

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

# 水力学

*Hydraulic*

(第二版)

王亚玲 主编  
田伟平 谢雪芬 主审



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

# 水 力 学

(第二版)

王亚玲 主编  
田伟平 谢雪芬 主审



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书根据高等学校道路桥梁与渡河工程专业以及土木工程专业道路、桥梁、岩土与隧道等方向水力学课程的基本要求以及少学时教学要求编写。全书共分九章,内容包括:绪论、水静力学、水动力学基本定律、水流阻力、明渠均匀流、明渠非均匀流、堰流、小桥与涵洞水力计算及渗流。

本书主要适于道路桥梁与渡河工程专业以及土木工程专业道路、桥梁、岩土与隧道等方向的本科生使用,还可作为相关专业的选修课教材,亦可供研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水力学/王亚玲主编. --2版. --北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.5

ISBN 978-7-114-12223-1

I. ①水… II. ①王… 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(2015)第 093711 号

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

书 名:水力学(第二版)

著 者:王亚玲

责任编辑:郑蕉林

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:12

字 数:284千

版 次:2005年6月 第1版 2015年6月 第2版

印 次:2015年6月 第1次 总第6次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12223-1

定 价:25.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

## 高等学校交通运输与工程(道路、桥梁、隧道 与交通工程)教材建设委员会

主任委员: 沙爱民 (长安大学)

副主任委员: 梁乃兴 (重庆交通大学)

陈艾荣 (同济大学)

徐岳 (长安大学)

黄晓明 (东南大学)

韩敏 (人民交通出版社股份有限公司)

委员: (按姓氏笔画排序)

马松林 (哈尔滨工业大学)

王云鹏 (北京航空航天大学)

石京 (清华大学)

申爱琴 (长安大学)

朱合华 (同济大学)

任伟新 (合肥工业大学)

向中富 (重庆交通大学)

刘扬 (长沙理工大学)

刘朝晖 (长沙理工大学)

刘寒冰 (吉林大学)

关宏志 (北京工业大学)

李亚东 (西南交通大学)

杨晓光 (同济大学)

吴卫国 (武汉理工大学)

吴瑞麟 (华中科技大学)

何民 (昆明理工大学)

何东坡 (东北林业大学)

张顶立 (北京交通大学)

张金喜 (北京工业大学)

陈红 (长安大学)

陈峻 (东南大学)

陈宝春 (福州大学)

陈静云 (大连理工大学)

邵旭东 (湖南大学)

项贻强 (浙江大学)

郭忠印 (同济大学)

黄侨 (东南大学)

黄立葵 (湖南大学)

黄亚新 (解放军理工大学)

符锌砂 (华南理工大学)

葛耀君 (同济大学)

裴玉龙 (东北林业大学)

戴公连 (中南大学)

秘书长: 孙玺 (人民交通出版社股份有限公司)

# 第二版前言

《水力学》(第一版)作为面向 21 世纪交通版全国高等学校道路与铁道工程、桥梁与隧道工程的专业教材,于 2005 年 6 月出版。为顺应高等教育改革的形势,注重学生基本素质、基本技能的培养,把握好技术与教学内容的关系,使教材先进性与实用性兼备,需要对第一版教材进行修订。

此次修订力求体现“重基础、宽专业、讲实用”,形成以理论分析为主、理论与实践相统一的教材体系,充分反映专业特色。除保持原书体系、注重加强基本理论和基本概念以外,调整了部分内容,适当增加了一些新内容。为了巩固理论联系实际和培养学生计算能力,各章均配备了例题和习题。

全书共分九章,其中第一章、第五章、第六章和第九章由王亚玲教授编写,第二章、第三章由张艳杰副教授编写,第四章、第七章和第八章由李家春副教授编写。全书由王亚玲教授统稿。

衷心感谢长安大学田伟平教授、中交第一公路勘察设计研究院谢雪芬教授级高工为本书所做的审稿工作,并提出了具体的修改意见。

由于编者水平所限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者指正。

编者

2015 年 1 月

# 第一版前言

水力学是道路与铁道工程、桥梁工程专业的技术基础课。它的主要任务是使学生掌握必要的水力学基本概念、基本原理、基本计算方法和基本实验技能,并为以后学习专业课程和从事科学研究工作打下一定的基础。

随着高等学校教学改革和课程建设的不断进行,水力学课程的授课学时有了较大幅度的减少。本书贯彻“少而精”的原则,编写时力求做到内容精练,本着道路和铁道工程、桥梁工程专业密切结合的宗旨来阐述水力学的基本概念、基本原理和基本方法,授课学时控制在40学时内,并且做到结构合理、重点突出。

