



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水力学

第4版
下册

水力学与山区河流开发保护国家重点实验室(四川大学) 编

吴持恭 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

TV13/11=2

:2

2008



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水 力 学

第 4 版

下 册

水力学与山区河流开发保护国家重点实验室(四川大学) 编

吴持恭 主编

高等教育出版社

Higher Education Press

图书在版编目(CIP)数据

水力学.下册/吴持恭主编;水力学与山区河流开发
保护国家重点实验室(四川大学)编.—4版.—北京:
高等教育出版社,2008.1

ISBN 978-7-04-022677-5

I. 水… II. ①吴…②水… III. 水力学-高等学
校-教材 IV. TV13

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第196134号

策划编辑 杨倩 责任编辑 葛心 封面设计 张楠 责任绘图 黄建英
版式设计 王艳红 责任校对 姜国萍 责任印制 陈伟光

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
		版 次	1979年3月第1版
开 本	787×960 1/16		2008年1月第4版
印 张	23.75	印 次	2008年1月第1次印刷
字 数	440 000	定 价	29.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 22677-00

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书论述水力学的主要理论及其应用,在第3版“十五”国家级规划教材的基础上,保持了原书“循序渐进、加强基础、理论联系实际、利于教学”的特点。全书在整体安排上采用由浅入深的方式,在水静力学之后,从液体运动的流束理论出发,渐进式地介绍水动力学内容,经过流态、管流、明渠流、水跃、堰闸出流、水流衔接与消能后,再进一步介绍管道和明渠中的非恒定流,然后上升到流场理论、边界层理论和势流理论,最后以几个专题作为全书的结束。修订内容主要包括:根据水力学的学科发展,将国际上水力学研究的新进展,尤其是一些新方法、新技术及新理论引入水力学教学与实践,同时对相应内容进行增删,特别是删除一些陈旧的内容。

全书分为上、下两册,共分18章。内容主要包括绪论、水静力学、水动力学基础、液流型态和水头损失、有压管道恒定流、有压管中的非恒定流、明渠恒定均匀流、明渠恒定非均匀流、堰流及闸孔出流、泄水建筑物下游水流的衔接和消能、液体运动的流场理论、恒定平面势流、渗流、量纲分析和相似原理等。

本书可作为高等学校水利类、土建类等专业的教材,也可供独立学院、高职高专和成人高校师生及有关工程技术人员参考。

本书配有电子教案。

第 4 版 序

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,在第 3 版的基础上对全书再次进行修订,以使本书更好地适应 21 世纪水力学的学科发展与创新性人才的培养。

本次修订在广泛汲取教材使用单位和有关专家意见的基础上,本着保持特色、自主创新、与时俱进的原则,主要在以下几个方面进行了修订:

一、增加水力学发展简史的内容,以便更好地了解水力学研究与应用的发展历程。

二、基于当前高坝工程建设形势及高坝水力学进展,增加了“水流衔接与消能的若干新技术”内容。

三、鉴于工程泥沙问题日益突出,增加工程防沙措施的相关内容。

四、基于计算机技术的快速发展,删除原书中现已基本弃用的内容,如图解法内容,同时增加了计算机数值模拟的相关内容。

五、再次对全书进行全面的校核和修正。

本次修订工作是在许唯临教授主持下完成的。参加修订的有许唯临、刘兴年、李克锋、刘善均、王黎、王协康、王玉蓉、张建民、张新华、李冰冻、陈明千、易文敏等。许多兄弟院校的同志根据丰富的长期教学经验,对修订工作提出了宝贵意见和建议。清华大学李玉柱教授认真、详细地审阅了本书,提出了许多宝贵的修改意见,在此一并表示衷心感谢!

对于书中的缺点和不足之处,敬请批评指正,以便今后不断完善。

编 者

2007 年 5 月

第 3 版 序

根据 2002 年全国“水力学及流体力学课程教学指导小组扩大会议”的精神,在第 2 版的基础上,对全书再次进行修订,以使本教材能够更好地适应当前水力学的发展和教学需要。

本次修订吸收了教学指导小组扩大会议上教材使用单位和有关专家的意见,并在会后以通信方式进一步征询了有关院校教师的意见。在此基础上,确定了保持特色、完善提高的原则,主要从以下几个方面进行了修订:

一、删除原书中现已弃用的内容,如“水力指数法”。同时,对原书中个别不适应水力学最新认识的描述加以适当修改,如对紊流时均运动微分方程组求解问题的描述。

二、在部分水力计算的图解法后,简要地增加相应的迭代法内容。

三、适当增加习题数量,以更好地反映各章主要教学内容。同时,增加思考题,以作为例题和习题的有效补充。

四、再次对全书进行全面校核和修正。

本次修订工作是在主编吴持恭教授总体安排下完成的。参加修订的有:许唯临、李克锋、王黎、王玉蓉、杨凌真、周茂林等同志。许多兄弟院校的同志根据其长期、丰富的教学经验,对修订工作提出了宝贵的意见和建议,在此深表谢意!

