



普通高等教育“十二五”规划教材

全国水利行业“十二五”规划教材

水力学

(第二版)

何文学 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十二五”规划教材

全国水利行业“十二五”规划教材

水 力 学

(第二版)

何文学 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

按照“一个理论基础、两个重点应用、三项职业技能”的实用教学新体系组织内容,分为“水力学基础理论”、“实用水力计算”、“综合应用实例”三部分,共计11章。分别是:绪论、静水压强与静水总压力、液体运动的流束理论、水头损失计算、有压管道的水力计算、明渠均匀流的水力计算、明渠非均匀流的水力计算、堰流与闸孔出流的水力计算、衔接与消能的水力计算、渗流的水力计算、水力计算综合应用实例。

本书编排体例新颖,叙述简洁清楚,注重水力计算类型及其求解方法,可作为水利类、土建类高职专业教材使用,也可供中职教育、成人教育及相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学 / 何文学编著. — 2版. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013.1
普通高等教育“十二五”规划教材 全国水利行业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-0536-0

I. ①水… II. ①何… III. ①水力学—高等学校—教材 IV. ①TV13

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第004938号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 全国水利行业“十二五”规划教材 水力学 (第二版)
作 者	何文学 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 18.75印张 444千字
版 次	2010年9月第1版 2010年9月第1次印刷 2013年1月第2版 2013年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	37.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

水力学是研究液体机械运动规律及其工程应用的一门科学，是水利、土木、环境、机械、热能、动力、矿山等诸多技术领域相关专业必修的一门技术基础课。通过合理取舍教学内容，优化重构课程体系，形成了“一个理论基础、两个重点应用、三项职业技能”的实用《水力学》教材新体系。“一个理论基础”是指流束理论基础，“两个重点应用”是指有压管道恒定流与明渠恒定流的工程应用，“三项职业技能”是指水流现象分析技能、简单水力计算技能、基本水力要素量测技能。

整部教材除“水力学基础理论”篇、“实用水力计算”篇之外，还特别增加了“综合应用实例”篇。水力计算综合应用实例以离心泵站、排洪闸、拦河溢流坝、河岸溢洪道、有压泄洪洞的水力计算为代表，重点分析水力计算任务及其相应的求解方法。教材编排体例新颖，注重知识的内在联系以及对水力计算类型与计算方法的阐述。【情景提示】以趣味性或常识性问题为切入点，引出的知识点。【本章导读】除提示教学要点之外，还对知识点的前后衔接关系给予说明。【教学要求】明确了教学重点。章节内容力求叙述简洁清楚，图文并茂，例题尽可能系列化并提倡一题多解以及迭代求解。适时的试问与【课堂练习】有利于引导学生深入思考与动手练习。“本章小结”采用留白方式，便于学生自行归纳总结。页脚格言渗透中华文化，饱含人生哲理。“思考题”留足想象空间，“作业题”紧扣教学基本要求。水力学课程网站（<http://shuixue.zjwchc.com/>）还提供了更多实用教学资源（如课件、动画、实验演示、水力计算小程序等），既方便教师开展教学活动，又有利于学生课后自主学习。

本书由浙江水利水电专科学校何文学执笔编撰。参加编写大纲讨论的有：浙江水利水电专科学校李东风、吴婉玲、陈冬云、冯建江、李茶青；浙江省水利河口研究院韩海鹰、吴辉；浙江同济科技职业学院楼骏、王颖；东平黄河河务局孙晓明等。

限于编著者水平及其他诸多方面的因素，教材中可能存在疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正！

编著者

2012年12月

前言

第一篇 水力学基础理论

第 1 章 绪论	1
【情景提示】	1
【本章导读】	1
【教学要求】	2
1.1 水力学的研究对象和主要任务	2
1.2 液体的基本特征和主要物理性质	3
1.2.1 液体的基本特征	3
1.2.2 液体的主要物理性质	3
本章小结	7
思考题	7
作业题	7
第 2 章 静水压强与静水总压力	9
【情景提示】	9
【本章导读】	9
【教学要求】	9
2.1 静水压强及其特性	9
2.1.1 压力与压强的概念	9
2.1.2 静水压强的特性	10
2.2 静水压强基本公式	10
2.2.1 方程推导	10
2.2.2—静水压强基本公式及其意义	11
2.3 压强的量度与量测	12
2.3.1 压强的量度基准	12
2.3.2 压强的计量单位	13
2.3.3 压强的量测	14
2.4 静水总压力的计算	18
2.4.1 作用于平面上的静水总压力	19
2.4.2 作用于曲面上的静水总压力	22
2.4.3 应用举例	24
本章小结	30

