

普通高等教育规划教材
高等学校 MOOC (慕课) 精编教材

水力学与桥涵水文

◎ 主编

杨红霞 赵峥嵘
马光述 温尚梅

非外借



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育规划教材
高等学校MOOC（慕课）精编教材

水力学与桥涵水文

主 编 杨红霞 赵峥嵘 马光述 温尚梅
副主编 孙崇平 马 坤 桑春平 武振国
参 编 吴兆启 李怀志 王丙旭 田中锋
包广志



机械工业出版社

本书依据《土木工程本科指导性专业规范》，参照土木工程专业人才培养方案和“水力学与桥涵水文”课程教学大纲，结合 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》、JTG C30—2015《公路工程水文勘测设计规范》中相关内容编写。本书知识结构系统、内容精练、重点突出，侧重基本原理、基本方法及其工程应用；同时，还考虑了拓宽专业知识面的需要，书中例题、习题均来源于公路、桥梁、隧道、铁道等工程设计计算实例。

全书分为上、下两篇，上篇为水力学，下篇为桥涵水文。具体内容包括：绪论，水静力学，水动力学，水流阻力与水头损失，明渠水流，堰流与闸孔出流，渗流，波浪理论，河川水文基础，水文统计原理，桥涵设计流量与设计水位的推算，大、中桥孔径计算，桥梁墩台冲刷计算，小桥涵水力水文计算。

本书可作为高等学校公路与城市道路、桥梁与隧道、城市地下空间、铁道工程、港口航道与海岸工程、工程管理等专业的教材，也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

水力学与桥涵水文/杨红霞等主编. —北京：机械工业出版社，2018.8
普通高等教育规划教材 高等学校 MOOC（慕课）精编教材
ISBN 978-7-111-60018-3

I. ①水… II. ①杨… 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. ①TV13②U442.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 109280 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：林 辉 责任编辑：林 辉 马军平

责任校对：陈 越 封面设计：马精明

责任印制：孙 炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2018 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18.5 印张·486 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-60018-3

定价：45.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金 书 网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

“水力学与桥涵水文”课程是土木工程、城市地下空间工程、铁道工程、港口航道与海岸工程、工程管理等专业本科生的一门重要的专业基础课。1998年，普通高等学校专业目录调整后，交通土建工程调整合并到土木工程专业，“水力学”和“桥涵水文”随之成为土木工程专业道桥方向的专业基础课。该课程旨在使学生掌握水流运动的基本概念、基本理论和水力分析计算方法，掌握桥涵水文基础知识，初步具有分析解决道路、桥梁、隧道、港口航道工程设计、施工、管理中水力学问题，以及获取水文资料、分析确定水文参数的基本能力，为以后从事工程设计、施工等相关工作打下必要的基础。

大部分学校将“水力学”和“桥涵水文”分设为两门课程，这种情况在教学时间较充裕时，有其合理的一面，但在教学学时压缩后其弊端逐渐显现出来。“水力学”和“桥涵水文”在学科方面各自独立，但在理论应用方面却有较为密切的关系。“水力学”不但是桥涵孔径、管道渠道设计的基本理论，也是水文资料收集和整理的理论依据，是桥涵水文的理论基础，主要内容包括水静力学、水动力学、明渠水流、堰流等；桥涵水文介绍的是水力学基本理论在道路与桥梁工程水文计算中的应用，主要内容为桥位选择、设计流量推求、孔径布置、桥梁墩台冲刷计算等，其分析与计算的结果则是桥涵布设与结构分析的根据。因此，水力学、水文学和桥涵设计是有机的整体，不宜分开。“水力学”和“桥涵水文”分设，致使教材的一致性很难保证，一些概念和符号不一致，不便教学。

本书依据《土木工程本科指导性专业规范》，参照土木工程专业人才培养方案和“水力学与桥涵水文”课程教学大纲，结合 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》、JTG C30—2015《公路工程水文勘测设计规范》中相关内容编写。本书知识结构系统、内容精练、重点突出，

