



21世纪交通版高等学校教材

水力学与桥涵水文

Hydraulics and Hydrology for Bridge Engineering

(第二版)

叶镇国 彭文波 编 著



人民交通出版社
China Communications Press

21 世纪交通版高等学校教材

Hydraulics and Hydrology for Bridge Engineering

水力学与桥涵水文

(第二版)

叶镇国 彭文波 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是21世纪交通版高等学校教材。全书共15章,内容包括:绪论,水静力学基础,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衔接与消能,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,桥梁墩台冲刷计算,小桥涵勘测设计、相似原理及量纲分析等。

本书可作为高等学校非水利类土木工程专业(道路、桥梁与岩土工程专业方向)、道路桥梁与渡河工程专业教学用书,亦可作为有关专业技术人员的参考用书。

本书另附课件,供读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学与桥涵水文 / 叶镇国, 彭文波编著. —2版

. —北京: 人民交通出版社, 2011.7

ISBN 978-7-114-09173-5

I. ①水… II. ①叶…②彭… 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(2011)第103720号

21世纪交通版高等学校教材

书 名: 水力学与桥涵水文(第二版)

著 作 者: 叶镇国 彭文波

责任编辑: 曲 乐 王文华 韩亚楠

出版发行: 人民交通出版社

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) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 25.75

字 数: 636千

版 次: 1998年7月第1版 2011年7月第2版

印 次: 2011年7月第1次印刷 总第23次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09173-5

定 价: 46.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



21 世纪交通版

高等学校教材(公路与交通工程)编审委员会

顾问:王秉纲 (长安大学)

主任委员:沙爱民 (长安大学)

副主任委员:(按姓氏笔画排序)

王 炜 (东南大学)

陈艾荣 (同济大学)

徐 岳 (长安大学)

梁乃兴 (重庆交通大学)

韩 敏 (人民交通出版社)

委员:(按姓氏笔画排序)

马松林 (哈尔滨工业大学)

王殿海 (吉林大学)

叶见曙 (东南大学)

石 京 (清华大学)

向中富 (重庆交通大学)

关宏志 (北京工业大学)

何东坡 (东北林业大学)

陈 红 (长安大学)

邵旭东 (湖南大学)

陈宝春 (福州大学)

杨晓光 (同济大学)

吴瑞麟 (华中科技大学)

陈静云 (大连理工大学)

赵明华 (湖南大学)

项贻强 (浙江大学)

郭忠印 (同济大学)

袁剑波 (长沙理工大学)

黄晓明 (东南大学)

符铤砂 (华南理工大学)

裴玉龙 (哈尔滨工业大学)

颜东煌 (长沙理工大学)

秘 书 长:沈鸿雁 (人民交通出版社)

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,全球经济一体化趋势进一步加强,科技对于经济增长的作用日益显著,教育在国家经济与社会发展中所处的地位日益重要。进入新世纪,面对国际国内经济与社会发展所出现的新特点,我国的高等教育迎来了良好的发展机遇,同时也面临着巨大的挑战,高等教育的发展处在一个前所未有的重要时期。其一,加入 WTO,中国经济已融入到世界经济的发展进程之中,国家间的竞争更趋激烈,竞争的焦点已更多地体现在高素质人才的竞争上,因此,高等教育所面临的是全球化条件下的综合竞争。其二,我国正处在由计划经济向社会主义市场经济过渡的重要历史时期,这一时期,我国经济结构调整将进一步深化,对外开放将进一步扩大,改革与实践必将提出许多过去不曾遇到的新问题,高等教育面临加速改革以适应国民经济进一步发展的需要。面对这样的形势与要求,党中央国务院提出扩大高等教育规模,着力提高高等教育的水平与质量。这是为中华民族自立于世界民族之林而采取的极其重大的战略步骤,同时,也是为国家未来的发展提供基础性的保证。

为适应高等教育改革与发展的需要,早在 1998 年 7 月,教育部就对高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订。在新的专业目录中,土木工程专业扩大了涵盖面,原先的公路与城市道路工程,桥梁工程,隧道与地下工程等专业均纳入土木工程专业。本科专业目录的调整是为满足培养“宽口径”复合型人才的要求,对原有相关专业本科教学产生了积极的影响。这一调整是着眼于培养 21 世纪社会主义现代化建设人才的需要而进行的,面对新的变化,要求我们对人才的培养规格、培养模式、课程体系和内容都应作出适时调整,以适应要求。