限于水平,书中缺点和错误在所难免,敬请批评指正。

编 者

2003 年 1 月

AFR 97/53

第 2 版 序

1979年3月第1版的《水力学》是根据全国15所院校代表讨论制定的编写大纲编写的,当时要求编成既是教科书又是参考书。这次是根据1980年5月审定的《水力学教学大纲》(草案)对原书进行了一次较大的修订,以便更好地符合教学要求。在修订时力求贯彻教育部工科基础课程教材编委会工作会议关于大力提高教材质量的精神,以及“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的原则。

修订本除保持原书力求贯彻循序渐进、加强基础、理论联系实际、利于教学等原则外,我们主要作了以下一些修订:

一、原书属于基本理论的内容原则上不减。对一些非基本的以及属于专业课范围的内容,而大纲中又没有要求的,如无压圆管的共轭水深计算、顺坡明渠中水跃、实用堰中的渥奇及克-奥剖面、隧洞水力计算、连接建筑物的水力计算、明渠恒定变量流、用直线比例法计算闸坝底板上的渗透压力等作了删减。

对大纲中有要求,原书未编入的内容,如液体的相对平衡、有能量输入输出的能量方程、窄深堰流水力计算、紊动扩散等作了补充。

二、原书体系基本上没有变动,但为了便于取舍,将液体运动的解析理论—三元分析法这章分为液体运动的流场理论、边界层理论基础、恒定平面势流等三章。

三、教科书字数有一定控制,凡属不同计算方法,只保留一种常用典型方法,其他方法删减或改为简介。例如关于天然河道水面曲线图解法,保留艾斯考夫图解法,删去控制曲线法;关于明渠恒定渐变流水面曲线的计算方法,保留逐段试算法,水力指数法改为简介。某些段落的文字叙述也作了修改,避免不必要重复。为了减少篇幅,原书附录全部删去。

四、对例题、习题和图表进行了校核和修正。名词、符号全书力求做到统一。

本修订版由吴持恭、赵文谦、汝树勋分工执笔,由吴持恭主编。修订稿由华东水利学院张长高教授、清华大学余常昭教授主审。审稿会由教育部水力学教材编审小组主持,除有关编委及主审人外,参加的还有清华大学、武汉水利电力学院、陕西机械学院、郑州工学院、广西大学等院校代表。与会同志提出了许多

II 第2版序

宝贵意见和建议,谨此表示感谢。

因限于水平,书中缺点和错误在所难免,恳切希望同志们指正。

编 者
1982年7月10日

第 1 版 序

本书是根据一九七八年一月教育部委托我校召开的高等学校工科基础课水力学教材编写会议讨论的编写大纲编写的,可作为高等学校工科水工建筑专业、农田水利专业等水力学课程的试用教材,也可作为其他有关专业的教学参考书。

本书分上、下两册出版。上册包括绪论,水静力学,液体运动的一元分析法,层流、紊流及其水头损失,有压管中恒定流,明渠恒定均匀流,明渠恒定非均匀流,水跃,堰流及闸孔出流的水力计算,泄水建筑物下游的水流衔接与消能。下册包括渠道连接建筑物的水力计算,隧洞的水力计算,明渠恒定变量流,有压管中的非恒定流,明渠非恒定流,液体运动的三元分析法,渗流,水工模型试验基础,高速水流,河渠泥沙运动的基本规律。各章均有例题及习题。书末有附录,内容包括引水系统的水力计算分析实例,实验数据的表示方法,有限单元法在水力学(平面势流)计算中的应用。

上册各章为各专业必学部分。下册各章,各学校可根据不同专业,不同地区及不同讲课学时酌情取舍。

本书由吴持恭同志主编,参加编写的有赵文谦、汝树勋、吴至维、华国祥、梁曾相、杨凌真、张道成、冉洪兴等同志。

一九七九年一月召开了本教材的审稿会,参加审稿会的有:主审单位武汉水利电力学院(徐正凡、黄克中、郑邦民),合肥工业大学(张长高、陈瑞、孙其荃)以及其他审稿单位清华大学,华东水利学院,大连工学院,华北水利水电学院,西北农学院,郑州工学院,太原工学院,新疆八一农学院,青海工农学院,云南农业大学等十三所院校的代表。参加审稿会的同志对本教材提出了不少宝贵的修改意见,谨此表示感谢。