侧重基本原理、基本方法及其工程应用；同时，还考虑了拓宽专业知识面的需要，书中例题、习题均来源于公路、桥梁、隧道、铁道等工程设计计算实例。

全书分为上、下两篇，上篇为水力学，下篇为桥涵水文。具体内容包括：绪论，水静力学，水动力学，水流阻力与水头损失，明渠水流，堰流与闸孔出流，渗流，波浪理论，河川水文基础，水文统计原理，桥涵设计流量与设计水位的推算，大、中桥孔径计算，桥梁墩台冲刷计算，小桥涵水力水文计算。书中渗流和波浪理论两章内容可根据各专业需要选学或作为课外阅读内容。

本书第1、3~6章由山东交通学院杨红霞教授编写；第2章由北华大学马光述编写；第9~13章由山东交通学院赵峥嵘教授编写；第7章第1、2节由温尚梅编写；第7章第3节由桑春平编写；第7章第4节由武振国编写；第8章第1、2节由孙崇平编写；第8章第3节由马坤编写；第8章第4、5节由田中锋编写；第8章第6节由包广志编写；第14章第1、2节由山东交通学院吴兆启编写；第14章第3节由李怀志编写；第14章第4节由王丙旭编写。全书由杨红霞教授统稿。

本书可作为高等学校公路与城市道路、桥梁与隧道、城市地下空间、铁道工程、港口航道与海岸工程、工程管理等专业的教材，也可供相关专业技术人员参考。

在教材编写过程中，得到机械工业出版社的大力支持，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，如有欠妥之处，敬请指正。

编者

录



CONTENTS

CONTENTS	
前言	
上篇 水力学	
第1章 绪论	2
1.1 学习重点	2
1.2 学习目标	2
1.1 1.1 水力学的内容与研究方法	2
1.1 1.2 连续介质假设和水力学模型	3
1.1 1.3 液体的主要物理性质	4
1.1 1.4 作用在液体上的力	9
1.1 本章小结	10
1.1 思考题与习题	10
第2章 水静力学	11
2.1 学习重点	11
2.1 学习目标	11
2.1 2.1 静水压强的特性	11
2.1 2.2 水静力学基本微分方程	12
2.1 2.3 重力作用下水静力学基本方程	13
2.1 2.4 静水压强测量	14
2.1 2.5 作用在平面上的静水总压力	16
2.1 2.6 作用在曲面上的静水总压力	22
2.1 本章小结	25
2.1 思考题与习题	26
第3章 水动力学	29
3.1 学习重点	29
3.1 学习目标	29
3.1 3.1 描述液体运动的两种方法	29
3.1 3.2 液体运动的基本概念	31

3.3	恒定流连续性方程	34
3.4	恒定流元流能量方程	36
3.5	恒定流实际液体总流能量方程	39
3.6	恒定流总流动量方程	47
	本章小结	51
	思考题与习题	52
第4章	水流阻力与水头损失	55
	学习重点	55
	学习目标	55
4.1	水流阻力与水头损失的概念	55
4.2	液体运动的两种流态	56
4.3	沿程水头损失计算	59
4.4	局部水头损失计算	69
4.5	有压管道水力计算	72
	本章小结	77
	思考题与习题	77
第5章	明渠水流	80
	学习重点	80
	学习目标	80
5.1	明渠的类型及断面水力要素	80
5.2	明渠均匀流	83
5.3	明渠非均匀流水力现象	94
5.4	临界水深与临界底坡	97
5.5	明渠急变流	101
5.6	明渠渐变流水面曲线定性分析	105
5.7	明渠渐变流水面曲线计算	110
	本章小结	112
	思考题与习题	113
第6章	堰流与闸孔出流	115
	学习重点	115
	学习目标	115
6.1	堰流	115
6.2	闸孔出流	125
6.3	泄水建筑物下游的消能	130
	本章小结	131
	思考题与习题	131
第7章	渗流	132
	学习重点	132
	学习目标	132
7.1	渗流理论	132