全书共分八章,前三章为理论基础部分,其他章节为不同水力现象的具体分析。为了巩固理论联系实际和培养学生分析问题和水力计算的能力,各章均配备了一定数量的例题和习题。

参加本书编写工作的有王亚玲(第一、五、六章)、张艳杰(第二、三章)、李家春(第四、七、八章)。全书由王亚玲统稿、主编。本书由长安大学田伟平教授、中交第一公路勘察设计院谢雪芬教授级高工主审,在审稿过程中,两位教授提出了很多宝贵意见和建议,在此致以衷心的感谢。由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者多予指正。

编者

2005年4月

# 人民交通出版社股份有限公司 公路出版中心

## 土木工程/道路桥梁与渡河工程类教材

### 一、专业基础课

1. 材料力学(郭应征)..... 25 元
2. 理论力学(周志红)..... 29 元
3. 工程力学(郭应征)..... 25 元
4. 结构力学(肖永刚)..... 32 元
5. 材料力学(上册)(李银山)..... 49 元
6. 弹性力学(孔德森)..... 20 元
7. 水力学(第二版)(王亚玲)..... 25 元
8. 土质学与土力学(第四版)(袁聚云)..... 30 元
9. 土木工程制图(第三版)(林国华)..... 39 元
10. 土木工程制图习题集(第三版)(林国华)..... 25 元
11. 土木工程制图(第二版)(丁建梅)..... 39 元
12. 土木工程制图习题集(第二版)(丁建梅)..... 22 元
13. ◆土木工程计算机绘图基础(第二版)  
(袁果)..... 45 元
14. ▲道路工程制图(第四版)(谢步瀛)..... 36 元
15. ▲道路工程制图习题集(第四版)(袁果)..... 26 元
16. 交通土建工程制图(第二版)(和丕壮)..... 39 元
17. 交通土建工程制图习题集(第二版)  
(和丕壮)..... 22 元
18. 现代土木工程(付宏渊)..... 36 元
19. 土木工程概论(项海帆)..... 32 元
20. 道路概论(第二版)(孙家驹)..... 20 元
21. 桥梁工程概论(第三版)(罗娜)..... 32 元
22. 道路与桥梁工程概论(第二版)(黄晓明)..... 40 元
23. 道路与桥梁工程概论(苏志忠)..... 33 元
24. 公路工程地质(第三版)(窦明健)..... 23 元
25. 工程测量(胡伍生)..... 25 元
26. 交通土木工程测量(第四版)(张坤宜)..... 48 元
27. ◆测量学(第四版)(许娅姪)..... 45 元
28. 测量学(姬玉华)..... 34 元
29. 测量学实验及应用(孙国芳)..... 20 元
30. ◆道路工程材料(第五版)(李立寒)..... 45 元
31. ◆道路工程材料(申爱琴)..... 45 元
32. ◆基础工程(第四版)(王晓谋)..... 37 元
33. 基础工程(丁剑霞)..... 40 元
34. ◆基础工程设计原理(第二版)(袁聚云)..... 36 元
35. 桥梁墩台与基础工程(第二版)(盛洪飞)..... 49 元
36. ▲结构设计原理(第三版)(叶见曙)..... 59 元
37. ◆Principle of Structural Design(结构设计原理)  
(第二版)(张建仁)..... 60 元
38. ◆预应力混凝土结构设计原理(第二版)  
(李国平)..... 30 元
39. 专业英语(第三版)(李嘉)..... 39 元
40. 土木工程材料(孙凌)..... 48 元

### 二、专业核心课

1. ◆路基路面工程(第四版)(黄晓明)..... 59 元
2. 路基路面工程(何兆益)..... 45 元
3. ◆▲路基工程(第二版)(凌建明)..... 25 元
4. ◆道路勘测设计(第三版)(杨少伟)..... 42 元
5. ◆道路勘测设计(第三版)(孙家驹)..... 52 元
6. 道路勘测设计(裴玉龙)..... 38 元
7. ◆公路施工组织及概预算(第三版)(王首绪)..... 32 元
8. 公路施工组织与概预算(靳卫东)..... 45 元
9. 公路施工组织与管理(赖少武)..... 35 元
10. 公路工程施工组织学(第二版)(姚玉玲)..... 38 元
11. ◆桥梁工程(第二版)(姚玲森)..... 62 元
12. 桥梁工程(土木、交通工程)(第三版)  
(邵旭东)..... 59 元
13. ◆桥梁工程(上册)(第二版)(范立础)..... 54 元
14. ◆桥梁工程(下册)(第二版)(顾安邦)..... 49 元
15. 桥梁工程(第二版)(陈宝春)..... 49 元
16. ◆桥涵水文(第四版)(高冬光)..... 28 元
17. 水力学与桥涵水文(第二版)(叶镇国)..... 46 元
18. ◆公路小桥涵勘测设计(第四版)(孙家驹)..... 31 元
19. ◆现代钢桥(上)(吴冲)..... 34 元
20. ◆钢桥(第二版)(徐君兰)..... 45 元
21. ▲桥梁施工及组织管理(上)(第二版)  
(魏红一)..... 39 元
22. ▲桥梁施工及组织管理(下)(第二版)  
(邬晓光)..... 39 元
23. ◆隧道工程(第二版)(上)(王毅才)..... 65 元
24. 公路工程施工技术(第二版)(盛可鉴)..... 38 元
25. 桥梁施工(第二版)(徐伟)..... 49 元
26. ▲隧道工程(杨林德)..... 55 元
27. 道路与桥梁设计概论(程国柱)..... 42 元
28. ◆桥梁工程控制(向中富)..... 38 元
29. 桥梁结构电算(周水兴)..... 35 元
30. 桥梁结构电算(第二版)(石志源)..... 35 元
31. 土木工程施工(王丽荣)..... 58 元