限于编者水平,同时编写时间也比较仓促,因而在教材中缺点和错误在所难免,希望广大读者提出批评和指正。

编 者
1979年2月

作者简介



吴持恭,男,汉族,出生于1918年9月,浙江东阳人。1942年于云南大学土木系获工学学士学位,1949年于美国德克萨斯州立农工大学获科学硕士学位。曾任云南大学、四川大学、成都工学院副教授,成都科技大学、四川联合大学、四川大学教授和博士生导师,先后担任水利系主任、水科所所长、水电学院名誉院长。曾任国家教委第一、二届学位委员会委员、国家教委工科基础课力学课程教学指导委员会副主任、中国水力发电工程学会理事和名誉理事、四川省水力发电工程学会副理事长、高速水力学国家重点实验室学术委员会主任等。早在1951年,即由龙门书局出版了《明渠水力学》一书。迄今已发表学术论著100余篇,多次获科技成果奖励。特别是在高速水力学领域,科研和人才培养成果丰硕。

目 录

9 泄水建筑物下游的水流衔接与消能	1
9.1 底流消能的水力计算	3
9.2 挑流消能的水力计算	23
9.3 面流及消能屏消能简介	30
9.4 水流衔接与消能的若干新技术	33
思考题	36
习题	36
10 有压管中的非恒定流	38
10.1 阀门突然关闭时有压管道中的水击	39
10.2 阀门逐渐关闭时有压管道中的水击	48
10.3 非恒定流的基本方程组	50
10.4 水击的基本微分方程组	54
10.5 水击计算的解析法	57
10.6 调压系统中的水面振荡	67
思考题	72
习题	72
11 明渠非恒定流	73
11.1 明渠非恒定流的特性及波的分类	73
11.2 明渠非恒定渐变流的基本方程	76
11.3 初始条件及边界条件	80
11.4 特征线法	82
11.5 瞬时流态法	91
11.6 明渠非恒定急变流	114
思考题	117
习题	117
12 液体运动的流场理论	118
12.1 流速、加速度	119
12.2 流线与迹线的微分方程	122
12.3 液体质点运动的基本形式	124
12.4 无涡流与有涡流	127
12.5 液体运动的连续性方程	133

12.6	理想液体的运动微分方程	136
12.7	实际液体的运动微分方程	146
12.8	物质扩散的微分方程	161
12.9	流动数值模拟的应用举例	167
	思考题	169
	习题	169
13	边界层理论基础	171
13.1	边界层的概念	171
13.2	边界层微分方程	173
13.3	边界层厚度、排挤厚度、动量损失厚度及能量损失厚度	176
13.4	边界层的动量方程	180
13.5	平板上层流边界层的计算	183
13.6	平板上湍流边界层的计算	185
13.7	边界层的分离现象及绕流阻力	188
	思考题	191
	习题	192
14	恒定平面势流	193
14.1	恒定平面势流的流速势及流函数	194
14.2	流网法解平面势流	200
14.3	势流叠加法解平面势流	205
	思考题	212
	习题	212
15	渗流	213
15.1	渗流的基本概念	214
15.2	渗流的基本定律——达西定律	216
15.3	地下河槽中恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流	220
15.4	棱柱体地下河槽中恒定渐变渗流的浸润曲线	222
15.5	普通井及井群的计算	229
15.6	水平不透水层上均质土坝的渗流计算	234
15.7	渗流场的基本微分方程式及其解法简介	238
15.8	用流网法求解平面渗流	241
15.9	水电比拟法绘制流网	245
	思考题	250
	习题	250
16	河渠挟沙水流理论基础	253
16.1	泥沙特性	253
16.2	泥沙在静水中的沉降速度	259
16.3	泥沙的临界推移力与起动流速	264

16.4	推移质输沙率	269
16.5	悬移质运动	273
16.6	悬移质含沙量沿垂线分布	274
16.7	水流挟沙能力	277
16.8	冲积河流和挟沙水流的阻力变化	278
16.9	泥沙连续性方程式	282
16.10	水利水电工程泥沙问题	282
	习题	288
17	高速水流	289
17.1	高速水流的脉动压强	290
17.2	水工建筑物的气蚀问题	299
17.3	高速掺气水流	307
17.4	非棱柱体明渠中的急流冲击波	311
17.5	陡槽中的滚波	324
	习题	325
18	相似原理和模型试验基础	327
18.1	相似现象的相似特征	327
18.2	相似条件	332
18.3	单项力作用下的相似准则	333
18.4	水工模型设计的几点说明	341
18.5	变态模型	341
	思考题	346
	习题	346
	参考文献	348
	习题答案	350
	索引	353
	Synopsis	357
	Contents	358
	作者简介	364