7.2 地下明槽非均匀渐变渗流	136
7.3 普通井及井群的渗流	139
7.4 流网及其应用	142
本章小结	146
思考题与习题	146
第8章 波浪理论	148
学习重点	148
学习目标	148
8.1 概述	148
8.2 微幅波理论(线性波理论)	150
8.3 有限振幅 Stokes 波理论	152
8.4 浅水非线性波理论	155
8.5 各行波理论的适用性	156
8.6 流速和潮位影响下的波浪变形计算	157
思考题与习题	161

下篇 桥涵水文

第9章 河川水文基础	163
学习重点	163
学习目标	163
9.1 河川水文现象	163
9.2 河流和流域	164
9.3 河川径流	171
9.4 泥沙运动和河床演变	174
9.5 水文测验	176
本章小结	180
思考题与习题	181
第10章 水文统计原理	182
学习重点	182
学习目标	182
10.1 水文统计的基本概念	182
10.2 经验累积频率曲线	185
10.3 统计参数	187
10.4 理论累积频率曲线	192
10.5 现行频率分析方法	200
10.6 相关分析	208
本章小结	215
思考题与习题	215
第11章 桥涵设计流量与设计水位的推算	217
学习重点	217

学习目标	217
11.1 根据流量观测资料推算设计流量	217
11.2 按洪水调查资料推算设计流量	219
11.3 按暴雨资料推算设计流量	223
11.4 设计水位的推算	231
本章小结	231
思考题与习题	232
第 12 章 大、中桥孔径计算	233
学习重点	233
学习目标	233
12.1 桥涵分类及桥孔设计一般规定	233
12.2 大、中桥孔径计算	234
12.3 桥面设计高程	240
12.4 调治构造物	246
本章小结	251
思考题与习题	251
第 13 章 桥梁墩台冲刷计算	252
学习重点	252
学习目标	252
13.1 墩台冲刷类型	252
13.2 桥下断面一般冲刷深度	253
13.3 墩台局部冲刷深度	256
13.4 墩台基础底面最小埋置深度	261
13.5 桥梁墩台冲刷计算实例	263
本章小结	270
思考题与习题	270
第 14 章 小桥涵水力水文计算	272
学习重点	272
学习目标	272
14.1 概述	272
14.2 小桥孔径计算	274
14.3 涵洞孔径计算	279
14.4 小桥和涵洞孔径估算	284
本章小结	285
思考题与习题	286
参考文献	287

静力荷载计算问题。

(2) 水动力学。关于液体运动的描述, 液体液体在运动状态时, 作用在液体上的力与运动速度之间的关系, 液体施加给固体与建筑荷载。水动力学研究液体运动状态下的力学问题, 主要研究定常、非定常流动, 闸孔出流多相介质流动, 以及流态、流量、水阻、压强、能量损失和输运的计算, 以解决给水排水、灌溉排水、船舶排灌、水力发电、污水处理、海洋工程中的水力学问题。

水力学的主要任务是研究液体(以水为代表)的力学性质、运动规律、工程应用。

2. 水力学的研究方法

在研究和解决水力学问题时, 通常采用理论分析、数值计算和实验分析三种方法。

(1) 理论分析方法。理论分析方法是建立在一般力学原理及连续介质的基本假设前提下, 用数学分析方法, 建立液体运动过程中各种物理量的基本关系式(基本方程组), 然后根据具体问题求解, 并对其解进行分析。由于液体的基本方程组具有很强的非线性, 对于一般问题很难求得解析解, 只有少数简单问题才能得到解析解, 如恒定流的基本方程组, 恒定流的基本方程组, 恒定流的基本方程组。

(2) 数值计算方法。随着电子计算机技术的发展, 数值计算方法在水力学中的应用越来越广泛。数值计算方法是将连续介质力学的基本方程组离散化, 使水力学问题转化为代数方程组, 然后用计算机求解。数值计算方法一般分为有限差分法、有限元法和有限差分法。