根据形势的变化与高等教育所提出的新的要求,同时,也考虑到近些年来公路交通大发展所引发的需求,人民交通出版社通过对“八五”、“九五”期间的路桥及交通工程专业高校教材体系的分析,提出了组织编写一套 21 世纪的具有鲜明交通特色的高等学校教材的设想。这一设想,得到了原路桥教学指导委员会几乎所有成员学校的广泛响应与支持。2000 年 6 月,由人民交通出版社发起组织全国面向交通办学的 12 所高校的专家学者组成 21 世纪交通版高等学校教材(公路类)编审委员会,并召开第一次会议,会议决定着手组织编写土木工程专业具有交通特色的道路专业方向、桥梁专业方向以及交通工程专业教材。会议经过充分研讨,确定了包括基本知识技能培养层次、知识技能拓宽与提高层次以及教学辅助层次在内的约 130 种教材,范围涵盖本科与研究生用教材。会后,人民交通出版社开始了细致的教材编写组织工作,经过自由申报及专家推荐的方式,近 20 所高校的百余名教授承担约 130 种教材的主编工作。2001 年 6 月,教材编委会召开第二次会议,全面审定了各门教材主编院校提交的教学大纲,之后,编写工作全面展开。

21 世纪交通版高等学校教材编写工作是在本科专业目录调整及交通大发展的背景下展开的。教材编写的基本思路是:(1)顺应高等教育改革的形势,专业基础课教学内容实现与土木工程专业打通,同时保留原专业的主干课程,既顺应向土木工程专业过渡的需要,又保持服务公路交通的特色,适应宽口径复合型人才培养的需要。(2)注重学生基本素质、基本能力的

培养,为学生知识、能力、素质的综合协调发展创造条件。基于这样的考虑,将教材区分为二个主层次与一个辅助层次,即基本知识技能培养层次与知识技能拓宽与提高层次,辅助层次为教学参考用书。工作的着力点放在基本知识技能培养层次教材的编写上。(3)目前,中国的经济发展存在地区间的不平衡,各高校之间的发展也不平衡,因此,教材的编写要充分考虑各校人才培养规格及教学需求多样性的要求,尽可能为各校教学的开展提供一个多层次、系统而全面的教材供给平台。(4)教材的编写在总结“八五”、“九五”工作经验的基础上,注意体现原创性内容,把握好技术与教学需要的关系,努力体现教育面向现代化、面向世界、面向未来的要求,着力提高学生的创新思维能力,使所编教材达到先进性与实用性兼备。(5)配合现代化教学手段的发展,积极配套相应的教学辅件,便利教学。

教材建设是教学改革的重要环节之一,全面做好教材建设工作,是提高教学质量的重要保证。本套教材是由人民交通出版社组织,由原全国高等学校路桥与交通工程教学指导委员会成员学校相互协作编写的一套具有交通出版社品牌的教材,教材力求反映交通科技发展的先进水平,力求符合高等教育的基本规律。各门教材的主编均通过自由申报与专家推荐相结合的方式确定,他们都是各校相关学科的骨干,在长期的教学与科研实践中积累了丰富的经验。由他们担纲主编,能够充分体现教材的先进性与实用性。本套教材预计在二年内完全出齐,随后,将根据情况的变化而适时更新。相信这批教材的出版,对于土木工程框架下道路工程、桥梁工程专业方向与交通工程专业教材的建设将起到有力的促进作用,同时,也使各校在教材选用方面具有更大的空间。需要指出的是,该批教材中研究生教材占有较大比例,研究生教材多具有较高的理论水平,因此,该套教材不仅对在校学生,同时对于在职学习人员及工程技术人员也具有很好的参考价值。

21 世纪初叶,是我国社会经济发展的重要时期,同时也是我国公路交通从紧张和制约状况实现全面改善的关键时期,公路基础设施的建设仍是今后一项重要而艰巨的任务,希望通过各相关院校及所有参编人员的共同努力,尽快使全套 21 世纪交通版高等学校教材(公路类)尽早面世,为我国交通事业的发展做出贡献。

