩系数的倒数为弹性系数，工程上常用弹性系数  $k$  来衡量液体的压缩性大小。

$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{dV}{Vdp} \quad (1.8)$$

$$k = \frac{1}{\beta} = -\frac{Vdp}{dV} \quad (1.9)$$

考虑温度一定， $dp$  增大， $dV$  减小， $dV$  与  $dp$  的符号始终是相反的。为保持  $\beta$  为正，

故在式中加负号。 $\beta$  值愈大, 表示液体愈容易压缩,  $\beta$  的单位为  $\text{m}^2/\text{N}$ 。

液体受热, 体积膨胀, 密度减小, 温度下降后能恢复原状的性质称为膨胀性。液体的膨胀性用单位温升所引起的体积变化率表示, 称为体胀系数, 以  $a_v$  表示。

$$a_v = \frac{dV/V}{dT} = -\frac{d\rho}{\rho dT} \quad (1.10)$$

在压强一定的时候,  $dT$  增大,  $dV$  增大,  $d\rho$  减小。

不同种类的液体有不同的  $\beta$  或  $k$  值, 同一种液体其  $\beta$  或  $k$  值随温度和压强而变化, 但这种变化甚微, 一般可视为常数。例如, 压强每升高一个大气压, 水的密度约增加  $1/20000$ ; 大约增加一千个大气压才可使水的体积减少  $5\%$ 。其他液体也有类似的性质, 因而认为液体是不可压缩的, 我们称之为不可压缩液体假定。但是在某些特殊情况, 如水击等问题时需要考虑水的压缩性。水的体积弹性系数  $k$  值见表 1.1。

### 1.2.5 表面张力特性

自由表面上液体分子由于两侧分子引力不平衡, 使自由表面上液体分子受有极其微小的拉力, 这种拉力称为表面张力。表面张力不仅在液体与气体接触面上发生, 而且还会在液体与固体、一种液体与另一种液体相接触的周界上发生。

因为气体分子的扩散作用, 不存在自由表面, 故气体不存在表面张力。表面张力是液体的特有性质。即使对液体来讲, 表面张力在平面上并不产生附加压力, 因为那里的力处于平衡状态, 它只有在曲面上才产生附加压力以维持平衡。

表面张力的大小, 可以用表面张力系数  $\sigma$  来度量。表面张力系数是指在自由表面 (把这个面看作一个没有厚度的薄膜一样) 单位长度上所受拉力的数值, 单位为  $\text{N}/\text{m}$ 。 $\sigma$  的大小随液体种类、温度和表面接触情况而变化。对于和空气接触的自由面, 当温度为  $20^\circ\text{C}$  时, 水的  $\sigma=0.0736\text{N}/\text{m}$ , 水银的  $\sigma=0.0538\text{N}/\text{m}$ 。

在水流实验中, 经常使用盛有水或水银的细玻璃管做测压管, 由于表面张力的影响, 使玻璃管中液面和与之相连通容器中的液面不在同一水平面上, 液体会在细管中上升或下降  $h$  高度, 如图 1.2 所示, 这种现象称为毛细管现象。

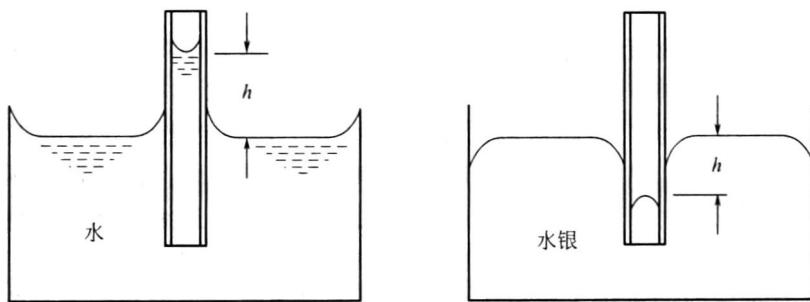


图 1.2 水或水银测压计

毛细管升高或下降值  $h$  的大小和管径大小及液体性质有关。在一般实验室温度 ( $20^\circ\text{C}$ ), 可用下列公式近似地估算毛细管高度:

$$\text{水的毛细升高} \quad h = \frac{30}{d} \quad (1.11)$$

$$\text{水银的毛细降低} \quad h = \frac{10.15}{d} \quad (1.12)$$

式中,  $h$  和  $d$  均以  $\text{mm}$  计,  $d$  为玻璃管内径。可见, 管的内径越小, 毛细管升高或下降

值越大。所以，用来测量压强的玻璃管内径不宜太小，否则就会产生很大的误差。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。