水力学

(3) 实验方法。水力学问题如从基本运动方程的解析解分析, 属于强非线性偏微分方程组, 难以求得解析解。因此, 水力学实验是水力学研究的重要手段。水力学实验分为物理模型实验和数学模型实验。物理模型实验是在实验室中, 通过物理模型, 模拟实际工程中的水力学现象, 通过实验数据, 验证理论分析的结果。数学模型实验是利用计算机, 对水力学问题进行数值模拟, 通过数值结果, 验证理论分析的结果。水力学实验是水力学研究的重要手段, 也是水力学工程应用的基础。

1. 连续介质假设

水力学研究对象是液体。从微观角度分析, 液体是由大量分子组成的, 分子之间存在空隙。用数学观点分析, 液体的物理量在空间上是连续分布的, 即液体在空间上是连续分布的。然而, 从微观角度分析, 液体是由大量分子组成的, 分子之间存在空隙。用数学观点分析, 液体的物理量在空间上是连续分布的, 即液体在空间上是连续分布的。然而, 从微观角度分析, 液体是由大量分子组成的, 分子之间存在空隙。用数学观点分析, 液体的物理量在空间上是连续分布的, 即液体在空间上是连续分布的。

第 1 章

绪 论

学习重点

连续介质基本假设, 理想液体、实际液体的概念; 以及与水力学有关的液体密度、重度、黏滞性的概念; 牛顿内摩擦定律表达式及其应用。

学习目标

了解水力学的任务与研究方法; 掌握连续介质假设和水力学模型, 掌握液体的主要物理性质; 熟悉作用在液体上的力。

水力学是土木工程专业的建筑工程、道路与桥梁工程、地下工程、铁道工程方向的一门专业基础课。它是力学学科的一个分支, 是以水为模型研究液体宏观机械运动的规律及其在工程中应用的一门科学。

在土木工程建设中, 从勘测、设计、施工到维修养护, 许多地方都涉及水的问题。例如: 桥梁因洪水的冲击、冲刷而破坏; 沿河公路及其冲刷防护构造物因洪水的冲击与淘刷而坍塌; 山区各类小型人工排水建筑物因暴雨洪水而毁坏; 滑坡、崩塌、泥石流、路面翻浆、路基的沉陷与滑动等地质病害。因此, 为使路基经常处于干燥、坚固和良好的稳定状态, 必须修筑相应的截水沟、边沟、排水沟、急流槽等地表水排水沟渠, 以及渗水暗沟、盲沟等各类地下排水设施; 公路跨越河流、沟、山体, 需要修建桥梁、涵洞、倒虹吸管或透水路堤; 在山区河流坡陡水流急的地方, 为保护路基、桥梁不被水流冲毁, 必须修建急流槽、跌水和其他消能设施。上述一系列工程设施的设计计算, 如桥梁涵洞孔径的计算、排水沟渠尺寸的确定、沿河路基防护工程的形式、尺寸的选择以及防护区域的确定等, 都必须运用水力学知识来解决, 这就要求从事土木工程的技术人员必须掌握有关水力学原理, 根据工程特点, 因地制宜地解决相关工程问题。

1.1 水力学的研究内容与研究方法

1. 水力学的研究内容

水力学主要研究液体静止、运动状态时, 作用在液体上各种力之间的关系以及各种力与运动要素之间的关系。水力学分为水静力学和水动力学两大学科内容。

(1) 水静力学 关于液体平衡的规律, 即静止或相对平衡时, 作用在液体上各种力之间的相互关系。水静力学研究液体静止或相对静止状态下的力学规律及其应用, 探讨液体内部压强分布, 液体对固体接触面的压力, 液体对浮体和潜体的浮力及浮体的稳定性, 以解决蓄水容器, 输水管渠, 挡水构筑物, 沉浮于水中的构筑物, 如水池、水箱、水管、闸门。堤坝、船舶等的

静力荷载计算问题。不同。冰的密度 $\rho_{\text{冰}} = 916.7 \text{ kg/m}^3$ 、水的密度 $\rho_{\text{水}} = 999.84 \text{ kg/m}^3$ 。