思考题	31
作业题	32
第3章 液体运动的流束理论	35
【情景提示】	35
【本章导读】	35
【教学要求】	35
3.1 描述液体运动的两种方法	36
3.1.1 拉格朗日法	36
3.1.2 欧拉法	36
3.2 水流运动的基本概念	36
3.2.1 恒定流与非恒定流	37
3.2.2 迹线与流线	37
3.2.3 流管、微小流束、总流、过水断面、流量、断面平均流速	38
3.2.4 一元流、二元流、三元流	40
3.2.5 均匀流与非均匀流、渐变流与急变流	41
3.3 一元恒定总流的连续方程	43
3.3.1 方程的推导	43
3.3.2 方程的意义	44
3.4 一元恒定总流的能量方程	44
3.4.1 方程推导	44
3.4.2 应用条件	47
3.4.3 注意事项	49
3.4.4 水头线图	49
3.4.5 应用举例	50
3.5 一元恒定总流的动量方程	58
3.5.1 方程推导	59
3.5.2 应用步骤	60
3.5.3 注意事项	60
3.5.4 应用举例	61
本章小结	64
思考题	65
作业题	66
第4章 水头损失计算	68
【情景提示】	68
【本章导读】	68
【教学要求】	68
4.1 概述	68
4.1.1 水头损失的概念及分类	68
4.1.2 横向轮廓对水头损失的影响	69

4.2 均匀流沿程水头损失与切应力的关系	70
4.2.1 关系式推导	70
4.2.2 切应力分布规律	71
4.3 沿程水头损失的计算	71
4.4 液流型态及其判别	72
4.4.1 试验过程	72
4.4.2 试验结果	73
4.4.3 流态的判别——雷诺数	73
4.5 圆管层流	74
4.5.1 流速分布	74
4.5.2 流量	75
4.5.3 断面平均流速	75
4.5.4 沿程水头损失	75
4.6 紊流特征	76
4.6.1 紊流的形成过程	76
4.6.2 紊流的特征	77
4.7 沿程阻力系数 λ 的计算	82
4.7.1 尼古拉兹试验	82
4.7.2 沿程阻力系数 λ 的计算公式	83
4.7.3 莫迪图	84
4.7.4 其它沿程水头损失或沿程阻力系数计算公式	85
4.8 计算沿程水头损失的经验公式——谢才公式	86
4.9 局部水头损失的计算	90
4.9.1 圆管突然扩大的局部水头损失	90
4.9.2 局部水头损失计算公式	91
本章小结	98
思考题	98
作业题	99

第二篇 实 用 水 力 计 算

第5章 有压管道的水力计算	101
【情景提示】	101
【本章导读】	101
【教学要求】	101
5.1 简单管道水力计算的基本公式	102
5.1.1 短管计算公式	102
5.1.2 长管计算公式	104
5.2 简单管道水力计算的基本类型	106
5.2.1 计算输水能力	106