### 三、专业选修课

1. 土木规划学(石京)..... 38 元
2. 道路规划与设计(符铎砂)..... 46 元
3. ◆道路工程(第二版)(严作人)..... 46 元
4. 道路工程(第二版)(凌天清)..... 35 元
5. ◆高速公路(第三版)(方守恩)..... 34 元
6. 高速公路设计(赵一飞)..... 38 元
7. 城市道路设计(第二版)(吴瑞麟)..... 26 元
8. 公路施工技术与管理(第二版)(廖正环)..... 40 元

注:◆教育部普通高等教育“十一五”、“十二五”国家级规划教材  
▲建设部土建学科专业“十一五”规划教材

9. ◆公路养护与管理(马松林).....	28元
10. 路基支挡工程(陈忠达).....	42元
11. 路面养护管理与维修技术(刘朝晖).....	42元
12. 路面养护管理系统(武建民).....	30元
13. 道路与桥梁工程计算机绘图(许金良).....	31元
14. 公路计算机辅助设计(符铎砂).....	30元
15. 交通计算机辅助工程(任刚).....	25元
16. 测绘工程基础(李芹芳).....	36元
17. GPS测量原理及其应用(胡伍生).....	28元
18. 现代道路交通检测原理及应用(孙朝云).....	38元
19. 公路测设新技术(雒应).....	36元
20. 道路与桥梁检测技术(第二版)(胡昌斌).....	40元
21. 特殊地区基础工程(冯忠居).....	29元
22. 软土环境工程地质学(唐益群).....	35元
23. 地质灾害及其防治(简文彬).....	28元
24. ◆环境经济学(第二版)(董小林).....	40元
25. 桥位勘测设计(高冬光).....	20元
26. 桥梁钢—混凝土组合结构设计原理 (黄侨).....	26元
27. 桥梁结构理论与计算方法(贺拴海).....	58元
28. ◆桥梁建筑美学(第二版)(盛洪飞).....	30元
29. 桥梁美学(和丕壮).....	40元
30. 桥梁检测与加固(王国鼎).....	27元
31. 桥梁抗震(第二版)(叶爱君).....	20元
32. 钢管混凝土(胡曙光).....	38元
33. 大跨度桥梁结构计算理论(李传习).....	18元
34. ◆浮桥工程(王建平).....	36元
35. 隧道结构力学计算(第二版)(夏永旭).....	34元
36. 公路隧道运营管理(吕康成).....	22元
37. 隧道与地下工程灾害防护(张庆贺).....	45元
38. 公路隧道机电工程(赵忠杰).....	40元
39. 地下空间利用概论(叶飞).....	30元
40. 建设工程监理概论(张爽).....	35元
41. 建筑设备工程(刘丽娜).....	39元
42. 机场规划与设计(谈至明).....	35元

#### 四、实践环节教材及教参教辅

1. 土木工程试验(张建仁).....	38元
2. 土工试验指导书(袁聚云).....	16元
3. 桥梁结构试验(第二版)(章关永).....	30元
4. 桥梁计算示例丛书—桥梁地基与基础(第二版) (赵明华).....	18元
5. 桥梁计算示例丛书—混凝土简支梁(板)桥 (第三版)(易建国).....	26元
6. 桥梁计算示例丛书—连续梁桥(邹毅松).....	58元
7. 结构设计原理计算示例(叶见曙).....	40元
8. 土力学与基础工程习题集(张宏).....	20元
9. 道路工程毕业设计指南(应荣华).....	34元
10. 桥梁工程毕业设计指南(向中富).....	35元