21 世纪交通版
高等学校教材(公路类)编审委员会
人民交通出版社
2001 年 12 月

第二版前言

本书第一版是全国路桥专业教学改革的一项创新成果。教材名称由原全国路桥专业指导委员会定为《水力学与桥涵水文》，编写大纲经原全国路桥专业指导委员会讨论通过，并经原交通部教材会议确定为全国高等学校路桥专业通用教材。本书第一版1998年发行至今，应用景况良好，借再版之际特向兄弟院校及应用各界致谢！

“水力学”与“桥涵水文”课最早长期分设为两门课，分用两本体系独立、风格各异且内容搭接过多的教材，教学矛盾不少。20世纪70年代末期，为贯彻落实教育部关于“压缩课程门数与周学时”的决定，湖南大学率先将两门课合二为一，编著者亦为此编写了合二为一的过渡性教材《桥涵水力水文基础》（讲义），并在一些兄弟院校中应用交流数届，奠定了本书的基本编写思路与内容编排框架。20世纪80年代，我国教育改革迎来了科学的春天，本书第一版亦应运而生。这两门课的变革成果，至今仍有实际意义。

《水力学与桥涵水文》（第二版）是水力学与桥涵水文两大内容的进一步优化组合，不仅加强了两者之间的有机联系，而且加强了教材的理论性和专业应用的针对性。水力学作为基本理论贯穿全书，水文学为本书的第二基本理论并为水力计算数据之源，水力水文计算则为小桥涵勘测设计的理论依据，三者关系紧密，节约了以往过多的课程搭接学时，突出了专业技术基础课应有的理论性特色。第二版教材对于传统水力学与水文学的教材内容还作了不少更新，并编入了编著者多年教材编写探索与教学实践的研究成果。

明渠非均匀流部分为水力学教学一大难点，本书“从微波波速及其传播特性”入手，阐明明渠急流、缓流与临界流概念，建立了本书理论阐述的新体系，内容简明形象，深入浅出，多年教学效果良好。水文学传统教材多以单纯文字阐述、罗列公式用法为主，缺少逻辑演绎方式。本书对此亦有所更新。例如采用“简法”推证经验累积频率公式，同时还采用了图文并用、数学演绎的方法建立了一些计算公式。关于小流域面积暴雨洪峰流量计算，传统水文学中只介绍图解法，但制图原理从略，本书提出的数解法，理论关系严密，逻辑概念清楚，还可以破解制图原理，使有关计算与现代先进计算手段接轨，这在目前水文计算中，尚属首创。再者，本书所载关于“无压圆管水流水力最佳充满度 $\left(\frac{h}{d}\right)_Q = 0.938\ 2$ ”相对传统水力学教材

$\left(\frac{h}{d}\right)_Q = 0.95$ 则是编著者新发现的精确解。

此外,为了有助于学生减负增效,编著者还更新了《习题集》的编写方式,编写出版了教学系列配套用书《实用桥涵水力水文计算原理与解法指南》(人民交通出版社,2001.2),此书只介绍解题的分析思路与理论应用方法,解题过程及答案留给学生完成,可引导学生参与教学互动,调动学生钻研理论的积极性,以较少的课外学时弄懂更多的理论知识。

本书对第一版教材作了删减、充实和调整,引用了最新规范及水文科技最新成果,较广泛收集了各兄弟院校宝贵的教学实践经验,提升了本书的理论性与专业应用针对性,也深化了教材的教学法变革内涵。

本书由叶镇国教授与彭文波老师编著,其中叶镇国编著第一、二、三、四、五、六、七、八及十五章,负责全书统稿及审校,并提供了本书一~七章课件;彭文波编著第九、十、十一、十二、十三、十四章,提供了九~十四章课件。

编著者从20世纪50年代起便开始了教学实践与教材编写探索,20世纪80年代后,曾先后编写出版了全国教材及专著十本,深知教材编写艺术博大精深,总结既往历程,只为抛砖引玉,限于水平,欢迎批评指正。