## 1.3 作用在液体上的力

液体处于运动或平衡状态时，受到各种力的作用，所谓作用在液体上的力，即作用在隔离体上的外力。按其物理性质的不同可分为黏性力、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。

### 1.3.1 质量力

作用在所取液体体积内每一质点上的力，其大小与质量成正比例，称为质量力。质量力中最常见的有重力、惯性力。质量力的单位是 N。在均质液体中，质量与体积成正比，故质量力又可称体积力。作用在单位质量液体上的质量力称单位质量力。若质量为  $m$  的均质液体，总质量力为  $F$ ，则单位质量力  $f$  为：

$$f = \frac{F}{m} \quad (1.13)$$

### 1.3.2 表面力

液体总是与周围介质（包括固体、液体和气体）相接触，其中液体和气体的交界面，称为自由面。凡通过这种接触面而起作用的力，称为表面力，其大小与接触面的面积有关。表面力的单位是 N。例如，以整个水箱中的水作为隔离体，它所受的表面力，一是作用于上部自由表面的大气压力；二是水箱边壁对液体的反作用力。

## 1.4 液体的力学模型

### 1.4.1 理论分析

液体是由大量的不断做无规则运动的分子所组成，从微观结构上说，分子之间是不连续而有空隙的。液体分子的体积极小，在标准状态下， $1\text{m}^3$  的水约有  $3 \times 10^{16}$  个水分子，分子之间的间距约为  $3 \times 10^{-8}\text{cm}$ 。如此众多而密集的水分子，各自做不规则的随机运动，导致分子之间不断地发生碰撞，从而进行充分的能量和动量交换。因此液体的宏观运动体现了众多液体分子微观运动的统计平均状况，明显地呈现出均匀性、连续性和确定性。

水力学是从宏观的角度去研究液体的机械运动。由于在工程实际问题中，所涉及的液体运动的特征尺寸及特征时间远远大于分子间距及分子碰撞时间，个别分子的行为几乎不影响大量液体分子统计平均后的宏观物理量（如质量、速度、压力等）。因此，从宏观的角度去研究液体运动能够满足工程问题所要求的精度。在水力学中假定液体为连续介质，即认为液体所占据的空间完全被液体质点所充满而没有任何空隙，液体质点在时间过程中做连续运动。采用连续介质假定，就可以应用连续函数的数学分析工具有效地描述液体的平衡和运动的规律。此假定与理想液体假定、不可压缩液体假定统称为水力学三大假定。

理论分析方法是建立在液体连续介质假定的基础上，通过研究作用在液体上的力，引用经典力学的基本原理（如牛顿定律、动能守恒定律、动量定理等），来建立液体运动的基本方程（如连续性方程、能量方程、动量方程等），利用数学手段分析求解。由于液体运动的

多样性,对于某些复杂液体运动,完全用理论分析方法来解决,目前还存在许多困难。

## 1.4.2 科学试验

科学试验方法是研究液体运动的一种重要手段,它可以检验理论分析成果的正确性和合理性,亦可以直接对理论上暂时还不能完全求解的液体运动进行研究。科学试验方法可归纳为以下三种方式。

(1) 原型观测 对工程中的实际水流运动直接进行观测,为检验理论分析成果或总结某些基本规律提供依据。

(2) 模型试验 以相似理论为指导,把实际工程缩小为模型,在模型上模拟相应的液体运动,得出模型液体运动的规律。再把模型试验结果按照相似关系还原为原型的结果,以满足实际工程的需要。

(3) 系统试验 由于原型观测受到某些条件的限制或因某种水流相似的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液体运动,用以进行系统的试验观测,从中找出规律。