#### 五、研究生教材

1. 路面设计原理与方法(第三版)(黄晓明).....	68元
2. 沥青与沥青混合料(郝培文).....	35元
3. 水泥与水泥混凝土(申爱琴).....	30元
4. 现代无机道路工程材料(梁乃兴).....	42元
5. 现代加筋土理论与技术(雷胜友).....	24元
6. 道路规划与几何设计(朱照宏).....	32元
7. 高等桥梁结构理论(第二版)(项海帆).....	70元
8. 桥梁概念设计(项海帆).....	68元
9. 桥梁结构体系(肖汝诚).....	78元
10. 高等钢筋混凝土结构(周志祥).....	27元
11. 结构分析的有限元法与MATLAB程序设计 (徐荣桥).....	28元
12. 工程结构数值分析方法(夏永旭).....	27元
13. 箱形梁设计理论(第二版)(房贞政).....	32元

#### 六、应用型本科教材

1. 结构力学(第二版)(万德臣).....	30元
2. 结构力学学习指导(于克萍).....	22元
3. 结构设计原理(黄平明).....	47元
4. 结构设计原理学习指导(安静波).....	35元
5. 结构设计原理计算示例(赵志蒙).....	40元
6. 工程力学(喻小明).....	55元
7. 土质学与土力学(赵明阶).....	30元
8. 水力学与桥涵水文(王丽荣).....	27元
9. 道路工程制图(谭海洋).....	28元
10. 道路工程制图习题集(谭海洋).....	24元
11. 土木工程材料(张爱勤).....	39元
12. 道路建筑材料(伍必庆).....	37元
13. 路桥工程专业英语(赵永平).....	44元
14. 工程测量(朱爱民).....	30元
15. 道路工程(贾建民).....	30元
16. 路基路面工程(陈忠达).....	46元
17. 道路勘测设计(张维全).....	32元
18. 基础工程(刘辉).....	26元
19. 桥梁工程(第二版)(刘龄嘉).....	49元
20. 工程招投标与合同管理(第二版)(刘燕).....	39元
21. 道路工程CAD(杨宏志).....	23元
22. 工程项目管理(李佳升).....	32元
23. 公路施工技术(杨渡军).....	64元
24. 公路工程试验检测(乔志琴).....	47元
25. 工程结构检测技术(刘培文).....	52元
26. 公路工程经济(周福田).....	22元
27. 公路工程监理(朱爱民).....	33元
28. 公路工程机械化施工技术(徐永杰).....	22元
29. 城市道路工程(徐亮).....	29元
30. 公路养护技术与管理(武鹤).....	58元
31. 公路工程预算与工程量清单计价(第二版) (雷书华).....	40元

教材详细信息,请查阅“中国交通书城”(www.jtbook.com.cn)

咨询电话:(010)85285867,85285984

道路工程课群教学研讨QQ群(教师) 328662128

桥梁工程课群教学研讨QQ群(教师) 138253421

交通工程课群教学研讨QQ群(教师) 185830343

交通专业学生讨论QQ群 433402035



# 目录

第一章 绪论	1
第一节 水力学及其应用	1
第二节 液体的主要物理性质	2
第三节 连续介质和理想液体	7
第四节 作用在液体上的力	8
习题	9
第二章 水静力学	11
第一节 静水压强及其特性	12
第二节 重力作用下水静力学基本方程	14
第三节 静水压强的测量	16
第四节 静水压强分布图	19
第五节 作用于平面上的静水总压力	20
第六节 作用于曲面上的静水总压力	24
第七节 浮力、浮体及浮体的稳定	27
习题	32
第三章 水动力学基本定律	35
第一节 描述液体运动的两种方法	36
第二节 液体运动的基本概念	38
第三节 液体运动的分类	42

第四节	连续方程	45
第五节	理想液体的运动微分方程(欧拉运动微分方程)	49
第六节	恒定元流的能量方程	50
第七节	水头线和水头线坡度	53
第八节	实际液体恒定总流的能量方程	55
第九节	能量方程的应用	61
第十节	实际液体恒定总流的动量方程	67
	习题	72
<b>第四章</b>	<b>水流阻力</b>	<b>75</b>
第一节	水流阻力与水头损失的分类	75
第二节	液体流动的两种形态及判别	77
第三节	均匀流的基本方程	81
第四节	层流均匀流	83
第五节	紊流特征	85
第六节	紊流均匀流的计算公式及其沿程阻力系数	91
第七节	局部水头损失	98
第八节	短管的水力计算	103
	习题	108
<b>第五章</b>	<b>明渠均匀流</b>	<b>110</b>
第一节	明渠均匀流的水力特性和基本公式	110
第二节	水力最优断面	113
第三节	允许流速	115
第四节	明渠均匀流的水力计算	116
第五节	无压圆管均匀流	119
	习题	122
<b>第六章</b>	<b>明渠非均匀流</b>	<b>123</b>
第一节	概述	123
第二节	明渠中的三种水流状态判别	124
第三节	临界水深和临界坡度	128
第四节	渐变流水面曲线形状的定性分析	132