编著者

2011.2.28 于长沙岳麓山

第一版前言

《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,同时还考虑了拓宽专业知识面的需要。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
第一节 水力学与桥涵水文的性质与任务	1
第二节 水力学的研究方法	1
第三节 液体的主要物理性质	2
第四节 作用在液体上的力	9
习题	10
第二章 水静力学基础	12
第一节 静水压强及其特性	12
第二节 静水压强分布规律	14
第三节 重力作用下水静力学基本方程	16
第四节 点压强测量	22
第五节 作用在平面壁上的静水总压力	24
第六节 作用在曲面壁上的静水总压力	29
习题	36
第三章 水动力学基础	40
第一节 描述液体运动的两种方法	40
第二节 欧拉法的基本概念	42
第三节 恒定流连续性方程	50
第四节 恒定流元流能量方程(元流伯诺里方程)	52
第五节 恒定流实际液体总流能量方程(总流伯诺里方程)	56
第六节 恒定流总流动量方程	62
习题	67
第四章 水流阻力与水头损失	71
第一节 水流阻力与水头损失的类型	71
第二节 液体运动的两种流动型态——层流与紊流	72
第三节 沿程水头损失计算	76
第四节 圆管层流沿程阻力系数	79
第五节 圆管紊流沿程阻力系数	81
第六节 局部水头损失计算	91
*第七节 边界层分离现象与绕流阻力	94
习题	99
第五章 有压管流与孔口、管嘴出流	101
第一节 有压管路水力计算	101

* 第二节	孔口出流	111
* 第三节	管嘴出流	113
	习题	114
第六章	明渠水流	118
第一节	明渠几何特征与容许流速	118
第二节	明渠均匀流特性	121
第三节	明渠均匀流基本公式	122
第四节	明渠均匀流水力计算基本问题	126
第五节	明渠非均匀流	132
第六节	急流、缓流及临界流的判别标准	135
第七节	明渠三种水流状态的水力特性	138
第八节	明渠急变流	142
第九节	明渠恒定渐变流基本微分方程	151
第十节	棱柱形渠道恒定渐变流水面曲线定性分析	153
第十一节	明渠恒定渐变流水面曲线计算(分段求和法)	158
	习题	162
第七章	堰流、闸孔出流及泄水建筑物下游的衔接与消能	164
第一节	堰的类型及流量公式	164
第二节	堰的流量系数、侧收缩系数及淹没系数	167
第三节	宽顶堰水力计算	171
* 第四节	闸孔出流	176
第五节	泄水建筑物下游的衔接与消能	179
	习题	191
* 第八章	渗流	193
第一节	渗流达西定律	193
第二节	无压恒定渐变渗流	197
第三节	集水廊道及井的渗流计算	202
	习题	209
第九章	河流概论	211
第一节	河川水文现象的特点与桥涵水文的研究方法	211
第二节	河流及流域	212
第三节	河川径流	218
第四节	河川水文资料的收集与整理方法	221
第五节	河流的泥沙运动	226
第六节	河床演变	229
	习题	231
第十章	水文统计的基本原理与方法	233
第一节	水文统计的基本概念	233
第二节	经验累积频率曲线	238
第三节	理论累积频率曲线	243

第四节	现行频率分析方法	252
第五节	相关分析	260
习题		268
第十一章	桥涵设计流量及水位推算	270
第一节	按实测流量资料推算	270
第二节	按洪水调查资料推算	270
第三节	按暴雨资料推算	274
第四节	桥位断面设计流量和设计水位推算	286
习题		286
第十二章	大中桥位勘测设计	288
第一节	桥涵分类及一般规定	288
第二节	桥位选择	289
第三节	桥位勘测	292
第四节	大中桥孔径计算	293
第五节	桥面高程计算	299
第六节	调治构造物	306
习题		312
第十三章	桥梁墩台冲刷计算	313
第一节	墩台冲刷类型	313
第二节	桥下断面一般冲刷深度	314
第三节	墩台局部冲刷深度	320
第四节	桥下河槽最低冲刷线	322
习题		327
第十四章	小桥涵勘测设计	329
第一节	小桥涵勘测设计内容	329
第二节	小桥涵位置选择	329
第三节	小桥涵勘测与调查	332
第四节	小桥涵类型选择与布置	335
第五节	小桥孔径计算	338
第六节	涵洞孔径计算	345
第七节	小桥及涵洞构造	350
第八节	涵洞进出口沟床的加固与防护	353
习题		357
*第十五章	相似原理及量纲分析方法	359
第一节	相似概念	359
第二节	相似准则	360
第三节	模型设计	365
第四节	量纲分析方法	366
习题		371
附录		373
参考文献		397