9

泄水建筑物下游的水流衔接与消能

天然河道中的水流,一般多属缓流,单宽流量沿河宽方向的分布也比较均匀。但当在河道中修建了闸、坝等泄水建筑物后,流动条件发生了变化,通过建筑物下泄的水流往往具有很高的流速,单位重量水体所具有的能量(即比能)也比下游河道中水流的正常比能大得多,对下游河床具有明显的破坏能力。特别是为了节省建筑物的造价,常要求这类建筑物的泄水宽度比原河床小,单宽流量加大,形成高速水流下泄,能量亦就更为集中,破坏性也更大。

如图 9.1 所示的溢流坝,设水流自坝顶下泄至坝趾 $c-c$ 断面时的比能为 E_1 (主要是动能),下游 2-2 断面的比能为 E_2 ,二者的比能差称为余能 $\Delta E = E_1 - E_2$, ΔE 的数值往往很大。设该溢流坝的单宽流量 $q = 80 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$,上下游水位差为 60 m,当略去坝前断面及 2-2 断面的流速水头,不计坝面的能量损失时,余能近似等于上下游水位差,即 ΔE 为 60 m。则单位宽度河床上每秒钟应消除的能量为

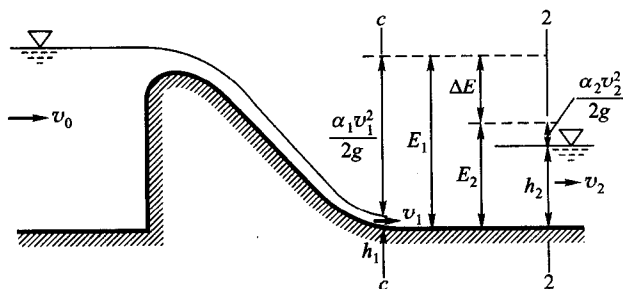


图 9.1

$$\begin{aligned} N &= \rho g q \Delta E = (9\,800 \text{ N/m}^3) \times (80 \text{ m}^2/\text{s}) \times (60 \text{ m}) \\ &= 47\,000\,000 \text{ N}\cdot\text{m/s} = 47\,000 \text{ kW} \end{aligned}$$

这样巨大的能量(主要为动能),若不采取有效措施加以消除,势必刷深河槽,冲毁河堤,甚至使建筑物遭到破坏。

所以,泄水建筑物下游水力设计的主要任务之一,就在于选择及设计适当的消能措施,使在下游较短距离内消除余能 ΔE ,并使 $c-c$ 断面的高速水流,安全地转变为下游的正常缓流,从而保证建筑物的安全。目前,常采用的衔接与消能措施,大致有下列三种类型:

1. 底流式消能

由第 6 章可知,急流向缓流过渡时必然发生水跃。所谓底流消能,就是在建筑物下游采取一定的工程措施,控制水跃发生的位置,通过水跃产生的表面旋滚和强烈的紊动以达到消能的目的。从而使 $c-c$ 断面的急流与下游的正常缓流衔接起来。这种衔接形式由于高流速的主流在底部,故称为底流式消能(见图 9.2)。

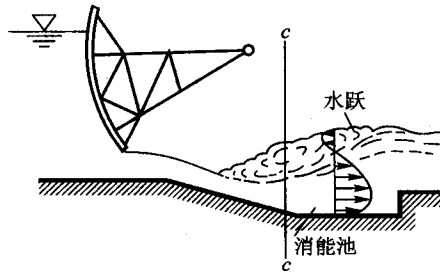


图 9.2

2. 挑流式消能

利用下泄水流所挟带的巨大动能,因势利导将水流挑射至远离建筑物的下游,使下落水舌对河床的冲刷不会危及建筑物的安全(见图 9.3)。下泄水流的余能一部分在空中消散,大部分在水舌落入下游河道后被消除。

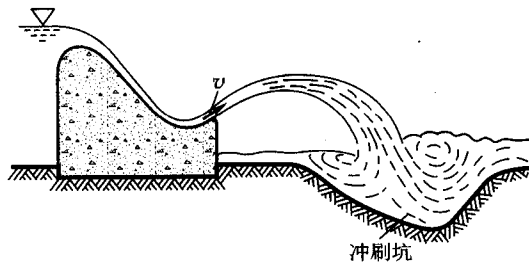


图 9.3

3. 面流式消能

当下游水深较大而且比较稳定时,可采取一定的工程措施,将下泄的高速水流导向下游水流的上层,主流与河床之间由巨大的底部旋滚隔开,可避免高速主流对河床的冲刷。余能主要通过水舌扩散,流速分布调整及底部旋滚与主流的相互作用而消除。由于衔接段中,高流速的主流位于表层,故称为面流式消能(图 9.4)。