第五节 渐变流水面曲线的绘制	137
第六节 水跃	139
习题	144
<b>第七章 堰流</b>	<b>146</b>
第一节 堰的类型	146
第二节 薄壁堰	148
第三节 实用堰	151
第四节 宽顶堰	151
习题	155
<b>第八章 小桥与涵洞水力计算</b>	<b>156</b>
第一节 小桥水力计算	156
第二节 涵洞水力计算	160
第三节 跌水和急流槽	165
习题	168
<b>第九章 渗流</b>	<b>169</b>
第一节 概述	169
第二节 无压均匀渗流	171
第三节 无压渐变渗流	171
第四节 渐变渗流的实例	175
习题	177
<b>参考文献</b>	<b>178</b>

## 第一章

# 绪 论

### 【学习目的与要求】

通过“水力学及其应用”学习,了解水力学的发展史、学习目的和任务,掌握液体的主要物理性质,熟悉作用在液体上的力的分类。

## 第一节 水力学及其应用

水力学是用实验与理论分析的方法,研究以水为代表的液体平衡和机械运动规律的一门实用科学,可依据这些规律来解决实际工程中有关水的问题。

作为实用科学的水力学,要解决工程实践中急需解决的很多问题。对于复杂的水力现象除了进行必要的理论分析外,还必须借助水力实验以弥补理论分析的不足。因此,水力学中的实验研究具有很重要的地位。

从水力学的发展史来看,水力学大致沿着两个方向发展:一是在古典力学的基础上,运用严格的数学分析来描述液体运动的普遍规律,称为理论的或经典的水动力学,经典水动力学是以完全没有阻力的水流作为研究对象,对于管流、明渠水流等以阻力为主的情况,则不能得到符合实际的结果;二是主要依靠实验方法而建立的实验水力学,实验水力学用实验手段进行有实用意义的探索,但有忽视理论的偏向。

我们不能忽视经典水动力学的作用,因为从假定完全没有阻力的所谓“理想液体”概念导出的运动规律,在很多情况下能起到指导作用,而且有些还能接近实际。

现代水力学是在经典水动力学理论的基础上,对有阻力的所谓“实际液体”进行实验,常用的实验方法有两种:一种是原型观测,即对实际工程建筑物进行观测,可获得第一手资料,但操作难度较大;另一种是模型实验,即对按一定比例将原型缩小或放大的实物或工程建筑物进行实验观测,不仅可以验证理论分析结果,而且还可预演各种设计条件的结果,是水力学中不可缺少的研究手段。通过实验,既可以对理论分析进行验证或加以纠正、补充,也可以对一些液体的复杂运动特性通过一些经验系数加以粗略描述,运用经验公式进行简化的理论分析。因此,理论分析与实验研究的结合,形成了现代水力学。一般说来,水力学的结论是建立在简化了的水流现象基础之上的,在水力学的理论公式中,常常列入一些由实验得到的系数,实际使用中其准确程度尚能使人满意。

现代水力学一般可分为水静力学和水动力学两大部分。前者研究液体在平衡状态下作用于液体上各种力之间的关系;后者研究液体处于运动状态时作用于液体上的各种力与运动要素(如水流速度、加速度等)之间的关系、液体的运动特性以及能量转换规律等;同时,研究工程实际中的有关水力计算问题,例如管流、明渠流、堰流以及地下水的水力计算等。水力学是力学的一个分支,在研究水力学问题时,需要应用物理学和理论力学中关于物体平衡及运动规律的理论,如液体处于平衡状态时,各液体质点间不存在相对运动,作用于液体上的各种力遵循力系的平衡理论;液体处于运动状态时,其动量及能量均发生变化,这些变化遵循物理学中的动量定理和动能定理等普遍原理。因此,物理学和理论力学等是学习水力学的必要基础课。

水力学广泛应用于各种工程实践中,例如水利、交通、环保、化工、冶金、机械等。在道路、桥梁、岩土与隧道工程中的各种建筑物,从工程勘测、设计、施工到维修保养都会遇到许多与水力学有关的工程问题,例如排水沟的尺寸确定、桥梁涵洞孔径的设计、沿河路基防护工程、隧道通风以及排水的设计等,都必须正确地运用水力学知识来解决,以提高和保证建筑物泄水能力,减少并尽可能防止水害事故发生,达到输水畅通、工程安全与造价合理的经济效果。这就要求工程技术人员必须通晓有关的水力学原理,善于根据工程特点因地制宜地解决有关工程问题。因而,水力学是公路与城市道路工程、桥梁与隧道工程等专业十分重要的一门技术基础课。

水力学的研究对象是以水为代表的液体。为了适应航空、气象、石油化工和暖气通风等工程的需要,将研究对象扩大到包括液体和气体(液体和气体的机械运动规律有很多相似之处)的流体机械运动规律及其应用,从而形成了另一门学科,即流体力学。流体力学具有比较严密的数学特征,并力求获得普遍的和精确的解答;但是由于数学上的困难限制了其实用范围。