(2) 水动力学 关于液体运动的规律,研究液体在运动状态时,作用在液体上的力与运动要素之间的关系,液体的运动特性与能量转换。水动力学研究液体运动状态下的力学规律及其应用,主要探讨管流、明渠流、堰流、闸孔出流多孔介质渗流的流动规律,以及流速、流量、水深、压力、水工建筑物结构的计算,以解决给水排水、道路桥涵、逐田排灌、水力发电、防洪除涝、河道整治及港口工程中的水力学问题。

水力学的主要任务是研究液体(以水为代表)的力学性质、运动规律、工程应用。

2. 水力学的研究方法

在研究和解决水力学问题时,通常应用理论分析、数值计算和实验分析三种方法。

(1) 理论分析方法 理论分析方法是在一般力学原理及连续介质的基本假设前提下,用数学分析方法,建立液体运动过程中各种物理量的基本关系式(基本方程组),然后根据具体问题求解,并对其解进行分析。由于液体的基本方程组具有很强的非线性,对于一般问题较难求解,只有很少问题才能求得完整的理论解。

(2) 数值计算方法 随着电子计算机技术和数值计算方法的发展,产生了广泛应用于实际工程中的数值计算方法。该方法就是通过数学近似解的方法,使理论解无法求得的问题能用近似的方法进行表达,使水力学基本理论在实际工程中得到应用。数值计算方法一般包括有限基本解法、有限元法和有限差分法。

(3) 实验方法 水力学问题如从基本运动方程的属性来分析,属于强非线性偏微分方程范畴,一般用理论无法求得,有时用数值计算方法也很困难,解决问题的唯一方法就是实验。常用的实验方法有原型观测和模型试验,实验是水力学中不可缺少的一种常用方法。水力学是一门经验性的学科通过实验或模型实验,解决工程实际问题,同时能充分了解液体运动的规律,使基本方程得以简化。

在解决实际工程问题过程中,现代水力学经常将上述三种方法同时应用,使工程问题得以较为完整的解决。

1.2 连续介质假设和水力学模型

客观上存在的实际流动、物质结构和物理性质非常复杂,如果考虑所有因素,将很难推导出其力学关系式。因此在分析水力学问题中,对液体加以科学的抽象,以便列出液体运动规律的数学方程式。这种研究问题的方法,在固体力学中也常采用,如刚体、弹性体等。

1. 连续介质假设

水力学研究对象是液体。从微观角度分析,液体是由大量分子构成的,分子与分子间存在空隙。用数学观点分析,液体的物理量在空间上分布是不连续的,加上分子随机无规律的热运动,也导致物理量在时间坐标轴上的不连续。然而水力学是研究液体的宏观运动规律,从宏观角度来看,几乎观察不到分子间的空隙,在标准状态下, 1 cm^3 的水中约有 3.34×10^{22} 个水分子,相邻分子间距离约为 $3 \times 10^{-8} \text{ cm}$,分子间的间距从宏观角度来讲完全可以忽略不计。因此,对于液体的宏观运动而言,可以把液体视为由无数质点组成、没有空隙的连续体,并认为液体各物理量变化也是连续的,这种假设的连续体称为连续介质。

把液体视为连续介质,可应用高等数学中连续函数来表达液体中各种物理量随空间、时间的变化关系。

2. 理想液体和实际液体

古典水力学是以理想液体作为研究对象。理想液体是指没有黏滞性的液体。黏滞性是液体最突出、最重要的物理特性。因此,理想液体实际上不存在,是一种为简化理论分析的假想物理模型。现代水力学是在经典水力学理论的基础上,以实际液体作为研究对象。实际液体是指具有黏滞性的一切真实液体。运用理论分析与实验研究相结合的方法,对实际液体进行实验,验证或补充理论分析,在水力学的理论公式中,列入一些由实验得到的系数,可以使理论公式更具实用性。

3. 不可压缩液体

不可压缩液体,就是不计压缩性和热胀性,是对液体物理性质的简化。液体的压缩性和热胀性均很小,密度可视为常数,通常用不可压缩模型。气体在大多数情况下,也可采用不可压缩模型,只有在某些情况下,如气流速度很大,接近或超过声速,或者在流动过程中其密度变化很大,这时必须用可压缩模型来处理。本课程主要讨论不可压缩液体。