第一章 绪 论

第一节 水力学与桥涵水文的性质与任务

“水力学与桥涵水文”课程是非水利类土木工程专业(道路、桥梁等)的一门技术基础课,应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。

道路与桥梁工程是交通基础建设工程,它关系到我国城乡发展的大局,与人民生活息息相关。2010年,我国已顺利完成了“十一五”交通发展规划,成就辉煌,“十二五”交通运输规划时期,又将是我国发展现代交通运输业的重要时期,在今后的土木工程建设中合理进行水力水文计算将更具有重要意义。

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。它在交通土建、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括理论分析、实验验证补充以及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。水文现象(河流的流量、水位、降雨量等的统称)发生的数值大小及其发生的时间,会受到众多因素的影响,因而都具有一定的随机性。因此,它主要依靠实地调查勘测的河川水文资料,应用数理统计分析方法,从中选择设计值,通过水力计算解决工程有关问题,并以此预估桥涵工程可能遭遇的未来水文情势。

第二节 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 3.3×10^{22} 个液体分子,相邻分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 。这对一般工程问题的空间尺寸来说,所要解决的工程问题只是液体大量分子运动的宏观特性,这一间距完全可以忽略不计。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。所谓液体中的一“点”,实际上是指微观上充分大,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,其中以液体质点作对象,按照隔离体受力情况建立液体运动的质量守恒、能量守恒、动量定

律(简称液流三大方程)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。常用的实验方法有以下两种。

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手资料,但规律性观测操作难度较大。

2. 模型实验

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。

第三节 液体的主要物理性质

液体受力而做机械运动,其状况取决于自身的物理性质,它是分析计算液体运动规律的因素。从宏观角度研究的液体主要物理性质如下。

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 ρ 表示。按定义有

均质液体

非均质液体

一般

$\rho = \frac{m}{V}$

$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$

$\rho = \rho(x, y, z, t)$

(1-1)

式中: V ——液体体积;

t ——时间。

式(1-1)表明,按连续介质假说,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。一般情况下,压强和温度对 ρ 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 $\rho = \text{常数}(\text{const})$ 。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 $\rho = 1\text{g/cm}^3 = 1\,000\text{kg/m}^3$ 。

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, $\rho = 1\,000\text{kg/m}^3$; $t = 0 \sim 30^\circ\text{C}$ 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

$$\frac{V_{\text{冰}}}{V_{\text{水}}} = \frac{\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{冰}}} = \frac{999.87}{916.7} = 1.090\,7$$

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。

不同温度下纯水的物理特性

表 1-1

t ($^\circ\text{C}$)	γ (kN/m^3)	ρ (kg/m^3)	$\mu \times 10^3$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	$\nu \times 10^6$ (m^2/s)	p_s (kPa)	σ (N/m)	$E \times 10^{-6}$ (kPa)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	0.61	0.075 6	2.02
4	9.800	1000.0	1.567	1.567	—	—	—
10	9.804	999.7	1.307	1.306	1.23	0.074 2	2.1
15	9.798	999.1	1.139	1.139	1.70	0.073 5	2.15
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.34	0.072 8	2.18
25	9.777	997.0	0.890	0.893	3.17	0.072 0	2.22
30	9.746	995.7	0.798	0.800	4.24	0.071 2	2.25
40	9.730	992.2	0.653	0.658	7.38	0.069 6	2.28
50	9.689	988.0	0.547	0.553	12.33	0.067 9	2.29
60	9.642	983.2	0.466	0.474	19.92	0.066 2	2.28
70	9.589	977.8	0.404	0.413	31.16	0.064 4	2.25
80	9.530	971.8	0.354	0.364	47.34	0.062 6	2.20
90	9.466	965.3	0.315	0.326	70.10	0.060 8	2.14
100	9.399	958.4	0.282	0.294	101.33	0.058 9	2.07

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 -表面张力系数; E -体积弹性模量。

二、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;单位体积的液体重力,称为重度,常用符号 γ 表示。按定义有