## 小 结

《水力学与桥涵水文》是研究液体平衡与运动规律及公路桥涵合理布置与设计的一门课程。本章介绍液体的主要物理性质、作用在液体上的力等内容,属于水力学理论的基本内容。

(1) 把液体视为由一个挨一个的连续的无任何空隙的质点所组成的空间,即所谓连续介质假定,就可以充分利用连续函数这一数学分析工具有效地描述液体的平衡和运动规律。

(2) 惯性、重力特性、黏滞性、压缩性和膨胀性以及表面张力特性是液体的主要物理性质,其中重力特性、黏滞性对液体运动的影响起着重要作用。

(3) 当液体处在运动状态时,液体分子间的作用力立即显示为对流动的阻抗作用,即显示出所谓黏滞性阻力。液体的这种阻抗变形运动的特性称为黏滞性。

(4) 正确分析作用在液体上的力是研究液体平衡与运动规律的基础。作用于液体(不论静止或运动)上的力,按其物理性质可以分为惯性力、重力、黏滞力、弹性力和表面张力等,通常按其作用方式分为两大类:表面力和质量力。

(5) 连续介质假定与理想液体假定、不可压缩液体假定统称为水力学三大假定。

(6) 科学试验方法可归纳为三种方式:原型观测、模型试验和系统试验。

## 习 题

1.1 液体的压缩性与什么因素有关?

1.2 “液体在静止状态下不存在黏滞性”,这种说法对吗?为什么?静止的液体能否抵抗剪切变形?

1.3 何为牛顿内摩擦定律?

1.4 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?

1.5 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  $t=4^{\circ}\text{C}$  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  $9.71\text{kN/m}^3$ ,动力黏度  $\mu=0.599\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,求其运动黏度。

## 第2章

# 水静力学

水静力学是研究液体处于静止状态下的力学规律及其在实际工程中的应用。

水静力学研究的静止状态是液体质点相对于参考坐标系没有运动的静止状态。

显然，处于静止状态的液体是不显示黏滞性的，液体质点间以及质点与固壁间的相互作用是通过压应力（称静水压强）形式呈现出来。所以，水静力学的主要任务是根据力的平衡关系研究静水压强的分布规律及其应用（例如，液体测压计原理），进而研究各种情况下静水总压力的计算方法。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。

## 2.1 静水压强及其特性

### 2.1.1 静水压强的定义

在静止的液体中，围绕某点取一微小作用面，设其面积为  $\Delta A$ ，作用在该面积上的压力为  $\Delta P$ ，则当  $\Delta A$  缩小为一点时，平均压强  $\Delta P/\Delta A$  的极限值定义为该点的静水压强，通常用符号  $p$  表示，即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \quad (2.1)$$

在 SI 制中，静水压强的单位为 Pa 或 kPa。

### 2.1.2 静水压强的特性

静水压强具有如下两个重要的特性。

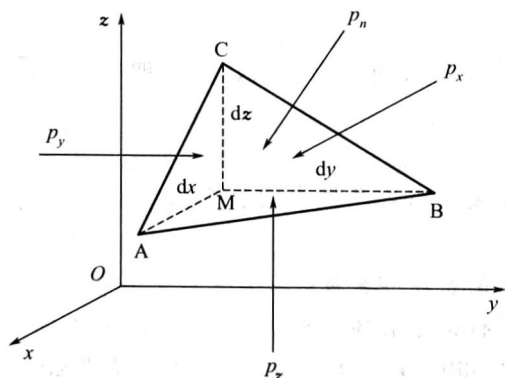


图 2.1 微小单元体的平衡

① 静水压强的方向与作用面垂直并指向作用面内法线方向。

② 静水压强的大小与其作用面的方位无关，亦即任意点处各方向上的静水压强大小相等。

对特性②证明如下。

设在静止液体中任选一点 M，以 M 为顶点，取一微分四面体，如图 2.1 所示。它的三个互相垂直的面  $dA_x$ ， $dA_y$ ， $dA_z$  分别和坐标轴  $x$ 、 $y$  和  $z$  相垂直，斜面  $dA_n$  的方向是任意的，四面体互相正交的两条棱边长度分别为  $dx$ ， $dy$  和

$dz$ 。因为四面体是由静止的液体中取出的，它在各种外力作用下处于平衡状态。作用于微小四面体的外力有表面力和质量力，以下分别讨论。

(1) 作用于四个面上的表面力

$$P_x = p_x dA_x = p_x \times \frac{1}{2} dy dz$$

$$P_y = p_y dA_y = p_y \times \frac{1}{2} dz dx$$

$$P_z = p_z dA_z = p_z \times \frac{1}{2} dx dy$$

$$P_n = p_n dA_n$$

式中  $P_x$ 、 $P_y$ 、 $P_z$ 、 $P_n$ ——分别为平行于坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$  和任意方向的面压力；