1.3 液体的主要物理性质

自然界物质通常以固体、液体和气体三种形态存在,而液体和气体统称为流体。在一定条件下,液体具有一定体积,其形状随容器形状而变化,并能形成自由表面。从力学分析的意义上看,以水为代表的液体,在其运动过程中,表现出与固体不同的特点,其主要差别在于它们对外力的抵抗能力不同。固体由于其分子间距离很小,内聚力很大,所以它可以保持一定的形状和体积,能抵抗一定的拉力、压力和剪力。而液体则由于分子间距离较大,内聚力很小而几乎不能承受拉力。运动液体具有一定的抗剪切能力,但静止液体则不能抵抗剪力,即使在很小的剪力作用下,静止液体都将发生连续不断的变形运动,直到剪力消失为止,所以水是一种极易流动的物质,这个性质称为液体的易流动性。液体与气体的主要差别在于液体分子内聚力比气体分子内聚力大得多。因此,气体易于压缩,而液体难于压缩。但是,当所研究的气流运动速度远小于声速时,气体的密度变化很小,气体的运动规律与水流相同。因此,水力学的基本原理在一定条件下也适用于气体。

工程实际中,液体流动形式是多样的,但无论液体流动状态如何变化,其影响因素主要是液体本身的物理性质和外界的作用力。以下从宏观角度研究液体的主要物理性质。

1. 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 ρ 表示。按定义有

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{均质液体} \quad \rho = \frac{m}{V} \\ \text{非均质液体} \quad \rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \\ \text{一般液体} \quad \rho = \rho(x, y, z, t) \end{array} \right. \quad (1-1)$$

式中 V ——液体体积, (m^3);

t ——时间, (s)。

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, $\rho=1000\text{kg}/\text{m}^3$; $t=0\sim 30^\circ\text{C}$ 时,密度变化很小,其密度只减小了 0.4%,但当 $t=80\sim 100^\circ\text{C}$ 时,其密度比 4°C 时的密度减小 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采用防冰冻破坏措施。

2. 重力和重度

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，常用符号 γ 表示。按定义有

$$\left\{\begin{array}{l} \text{均质液体} \quad \gamma=\frac{G}{V} \\ \text{非均质液体} \quad \gamma=\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V}=\frac{dG}{dV} \\ \text{一般液体} \quad \gamma=\gamma(x,y,z,t) \end{array}\right. \quad (1-2)$$

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，质量的单位为千克 (kg)，长度的单位为米 (m)，时间的单位为秒 (s)，力的单位为牛顿 (N)，重度的单位为牛顿/立方米 (N/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，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 $\gamma=9800\text{N/m}^3=9.8\text{kN/m}^3$ ，汞的重度 $\gamma_{\text{p}}=133.28\text{kN/m}^3$ 。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。

3. 易流动性与黏滞性

静止液体不能承受剪力、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接触的界面上存在剪力，而且使液体内部的流层间也会出现成对的剪力，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。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。

表 1-1 不同温度下纯水的物理特性

$t/^{\circ}\text{C}$	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	$\mu\times 10^{-3}/\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu\times 10^{-6}/(\text{m}^2/\text{s})$	p_{s}/kPa	$\sigma/(\text{N/m})$
0	9.805	999.9	1.781	1.785	0.61	0.0756
4	9.800	1000.0	1.567	1.567	—	—
10	9.804	999.7	1.307	1.306	1.23	0.0742
15	9.798	999.1	1.139	1.139	1.70	0.0735
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.34	0.0728
25	9.777	997.0	0.890	0.893	3.17	0.0720
30	9.746	995.7	0.798	0.800	4.24	0.0712
40	9.730	992.2	0.653	0.658	7.38	0.0696
50	9.689	988.0	0.547	0.553	12.33	0.0679
60	9.642	983.2	0.466	0.474	19.92	0.0662
70	9.589	977.8	0.404	0.413	31.16	0.0644
80	9.530	971.8	0.354	0.364	47.34	0.0626
90	9.466	965.3	0.315	0.326	70.10	0.0608
100	9.399	958.4	0.282	0.294	101.33	0.0589