## 第二节 液体的主要物理性质

液体是一种流动性物质,在一定的条件下,具有一定大小的体积,其形状随容器形状而变化,并在容器中与气体的交界处形成自由表面。在常温下,主要的液体有水、油类、酒精、水银等。

在水力学中主要的研究对象是水,但水力学的基本定律对其他与水性质相近的液体也同

样适用。当所研究的气流运动速度远远小于音速时,气体的密度变化很小,运动规律与水流相同,因而,水力学的一些定律在一定条件下还可应用于气体。

液体机械运动的规律不仅与作用于液体的外部因素和边界条件有关,更取决于液体本身所具有的物理性质。在水力学中常涉及的液体主要物理性质有密度、重度、压缩性与膨胀性、黏滞性、表面张力等。

## 一、密度和重度

液体与其他物体一样,也具有质量和重力,分别用密度和重度反映其性质。液体密度是指单位体积液体的质量,用符号 $\rho$ 表示。若均质液体的质量为 $m$ ,体积为 $V$ ,则其密度为:

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

密度的量纲为 $[M][L]^{-3}$ ,国际制单位为千克/立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

液体的重度是指单位体积液体的重力,用符号 $\gamma$ 表示。对于重力为 $G$ 、体积为 $V$ 的均质液体,其重度为:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

重度的量纲为 $[L]^{-2}[M][T]^{-2}$ ,国际制单位为牛/立方米( $\text{N}/\text{m}^3$ )或千牛/立方米( $\text{kN}/\text{m}^3$ )。

根据牛顿第二定律,可知:

$$G = mg \quad (1-3)$$

则有

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad \text{或} \quad \gamma = \rho g \quad (1-4)$$

式中: $g$ ——重力加速度,在水力学计算中一般采用 $g = 9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

纯净的水在一个标准大气压条件下,其密度和重度随温度而变化,如表 1-1 所示。不同液体的密度和重度是不相同的,在一个标准大气压下,几种常见液体的重度如表 1-2 所示。

水的密度和重度(标准大气压下)

表 1-1

温度( $^{\circ}\text{C}$ )	0 $^{\circ}$	4 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	20 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$
密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	999.87	1 000.00	999.73	998.23	995.67
重度( $\text{N}/\text{m}^3$ )	9 798.73	9 800.00	9 797.35	9 782.65	9 757.57
温度( $^{\circ}\text{C}$ )	40 $^{\circ}$	50 $^{\circ}$	60 $^{\circ}$	80 $^{\circ}$	100 $^{\circ}$
密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38
重度( $\text{N}/\text{m}^3$ )	9 723.95	9 683.09	9 635.75	9 523.94	9 392.12

几种常见流体的重度(标准大气压下)

表 1-2

流体名称	空气	水银	汽油	酒精	四氧化碳	海水
重度( $\text{N}/\text{m}^3$ )	11.82	133 280	6 664 ~ 7 350	7 778.3	15 600	9 996 ~ 10 084
测定温度( $^{\circ}\text{C}$ )	20 $^{\circ}$	0 $^{\circ}$	15 $^{\circ}$	15 $^{\circ}$	20 $^{\circ}$	15 $^{\circ}$

由表 1-1 可知,液体的密度和重度在压强变化不是很大时,主要随温度而变化。在路桥工程中的大多数水力计算问题中,一般不考虑因压强和温度所引起的体积变化,通常将密度和重

度视为常数。对于水,采用  $\rho = 1\,000\text{kg/m}^3$ ,  $\gamma = \rho g = 9\,800\text{N/m}^3 = 9.8\text{kN/m}^3$ 。

## 二、液体的压缩性和膨胀性

液体几乎不能承受拉力,但可以承受压力。液体受到压力作用,其宏观体积减小,密度增大;除去压力后,则能消除变形而恢复原有体积和密度,这种性质称为液体的压缩性。

液体的压缩性以体积压缩系数  $\beta_p$  度量。若压缩前液体的体积为  $V$ ,压强增加  $\Delta p$  以后,体积减小  $\Delta V$ ,则其体积压缩系数  $\beta_p$  为:

$$\beta_p = -\frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad (1-5)$$

式中:  $\frac{\Delta V}{V}$ ——体积的相对变化量。

$\beta_p$  越大,表明液体越易压缩。因液体的体积随着压强增大而减小, $\Delta V$  与  $\Delta p$  的符号相反,故式(1-5)右端有一负号,而保持  $\beta_p$  为正值。 $\beta_p$  的单位为平方米/牛顿( $\text{m}^2/\text{N}$ )。