$p_x$ 、 $p_y$ 、 $p_z$ 、 $p_n$ ——分别为平行于坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$  和任意方向的面平均静水压强；

$dA_x$ 、 $dA_y$ 、 $dA_z$ ——分别为以坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为法线的四面体中正交的三个面的面积；

$dA_n$ ——四面体任意方向倾斜面的面积。

(2) 作用于四面体上的质量力

在静止状态下的液体所受的质量力只有重力。由几何学可得四面体体积  $dV = \frac{1}{6} dx dy dz$ ，假定作用在四面体上单位质量力在三个坐标轴的投影为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ；总质量力在三个坐标轴的投影为：

$$F_x = \frac{1}{6} \rho X dx dy dz$$

$$F_y = \frac{1}{6} \rho Y dx dy dz$$

$$F_z = \frac{1}{6} \rho Z dx dy dz$$

根据力的平衡条件，四面体处于静止状态下各个方向的作用力之和应分别为零。以  $x$  方向为例：

$$P_x - P_n \cos(n, x) + F_x = 0$$

式中， $(n, x)$  表示倾斜面法向  $n$  与  $x$  轴的夹角，而

$$P_n \cos(n, x) = p_n dA_n \cos(n, x) = p_n \times \frac{1}{2} dy dz$$

将上面各式代入后得

$$p_x \times \frac{1}{2} dy dz - p_n \times \frac{1}{2} dy dz + \frac{1}{6} \rho X dx dy dz = 0$$

当  $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$  趋近于零，也就是四面体趋近于一点时，质量力的分量  $F_x$  为高阶无穷小，可以忽略不计。此时，

$$\text{由 } p_x \times \frac{1}{2} dy dz - p_n \times \frac{1}{2} dy dz = 0$$

所以

$$p_x = p_n$$

同理，在  $y$  方向可得  $p_y = p_n$ ，在  $z$  方向可得  $p_z = p_n$ ，根据等量代换原理，即有

$$p_x = p_y = p_z = p_n \quad (2.2)$$

式(2.2)表明，静水中同一点各个方向上的静水压强均相等，与作用面的方位无关。根



据这一特性，并应用连续介质假说，可得出结论：静水压强只是空间位置的标量连续函数：

$$p = p(x, y, z) \quad (2.3)$$

## 2.2 静水压强分布规律

### 2.2.1 静水力学基本方程

#### 2.2.1.1 液体平衡的微分方程

在静止液体中任取一边长为  $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$  的微小正六面体为隔离体，如图 2.2 所示。六面体处于静止状态，各方向的作用力相平衡。设其中心点  $O'(x, y, z)$  的密度为  $\rho$ ，液体静水压强为  $p$ 。现以  $x$  方向为例分析其受力情况。

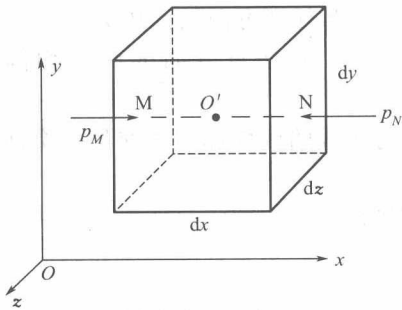


图 2.2 微小正六面体的平衡

如图 2.2 所示，在  $x$  轴方向上有两个受压面，中心点分别为 M、N。因静水压强是空间坐标的连续函数，又  $dx$  为微量，故点 M 和 N 的静水压强，可按泰勒级数展开并略去二阶以上的各项微量，得：

$$p_M = p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx$$

$$p_N = p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx$$

由于六面体各面的面积微小，可以认为平面中点的静水压强即为该面的平均静水压强，于是可得作用在两微小面上的表面力分别为：

$$P_M = \left( p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dy dz$$

$$P_N = \left( p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dy dz$$

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

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

根据液体平衡条件，在  $x$  方向上应有

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

化简上式并整理，并同理考虑  $y$ 、 $z$  方向，得

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

上式为液体平衡微分方程，它由瑞士学者欧拉 (Euler) 于 1775 年首先导出的，故又称欧拉平衡微分方程。

将式(2.4) 改写为：

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho X$$