注： t —水温； γ —重度； ρ —密度； μ —动力黏度； ν —运动黏度； p_{s} —汽化压强； σ —表面张力。

表 1-2 几种常见液体的重度

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

1686 年, 牛顿 (Newton) 通过平板试验发现了流体的黏滞性, 提出了牛顿内摩擦定律。

牛顿平板试验装置如图 1-1a 所示, 由两平行平板组成, 其间距为 h , 两板间充满了液体, 上板可做平行滑动, 下板固定不动。当上板受力 F 作用出现匀速运动时, 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 做水平滑动时, 紧贴板面的液体将随板做同样速度运动。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 1-1a 所示, 有

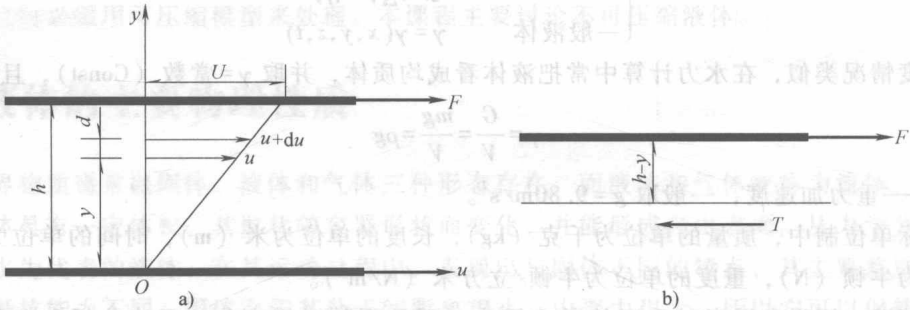


图 1-1 黏滞性试验示意图

$$\begin{cases} u(y) = \frac{U}{h}y \\ \frac{du}{dy} = \frac{U}{h} \end{cases} \quad (1-4)$$

设平板面积为 A , 牛顿试验得出液体内摩擦力关系有

$$\begin{cases} T \propto \frac{AU}{h} \\ \begin{cases} T = \mu \frac{AU}{h} = \mu A \frac{du}{dy} \\ \tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{U}{h} \end{cases} \end{cases} \quad (1-5)$$

式中 τ ——液体内摩擦切应力, (Pa);

$\frac{du}{dy}$ ——流速梯度, 流速沿 y 方向的变化率;

μ ——动力黏度, 又称绝对黏度或动力黏滞系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s}$)。

式 (1-5) 即牛顿内摩擦定律。在分析黏性液体运动规律中, 动力黏滞系数与密度 ρ 的比值称为运动黏滞系数, 用 ν 表示, 即

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

式中 ν ——液体的运动黏度, 又称运动黏滞系数 (m^2/s)。

水的运动黏度可按泊肃叶 (Poiseuille) 公式计算

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

式中 t ——水温, ($^{\circ}\text{C}$);

ν ——运动黏度, (cm^2/s)。

由式 (1-5) 可知, 当 $u=0$ (静止液体) 或 $u=\text{Const}$ (无相对运动液体) 时, $\frac{du}{dy}=0$, $\tau=0$ 。

凡 τ 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。本书所讨论的液体限于牛顿液体。

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

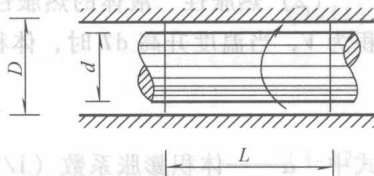
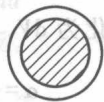


图 1-2 【例 1-1】图

解: 转轴与轴承的间隙很小, 可认为流速近似直线分布。

$$\text{其中转轴的线速度 } U = \frac{nd\pi}{60} = \frac{1000 \times 9.96 \times \pi}{60} \text{ cm/s} = 521.5 \text{ cm/s}$$