体积弹性模数  $E$  是体积压缩系数的倒数,即:

$$E = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (1-6)$$

体积弹性模数  $E$  的单位为  $\text{N/m}^2$ 。水的体积弹性模数  $E$  可近似地取为  $2 \times 10^9 \text{N/m}^2$ 。 $E$  越大,表明液体越不易压缩。

不同种类的液体具有不同的  $\beta_p$  值和  $E$  值;同一种液体, $\beta_p$  值和  $E$  值随温度和压强略有变化。

水的压缩性很小,压强每增加一个大气压( $98\,000\text{N/m}^2$ ),水体积的相对压缩量( $\Delta V/V$ )只有两万分之一,因此,在  $\Delta p$  变化不大的条件下,工程上一般都可以忽略水的压缩性,认为水的密度和重度为常数;但是,在某些特殊情况下,如讨论管道中的水击问题时,由于压强变化很大,则要考虑水的压缩性。

液体体积随温度而变化的性质称为膨胀性。温度每增加  $1^\circ\text{C}$ ,体积的相对增量称为体积膨胀系数,用  $\beta_t$  表示,即:

$$\beta_t = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta t} \quad (1-7)$$

水的体积膨胀系数也随温度和压强而变化。在常温下,水的膨胀性很小,例如,温度从  $0^\circ\text{C}$  到  $30^\circ\text{C}$ ,水的体积变化仅约为  $0.4\%$ 。因此,在温度变化不大的情况下,一般不考虑水的膨胀性。但是,在温差较大的热水循环系统中,与  $4^\circ\text{C}$  的水(体积最小)相比,如果将水加热到  $80^\circ\text{C}$ ,体积增大约  $2.5\%$ ;加热到  $100^\circ\text{C}$ ,体积增大达  $4\%$ ,此时需设膨胀接头或膨胀水箱,防止管道和容器被水胀裂。

值得注意的是,当水结冰时,冰的体积要比水的体积增大约  $10\%$ ,所以在寒冷地区需要注意水管、水泵、盛水容器及公路路基等的防冻胀问题。

## 三、黏滞性

黏滞性是液体抵抗剪切变形(或相对运动)的一种性质。水具有易流动性,而静止的水没

有抵抗剪切变形的能力；但是一旦液体因流动而发生切向变形，液体质点之间就存在着相对运动，则质点之间会产生内摩擦力抵抗其相对运动。运动液体的内摩擦力主要由分子内聚力和分子间的动量交换产生，液体分子间的内聚力随着温度升高而减小，分子的动量交换则随着温度升高而增大。但是，液体分子的动量交换对液体黏滞性的影响不大，所以液体的温度升高时，黏滞性减小。

早在 1686 年，牛顿就提出了有关黏滞性的牛顿内摩擦定律，现用牛顿平板实验说明液体的黏滞性。

当液体沿着一个平面固壁做平行的直线运动时(图 1-1)，设液体质点是有规则地一层一层向前运动而不相互混掺，由于液体具有黏滞性，最底层的液体分子因黏滞性的作用而黏在固定边界上不动，其他各层的质点距离固定边界越远，受固壁约束作用越小，流速越大，所以各液层的流速不相等。设距固定边界为  $y$  处的流速为  $u$ ，在相邻的  $y + dy$  处的流速为  $u + du$  [图 1-1a)]，由于两相邻液层的流速不同，在两液层之间将成对地出现切向阻力 [图 1-1b)]，下面一层液体对上面一层液体作用了一个与流速方向相反的内摩擦力，具有使上面一层液体运动减缓的趋势；而上面一层液体对下面一层液体则作用了一个与流速方向一致的内摩擦力，具有使下面一层液体运动加速的趋势。这两个内摩擦力大小相等、方向相反。阻碍两相邻液层相对运动的切向阻力称为黏滞力或内摩擦力。

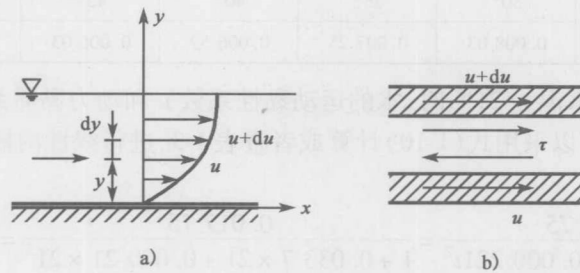


图 1-1 黏滞性实验示意

实验表明，当液体做平行直线运动时，相邻液层接触面上的内摩擦力  $T$  的大小与液体的种类有关，与接触面积呈正比，与液层间的速度梯度呈正比。用数学公式可表示为：

$$T = \mu \frac{du}{dy} A \quad \text{或} \quad \tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