5.2.2	计算作用水头	107
5.2.3	计算管径	108
5.2.4	确定断面压强	110
5.2.5	简单管道水力计算的特例	111
5.3	复杂管道的水力计算	114
5.3.1	串联管道	115
5.3.2	并联管道	116
5.3.3	分叉管道	117
5.3.4	沿程均匀泄流管道	118
5.4	管网的水力计算	119
5.4.1	枝状管网	119
5.4.2	环状管网	122
5.5	管道非恒定流简介	123
5.5.1	水击现象	123
5.5.2	水击波速	127
5.5.3	直接水击与间接水击	128
5.5.4	直接水击压强的计算	128
	本章小结	129
	思考题	130
	作业题	130
第6章	明渠均匀流的水力计算	133
	【情景提示】	133
	【本章导读】	133
	【教学要求】	133
6.1	概述	133
6.1.1	明渠水流的特点	133
6.1.2	明渠的几何特性	134
6.2	明渠均匀流的特点及水力计算公式	136
6.2.1	明渠均匀流的特点	136
6.2.2	明渠均匀流的产生条件	137
6.2.3	明渠均匀流水力计算公式	137
6.3	渠道设计中的几个问题	137
6.3.1	粗糙系数 n 值的选择	137
6.3.2	水力最佳断面	138
6.3.3	允许流速	139
6.3.4	非均质明渠的水力计算	140
6.3.5	复式断面明渠的水力计算	141
6.4	明渠均匀流的水力计算	142

6.4.1 计算类型	142
6.4.2 应用举例	143
6.4.3 水深或底宽试算求解	146
本章小结	149
思考题	149
作业题	150
第7章 明渠非均匀流的水力计算	151
【情景提示】	151
【本章导读】	151
【教学要求】	151
7.1 明渠水流流态及其判别	151
7.1.1 从现象上认识缓流和急流	151
7.1.2 从运动学观点认识缓流和急流	152
7.1.3 从能量观点认识缓流和急流	154
7.1.4 临界底坡	156
7.2 明渠恒定非均匀渐变流微分方程	159
7.2.1 明渠恒定非均匀渐变流基本微分方程	159
7.2.2 水深沿程变化的微分方程	160
7.2.3 水位沿程变化的微分方程	160
7.2.4 断面比能沿程变化的微分方程	161
7.3 棱柱体明渠恒定非均匀渐变流水面曲线定性分析	161
7.3.1 水面曲线的命名	161
7.3.2 水面曲线的特点分析	162
7.3.3 水面曲线变化规律与一般分析原则	164
7.3.4 水面曲线定性分析的步骤	166
7.4 明渠恒定非均匀渐变流水面曲线的计算	167
7.4.1 分段求和法	167
7.4.2 水面曲线的计算类型及其计算步骤	168
7.4.3 估算河渠流量与粗糙系数	169
7.5 弯道水流简介	171
7.6 水跌与水跃	172
7.6.1 水跌	172
7.6.2 水跃	172
本章小结	181
思考题	182
作业题	182
第8章 堰流与闸孔出流的水力计算	185
【情景提示】	185
【本章导读】	185

【教学要求】	185
8.1 概述	185
8.1.1 堰流与闸孔出流的概念	185
8.1.2 堰流与闸孔出流的水流状态判别	186
8.2 堰流的水力计算	186
8.2.1 堰流类型	186
8.2.2 堰流的水力计算公式	188
8.2.3 薄壁堰流的水力计算	189
8.2.4 实用堰流的水力计算	191
8.2.5 宽顶堰流的水力计算	198
8.3 闸孔出流的水力计算	204
8.3.1 宽顶堰上闸孔出流的水力计算	204
8.3.2 曲线堰上闸孔出流的水力计算	207
本章小结	211
思考题	211
作业题	212
第9章 衔接与消能的水力计算	214
【情景提示】	214
【本章导读】	214
【教学要求】	214
9.1 概述	214
9.1.1 下泄水流的特点	214
9.1.2 主要衔接与消能方式及其特点	215
9.2 底流型衔接消能的水力计算	218
9.2.1 收缩水深计算	218
9.2.2 消能池设计	221
9.3 挑流消能的水力计算	228
9.3.1 挑流射程的计算	228
9.3.2 冲刷坑深度估算	230
9.3.3 挑坎型式及尺寸选择	231
本章小结	232
思考题	232
作业题	233
第10章 渗流的水力计算	234
【情景提示】	234
【本章导读】	234
【教学要求】	234
10.1 渗流的基本概念	234
10.1.1 土壤的分类	234