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

$$\frac{du}{dy} = \frac{U}{h} = \frac{521.5}{0.02} \text{ s}^{-1} = 26075 \text{ s}^{-1}$$

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{U}{h} = 0.16 \times 26075 \text{ Pa} = 4172 \text{ Pa}$$

$$M = \tau \pi d L \frac{d}{2} = 4172 \times \pi \times \frac{0.0996^2}{2} \times 0.08 \text{ N}\cdot\text{m} = 5.2 \text{ N}\cdot\text{m}$$

4. 压缩性与热胀性

(1) 压缩性与弹性 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 β 和弹性系数 k 表示。在一定温度下, 液体原有的体积为 V , 在压强增量 dp 作用下, 体积改变了 dV , 则压缩系数为

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \\ \text{弹性系数 } k = \frac{1}{\beta} = -\frac{dp}{dV/V} \end{array} \right. \quad (1-8)$$

式中 β ——压缩系数 (m^2/N);

k ——弹性系数 (N/m^2);

V ——液体体积 (m^3);

p ——外加压强 (Pa)。

β 值越大, 液体越易压缩, k 值越大, 液体越不易压缩。同一种液体的 β 和 k 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胡克定律。因 dV 与 dp 的符号相反，为使 β 和 k 保持正值，故式 (1-8) 中引入“-”号。

表 1-3 为水在 0℃ 时，不同压强下的压缩系数。

表 1-3 水在不同压强下的压缩系数

压强/kPa	500	1000	2000	4000	8000
压缩系数 $\beta/(m^2/N)$	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}

从表 1-3 可以看出：水的压缩系数很小。例如：压强从 4000kPa 增加到 8000kPa 时，相对体积的变化只有大约 0.2%。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。

(2) 热胀性 液体的热胀性可用体积膨胀系数 α 来表示。在一定的压力下，液体原有的体积为 V ，当温度升高 dT 时，体积的变化为 dV ，则

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \tag{1-9}$$

式中 α ——体积膨胀系数 ($1/^\circ C$)。

5. 汽化特性和表面张力

(1) 汽化 液体分子逸出液面向空间扩散的现象，称为汽化。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。

液体汽化为蒸汽，蒸汽凝结又可成为液体，其中凝结是汽化的逆过程。在液体中，汽化和凝结同时存在，当这两个过程达到动态平衡时，宏观汽化现象随之停止，此时液体的绝对压强（即液体中的实有压强）称为汽化压强或饱和蒸汽压强，常用 p_s 表示。液体的汽化压强与温度有关，水的汽化压强见表 1-1。液体发生汽化的条件是

$$p_{abs} \leq p_s \tag{1-10}$$

式中 p_{abs} ——液体中某处的绝对压强，(Pa)；

p_s ——汽化压强，(Pa)。

液体汽化可以发生在液面，也可以发生在液体内部。液体汽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振动等。因此，预防汽化的出现是水力计算要解决的问题之一。

(2) 表面张力 由于分子间的吸引力，在液体自由表面上能够承受极其微小的张力，这种张力称为表面张力。表面张力不仅在液体与气体接触的周界面上发生，而且在液体与固体（汞和玻璃等），或一种液体与另一种液体（汞和水等）相接触的周界上发生。

表面张力常用表面张力系数 σ 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。当 $t=20^\circ C$ 时，水的表面张力系数 $\sigma=0.073N/m$ ，汞的表面张力系数 $\sigma=0.54N/m$ 。不同温度下水的表面张力系数见表 1-1。

对液体，表面张力在平面上并不产生附加压力，它只有在曲面上才产生附加压力，以维持平衡。因此，在工程问题中，液体只要有曲面的存在就会有表面张力的附加压力作用。例如，液体中的气泡，气体中的液滴，液体的自由射流，液体表面和固体壁面相接触等。所有这些情况，都会出现曲面，都会引起表面张力，从而产生附加压力。

一般土木工程问题，表面张力很小，它只在液体界面上起作用，液体内部并不存在其作用，常忽略不计。