式中： $T$ ——内摩擦力(或黏滞力)；

$\tau$ ——单位面积上的内摩擦力，称为内摩擦切应力；

$A$ ——相邻液层的接触面积；

$\frac{du}{dy}$ ——相邻两液层之间的液体流动速度差与距离的比值，称为流速梯度；

$\mu$ ——动力黏滞系数，其值随液体的种类、温度及压强的不同而变化。

液体的黏滞性用动力黏滞系数  $\mu$  来度量，黏滞性大的液体  $\mu$  值大，黏滞性小的液体  $\mu$  值小。 $\mu$  的国际制单位为牛顿·秒/平方米( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ )或帕斯卡·秒( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )。

在水力学中，液体的黏滞性  $\mu$  经常和密度  $\rho$  同时出现。为了能够综合反映液体的黏滞性和惯性性质，引入运动黏滞系数  $\nu$ 。运动黏滞系数是动力黏滞系数  $\mu$  和液体密度  $\rho$  的比值，即：



$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

因为 $\nu$ 不包含力的量纲,而仅具有运动量的量纲 $[L]^2[T]$ ,故称 $\nu$ 为运动黏滞系数,其国际制单位为平方米/秒( $m^2/s$ )。

对于同一种液体, $\mu$ 和 $\nu$ 通常是压力和温度的函数,但主要是对温度的变化较为敏感,而压力的影响很小。

水的运动黏滞系数一般按下列经验公式计算:

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-10)$$

式中: $t$ ——水的温度, $^{\circ}C$ 。

$\nu$ 的单位为 $cm^2/s$ ,工程应用中可以直接查表1-3。

不同水温时的 $\nu$ 值

表1-3

温度( $^{\circ}C$ )	0 $^{\circ}$	2 $^{\circ}$	4 $^{\circ}$	6 $^{\circ}$	8 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	12 $^{\circ}$
$\nu(cm^2/s)$	0.01775	0.01674	0.01568	0.01473	0.01387	0.01310	0.01239
温度( $^{\circ}C$ )	14 $^{\circ}$	16 $^{\circ}$	18 $^{\circ}$	20 $^{\circ}$	22 $^{\circ}$	24 $^{\circ}$	26 $^{\circ}$
$\nu(cm^2/s)$	0.01176	0.01108	0.01062	0.01010	0.00989	0.00919	0.00877
温度( $^{\circ}C$ )	28 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	35 $^{\circ}$	40 $^{\circ}$	45 $^{\circ}$	50 $^{\circ}$	60 $^{\circ}$
$\nu(cm^2/s)$	0.00839	0.00803	0.00725	0.00659	0.00603	0.00556	0.00478

**[例1-1]** 试求:水温为 $21^{\circ}C$ 时,水的运动黏性系数 $\nu$ 和动力黏滞系数 $\mu$ 。

**解:**求解 $\nu$ 和 $\mu$ ,可以采用式(1-10)计算或者查表1-3,进行线性内插求得水温为 $21^{\circ}C$ 时的 $\nu$ 和 $\mu$ :

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} = \frac{0.01775}{1 + 0.0337 \times 21 + 0.000221 \times 21^2} = 0.00986 (cm^2/s)$$

因水的密度 $\rho = 1000 kg/m^3 = 1000 N \cdot s^2/m^4$ ,则:

$$\mu = \rho\nu = 1000 \times 0.00986 \times 10^{-4} = 9.86 \times 10^{-4} (N \cdot s/m^2)$$

查表1-3, $t = 20^{\circ}C$ 时, $\nu = 0.01010 cm^2/s$ ;  $t = 22^{\circ}C$ 时, $\nu = 0.00989 cm^2/s$ 。由线性内插得: $t = 21^{\circ}C$ 时, $\nu = 0.009999 cm^2/s$ ,相应的 $\mu = 1000 \times 0.009999 \times 10^{-4} = 9.999 \times 10^{-4} (N \cdot s/m^2)$ 。

牛顿内摩擦定律有其适用范围,大多数常见流体(如水、空气等)的内摩擦力符合牛顿内摩擦定律,这类流体称为牛顿流体;某些特殊流体(如油漆、泥浆等)不服从牛顿内摩擦定律,称为非牛顿流体。本书只讨论牛顿流体。

#### 四、表面张力和毛细现象

液体的自由表面具有微弱的抗拉能力,称为表面张力。表面张力能够使水滴悬在水龙头口上,水面稍高出碗口而不外溢、钢针浮在液面上而不下沉,所有这些现象都是液体在和另一种不相混合的液体或气体的分界面上分子间内聚力作用的结果。表面张力的大小可用表面张力系数 $\sigma$ 来度量。 $\sigma$ 是指自由表面单位长度上所受的拉力,国际制单位为牛顿/米( $N/m$ )。 $\sigma$ 的值随液体种类和温度而变化,且随温度的升高而变小,对 $20^{\circ}C$ 的水, $\sigma = 0.074 N/m$ ,对水银, $\sigma = 0.54 N/m$ 。