10.1.2	水在土壤中的存在形式	235
10.1.3	渗流模型	235
10.2	渗流基本定律——达西定律	236
10.2.1	达西试验与达西定律	236
10.2.2	达西定律的适用范围	236
10.2.3	渗透系数及其确定方法	237
10.3	地下河槽中恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流	237
10.3.1	均匀渗流	238
10.3.2	非均匀渐变渗流的基本公式——杜比公式	238
10.4	棱柱体地下河槽恒定非均匀渐变渗流浸润曲线	239
10.4.1	渐变渗流的基本微分方程式	239
10.4.2	地下河槽中浸润曲线的分析与计算	239
10.5	水平不透水层上均质土坝的渗流计算	243
10.5.1	渗流流量计算	243
10.5.2	坝内浸润曲线	245
10.6	有压渗流的水力计算	246
10.6.1	流网法	246
10.6.2	直线比例法	250
	本章小结	252
	思考题	252
	作业题	252

第三篇 综合应用实例

第 11 章	水力计算综合应用实例	254
	【情景提示】	254
	【本章导读】	254
	【教学要求】	254
11.1	离心泵站的水力计算	254
11.1.1	基本资料	254
11.1.2	水力计算任务	255
11.2	排洪闸的水力计算	259
11.2.1	基本资料	259
11.2.2	水力计算任务	260
11.3	拦河溢流坝的水力计算	264
11.3.1	基本资料	264
11.3.2	水力计算任务	265
11.4	河岸溢洪道的水力计算	271
11.4.1	基本资料	271
11.4.2	水力计算任务	272

11.5 有压泄洪洞的水力计算 276

11.5.1 基本资料 276

11.5.2 水力计算任务 276

综合实训题 280

附图 I 梯形及矩形渠道底宽求解图 283

附图 II 梯形及矩形渠道均匀流水深求解图 284

附图 III 梯形渠道临界水深求解图 285

附图 IV 梯形渠道共轭水深求解图 286

附图 V 矩形渠道收缩水深及其共轭水深求解图 287

参考文献 288

第一篇 水力学基础理论

《水力学》课程的主要任务是分析水流与边界的相互作用以及在各种相互作用条件下所形成的各种水流现象，为水利工程的勘测、规划、设计、施工以及运行管理提供科学依据。

水力学基本原理包括“流束理论”和“流场理论”两个理论体系。考虑到职业岗位的实际工作需要，以“必需、够用”原则为指导，只介绍“流束理论”。即以液体的基本特征与主要物理性质、静水压强与静水总压力、液体运动的流束理论以及水头损失计算为核心，构成“水力学基础理论”篇。为更好地突出教学内容的针对性与实用性，舍弃了流场理论基础、边界层理论基础、恒定势流以及量纲分析、相似原理的相关内容。

第1章 绪 论

【情景提示】

1. 水力与水利有何不同？
2. 从都江堰到三峡水利枢纽，在 2000 多年的历史进程中，水利工程为社会经济发展作出了不可磨灭的贡献，而水利建设中的水力学问题又有哪些呢？
3. 大多数物质在一定压力下，随着温度的下降，其密度会上升。但水的密度变化却有其特殊性。这一性质对维持水生生物的生存有重要意义。你了解水的这个性质吗？
4. 什么原因使得重力场中的水滴形状是上小下大的尖椭圆球体，同时水滴还不会散开？我们常看见水面上有小昆虫站立，这时如果用一定倍数的放大镜观察，就会看到昆虫站立处的水表面就像有一层膜一样微微下凹。对于植物来说，水会在没有外来压力的情况下自动沿植物的毛细管或毛细缝上升。这些现象的发生与水的哪一个物理性质有关？
5. 用手搅动盆中的水，停止搅动，水的运动会逐渐变慢，不久便又恢复静止状态。如果将水换成黏稠的油，搅动油就比搅动水费力，而停止搅动，与水比较，油会更快地静止。这一现象又与液体的哪个物理性质有关？
6. 马德堡半球实验中有这样一段话：把两个直径 30 多 cm 的空心铜半球紧贴在一起，用抽气机抽出球内的空气，然后用两队马向相反的方向拉两个半球，“连 16 匹马（拼命挣扎着）都不能把它们拉开，或者只有费了很大的劲才能拉开它们，当马用尽了全力把两个半球最后拉开的时候，还发出了很大的响声，像放炮一样”。试问这巨大的响声是怎么产生的？灯泡摔破时，为什么也会发出很大的响声？