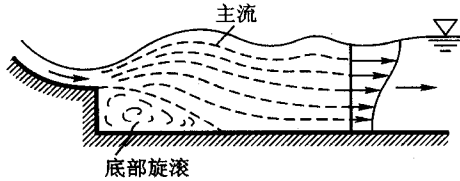


图 9.4

此外,还可以将上述三种基本的消能方式结合起来应用。如某些工程中采用的消能墙(图 9.5)就是一种底流和面流结合应用的实例。总之,工程实际中消能型式的选择是一个十分复杂的问题,必须结合具体工程的运用要求,并兼顾水力、地形、地质及使用条件进行综合分析,因地制宜地采取措施,以达到消除余能和保证建筑物安全的目的。

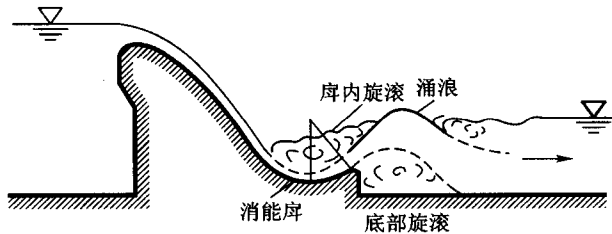


图 9.5

下面着重介绍底流消能及挑流消能的水力计算方法。其他消能方式的水力计算,可参阅有关资料。

9.1 底流消能的水力计算

底流消能是借助于一定的工程措施控制水跃位置,通过水跃发生的表面旋

滚和强烈紊动来消除余能。由第7章可知,水跃的能量损失随跃前断面弗劳德数 Fr_1 的增大而增加。以矩形断面明渠为例,当 $Fr_1=5$ 时,通过水跃消除的能量 $\Delta E \approx 50\% E_1$, E_1 为跃前断面的比能;当 $Fr_1=7$ 时, $\Delta E \approx 64\% E_1$;当 $Fr_1=9$ 时, $\Delta E \approx 70\% E_1$ 。由此可见,水跃的消能效果是十分显著的。所以,一般的水闸、中小型溢流坝或地质条件较差的各类泄水建筑物,多采用底流式消能。这是一种基本的消能型式,在我国获得了广泛应用。

底流式消能的水力计算,首先应分析建筑物下游的水流衔接形式,亦即判定水跃发生的位置;然后确定必要的工程措施。显然,建筑物下游水跃的位置,决定于通过建筑物下泄水流的特性和下游河道中水深和流速的大小。当通过流量一定时,下游河道中的水深和流速通常是已知的。至于通过建筑物下泄的水流,则常以建筑物下游的收缩断面作为分析水流衔接形式的控制断面。

9.1.1 泄水建筑物下游收缩断面水深的计算

以图9.6所示的溢流坝为例来说明收缩断面水深的计算方法。

水流自坝顶下泄时,势能逐渐转化为动能,水深减小,流速增加。到达坝趾的 $c-c$ 断面,流速最大,水深最小,称为收缩断面,其水深以 h_c 表示, h_c 小于临界水深 h_K 。现以通过收缩断面底部的水平面为基准面,列出坝前断面 $0-0$ 及收缩断面 $c-c$ 的能量方程式,可得

$$E_0 = h_c + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + \zeta \frac{v_c^2}{2g} = h_c + (\alpha_c + \zeta) \frac{v_c^2}{2g} \quad (9.1)$$

式中: ζ 为 $0-0$ 断面至 $c-c$ 断面间的水头损失系数; E_0 为以收缩断面底部为基准面的坝前水流总比能。由图9.6可以看出

$$E_0 = P_1 + H + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = P_1 + H_0 \quad (9.2)$$

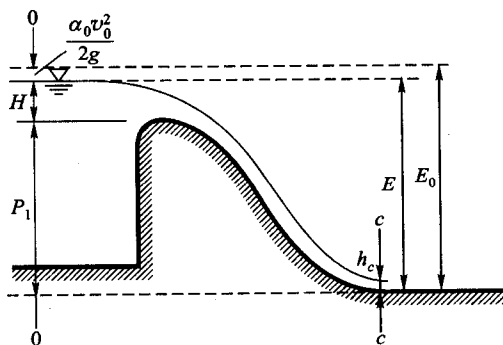


图 9.6