均质液体
$$\gamma = \frac{G}{V} \tag{1-2a}$$

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

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

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \tag{1-3}$$

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

关于物理量单位，早年我国有国际单位制与工程单位制两类。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，质量单位为千克力·秒²/米(kgf·s²/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 N/m³，按工程单位制，重度单位为 kgf/m³ 或 tf/m³。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，都把水看成均质体，水力计算中常取水的重度 $\gamma = 9\,800\text{N/m}^3 = 9.8\text{kN/m}^3$ ，水银的重度 $\gamma_p = 133.28\text{kN/m}^3$ 。按工程单位制，水的重度为 $\gamma = 1\,000\text{kgf/m}^3 = 1\text{tf/m}^3$ 。在一个标准大气压下，不同温度时纯水的物理特性见表 1-1，几种常见流体的重度见表 1-2。1982 年 2 月 10 日起我国决定采用国际单位制，一切论著都必须使用国际单位制。但在早年的文献及非正规场合仍可见工程单位制。国际单位制与工程单位制的换算关系见表 1-3。

几种常见流体的重度 表 1-2

名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
$t(^{\circ}\text{C})$	20	0	15	15	20	15
$\gamma(\text{kN/m}^3)$	0.0118 2	133.28	6.664 ~ 7.350	7.778 3	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(kg)	公斤力·秒 ² /米(kgf·s ² /m)	1kgf·s ² /m = 9.8kg 1kg = 0.102kgf·s ² /m
密度	千克每立方米(kg/m ³)	公斤力·秒 ² /米 ⁴ (kgf·s ² /m ⁴)	1kgf·s ² /m ⁴ = 9.8kg/m ³ 1kg/m ³ = 0.102kgf·s ² /m ⁴
动量	千克米每秒(kg·m/s)	公斤力·秒(kgf·s)	1kgf·s = 9.8kg·m/s
力	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) = 1 000Pa 牛[顿]每平方米(N/m ²) 1Pa = 1N/m ²	公斤力/米 ² (kgf/m ²) 公斤力/厘米 ² (kgf/cm ²)	1kgf/cm ² = 9.8kPa 1kgf/cm ² = 9.8N/cm ²
功,能	焦[耳](J) 牛[顿]米(N·m) 1J = 1N·m	千瓦小时(kW·h)	1kW·h = 3 600kJ 1kW·h = 3 600kN·m

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) = 1 000W 1 焦[耳] 每秒 (J/s) = 1 W	公斤力·米/秒 (kgf·m/s) 马力 (Hp)	$1 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} = 9.8 \text{ W}$ $1 \text{ kW} = 102 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$ $1 \text{ Hp} = 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$
动力黏度	1 帕[斯卡]秒 (Pa·s) $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$	泊 (P) 公斤力·秒/米 ² (kgf·s/m ²)	$1 \text{ P} = 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ $1 \text{ kgf} \cdot \text{s/m}^2 = 9.806 65 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
运动黏度	平方米每秒 (m ² /s)	斯托克斯, 斯 (St) 平方厘米每秒 (cm ² /s) $1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$	$1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

注:1982 年 2 月 10 日起我国已实施国际单位制。工程单位制仅在非正规场合仍有习惯性出现。

三、易流动性与黏滞性

静止时,液体不能承受切力及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。但液体与气体的黏滞性不同,当温度增高时,液体分子间距增大,内聚力减小,动量交换对液体的黏滞性作用不大,因此液体的黏滞性随温度升高而减小;而气体当温度升高时,动量加剧,黏滞性将随温度升高而增大。通常压强对黏滞性的影响不大,可以忽略不计。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,发现了流体的黏滞性,并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 ,其中充满了液体,上板可做平行滑动,下板固定不动。上板受力 F 作用后可做水平方向滑动,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 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 1-1c)所示:有

$$\left. \begin{aligned} u(y) &= \frac{U}{h}y \\ \frac{du}{dy} &= \frac{U}{h} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

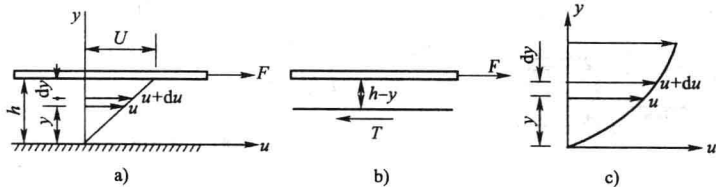


图 1-1