【本章导读】

通过绪论的学习，不仅可以了解水力学课程的性质及其结构体系、研究对象与研究任务、基本内容与服务对象、发展简史与研究方法等，而且还需要掌握液体的基本特征和主



要物理性质,这是研究液体机械运动规律及其工程应用的出发点。

【教学要求】

①了解水力学课程的性质、任务、研究对象、工程应用等;②掌握液体的基本特征和主要物理性质,重点是惯性、万有引力特性、黏滞性三个主要物理性质;③了解理想液体与实际液体、牛顿流体与非牛顿流体的概念。

1.1 水力学的研究对象和主要任务

水力学是研究液体机械运动规律及其工程应用的一门科学。液体的种类很多,如水、石油、酒精、水银等。由于工程实际中最为常见的液体是水,便以水作为研究液体机械运动的代表,故称水力学。即水力学的研究对象是以水为代表的液体。实际上,水力学的基本原理与水力计算的一般方法不仅适用于水,而且适用于一般常见液体和可忽略压缩性影响的气体。事实上,当气体的运动速度远比音速为小时,在运动过程中其密度的变化很小(当气体运动速度小于 68m/s 时,密度的变化为 1% ;当气体运动速度等于 150m/s 时,密度的变化也只有 10%),可视为不可压缩,即忽略压缩性影响。

水力学课程的主要内容及主要任务概括为如下 3 个方面。

(1) 水力学基本原理:研究液体的主要物理性质及机械运动规律。其中,液体的机械运动规律主要包括两大部分。一是关于液体的平衡规律,即当液体处于静止(或相对平衡)状态时,作用于液体上的各种力之间的关系,这一部分称为水静力学。二是关于液体的运动规律,即当液体处于运动状态时,作用于液体上的力与各运动要素之间的关系,这部分内容称为水动力学。

(2) 工程水力学基础:主要介绍工程实际中常见的管道、渠道、堰、闸等典型水力学问题的分析方法与水力计算方法,为后续相关课程的学习与将来从事专业工作奠定基础。

(3) 水力试验原理:主要介绍量纲分析、相似原理、模型试验基础,是验证水力学基本原理、发展水力学理论以及解决工程实际中诸多水力学问题的必备基础。但限于篇幅并考虑到教材使用对象,这部分内容请参阅相关教材或专著。

从专业教学与知识应用两方面出发,将上述水力学内容整合为“水力学基础理论、实用水力计算、综合应用实例”三个篇章。

从课程性质来看,“水力学”是一门技术基础课。一方面根据基础科学中的普遍规律(如质量守恒、能量守恒、动量守恒等),结合水流特点,建立自己的理论基础,另一方面又密切联系工程实际,发展学科内容。也就是说,“水力学”是继“高等数学”、“工程力学”之后开设的一门技术基础课,其基本理论与水力计算的基本方法也是后续专业课程(如“水工建筑物”、“水利工程施工”、“水电站”、“水泵站”等)学习的必备基础,更是从事专业性工作必不可少的知识。

实际上,社会经济发展的许多领域都要用到水力学知识,水利工程建设更不例外。为了实现灌溉、发电、防洪、供水、航运、养殖、改善水环境等诸多目的,通常要在河道上修建系列水工建筑物。这样一来,必然会改变天然河道原有的水流状态,从而引起一系列水力学问题。概括起来,主要体现在以下几方面:①水流对挡水建筑物的作用力;②渗透流量、渗透流速、渗透压强;③输水建筑物的断面设计;④泄水建筑物的泄洪能力;⑤下



泄水流对河床的冲刷及消能防冲措施的设计；⑥洪水的演进、溃坝波、压力管道中的压强波动等；⑦上游回水淹没范围的确定；⑧模型试验等。

上述几方面水力学问题，归纳起来主要表现在以下4个方面。

(1) 建筑物（及河槽）所承受的水力荷载。包括：静水压力、动水压力、渗透压力等，这是水工建筑物稳定分析和结构计算必不可少的依据之一。

(2) 建筑物（及河槽）的过水能力。输水及泄水建筑物、河渠、管道等的断面形式及尺寸的确定，是水力计算的一项基本任务。

(3) 水流的流动形态。研究和改善水流通过河渠、水工建筑物及其附近的水流形态，为合理布置建筑物，保证其正常运行提供理论依据。

(4) 水流的能量消耗。分析水流能量转换中的能量损失规律，研究充分利用水流有效能量的方式方法和高效率消除多余有害动能的消能防冲措施。

从工程实际中常见的水力学问题不难看到：水力学在水利建设中的主要任务就是分析水流与边界的相互作用，以及在各种相互作用条件下所形成的各种水流现象和边界上各种力的作用，为水利工程的勘测、规划、设计、施工和运行管理提供合理的水力学依据。此外，水力学在建筑工程、港口航运、市政工程、冶金采矿、能源化工等许多领域都有广泛应用，在此不予详细介绍。

1.2 液体的基本特征和主要物理性质

1.2.1 液体的基本特征

自然界的物质一般以3种状态存在，即固态、液态、气态。固体分子间距离很小，内聚力很大，能够保持固定的形状和体积，也能承受一定数量的拉力、压力、剪切力。而液体则由于分子间距离较大，内聚力很小，几乎不能承受拉力，抵抗拉伸变形；在微小的剪切力作用下即发生剪切变形，液体剪切变形的过程就是流动过程。此外，液体有一定的体积，呈现容器的形状，并能形成自由表面；液体虽不能承受拉力，却可以承受很大的压力，并且压缩性很小。此外，液体分子之间彼此存在间隙并在不断地进行着复杂的热运动。由于分子在空间分布上的不连续性和热运动在时间上的随机性，导致水流运动要素在空间与时间上呈现不连续变化，这给研究液体的运动带来了一定的困难。但由于水力学研究的是液体的宏观机械运动，即研究大量液体分子的统计平均效应。因此，把液体看作是不连续的分子结构也就没有必要了。事实上，早在1753年，欧拉就已经提出了连续介质假定，即液体是由无数质点组成，质点毫无间隙地充满所占空间，其物理性质和运动要素都是连续分布的。也就是说，水流在宏观机械运动过程中，一切物理量均可视为空间位置坐标和时间的连续函数，可以充分利用连续函数这一数学工具解决液体的流动问题。

为研究问题方便，在连续介质假定的基础上，一般还认为液体是均匀的，各个方向上物理性质相同。如此一来，水力学中液体的基本特征可归纳为：易于流动、不易压缩、均匀等向、连续介质。

1.2.2 液体的主要物理性质

物体运动状态的改变都是外力作用的结果。研究液体的运动规律，必须从分析液体的受力情况入手。而任何一种力的作用都要通过液体自身的物理性质表现出来。因此，研究



液体的物理性质是研究液体机械运动的出发点。

1.2.2.1 惯性、质量与密度

物体所固有的保持原有运动状态的性质称为惯性。惯性的大小以质量 M 来度量。当液体受外力作用使运动状态发生变化时, 由于液体的惯性所引起的抵抗外界作用的反作用力称为惯性力, 惯性力 F 的大小可表示为

$$F = -Ma$$

式中: M 为质量, kg ; a 为加速度, m/s^2 ; 负号表示惯性力的方向与物体加速度的方向相反。

单位体积内的质量称为密度, 以符号 ρ 来表示, 其单位为 kg/m^3 。

对均质液体, 其密度为

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

对非均质液体, 其密度可表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1.2)$$

不同种类的液体, 其密度值各不相同。同一种类的液体, 其密度随温度和压强的变化而变化, 但这种变化很小。因此, 在水力学中, 通常把水的密度视为常数, 采用一个标准大气压下, 温度为 4°C 的蒸馏水的密度作为计算值, 即 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。

1.2.2.2 万有引力特性与重力

任何物体之间的引力称为万有引力。地球对物体的引力称为重力, 或称为重量。质量为 M 的物体, 其所受重力 G 的大小可以表示为

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

式中: g 为重力加速度, 其值为 9.8 m/s^2 。

1.2.2.3 黏滞性与黏滞系数

由液体的基本特征可知, 液体具有易流动性, 即静止时不能承受切力, 抵抗剪切变形。但在运动状态下, 液体就具有抵抗剪切变形的能力, 这就是所谓的黏滞性。由于分子引力的存在, 导致紧贴固体壁面的一层极薄的液体质点被紧紧吸持, 流速为零, 如图 1.1

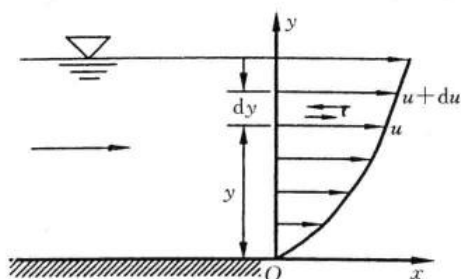


图 1.1

所示。水流运动过程中, 流速必然从零逐渐增大。流速分布不均匀, 相邻液层之间必然存在相对运动, 也就出现了抵抗相对运动的内摩擦力。此内摩擦力由黏滞性产生, 故又称为黏滞力。内摩擦力总是对水流运动做负功, 导致机械能损失。因此, 黏滞性的存在是水流运动过程中能量损失的根源。

内摩擦力的概念是牛顿最先提出并经后人验证, 习惯上称为牛顿内摩擦定律。其内容是: 作层流运动的液体, 相邻两液层间单位面积上所作用的内摩擦力与流速梯度成正比, 同时与液体的性质有关。其数学表达式为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.4)$$

式中: τ 为内摩擦切应力, N/m^2 ; μ 为动力黏度 (或动力黏滞系数), 简称黏度,



$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 、 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； $\frac{du}{dy}$ 为流速梯度。

牛顿内摩擦定律只适用于一般流体，对于某些特殊流体是不适用的。层流时内摩擦切应力与流速梯度成正比例的流体称为牛顿流体。否则，称为非牛顿流体。常见的液体和气体多属于牛顿流体，如水、空气等。

黏度 μ 值的大小反映了液体性质对内摩擦力的影响。黏滞性大的液体， μ 值大。液体种类不同，黏度 μ 值的大小也不一样。并且，黏度 μ 随温度和压强的变化而变化。但对常见液体而言， μ 值的大小随压强的变化可以忽略不计，随温度的变化却比较大。温度升高，液体的黏滞性降低。

液体黏滞性的大小还可以用运动黏度（或称运动黏滞系数） ν 来表示，其定义为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.5)$$

式中： ν 为运动黏度， m^2/s 。

对水而言，不同水温时的运动黏度 ν 的数值参见表1.1，也可按式(1.6)计算。

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1.6)$$

式中： t 为水温， $^{\circ}\text{C}$ ； ν 为不同水温时的运动黏度， cm^2/s 。

表 1.1 不同温度时水的运动黏度 ν 值

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	0	2	4	6	8	10	12
ν (cm^2/s)	0.01775	0.01674	0.01568	0.01473	0.01387	0.01310	0.01239
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	14	16	18	20	22	24	26
ν (cm^2/s)	0.01176	0.01118	0.01062	0.01010	0.00989	0.00919	0.00877
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	28	30	35	40	45	50	55
ν (cm^2/s)	0.00839	0.00803	0.00725	0.00659	0.00603	0.00556	0.00515

1.2.2.4 压缩性及压缩率

液体受压，体积缩小，压力撤除之后又能恢复原状的性质称为压缩性或弹性。当液体受压而出现压缩变形时，液体内部就出现抵抗压缩变形，企图恢复原状的内力，即内压力。

液体压缩性的大小以体积压缩率（也称体积压缩系数） β 或体积模量（也称体积弹性系数） K 来表示。

体积压缩率 β 是液体体积的相对缩小值与压强增值之比。可以表示为

$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1.7)$$

由于 dp 与 dV 始终异号，为保证 β 为正，前面加负号。 β 值越大，液体越容易压缩，其单位为 m^2/N 。

体积模量 K 是体积压缩率 β 的倒数，即

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1.8)$$

体积模量 K 值越大，液体越不容易被压缩。 K 值的单位是 N/m^2 。