

高等学校教材

水力学

(1980年修订版)

下 册

清华大学水力学教研组编

高等教育出版社

高等学校教材

水 力 学

(1980年修订版)

下 册

清华大学水力学教研组编

高等教育出版社

本书责任编辑 张元直

本书原由人民教育出版社出版。1983年3月9日，上级同意恢复“高等教育出版社”；本书今后改用高等教育出版社名义继续印行。

高等学校教材

水 力 学

(1980年修订版)

下 册

清华大学水力学教研组编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 17.25 插页 3 字数 410,000

1981年7月第1版 1983年8月第3次印刷

印数 13,801—18,850

书号 15010·0341 定价 1.75 元

目 录

第十一章 明槽中的恒定均匀流与非均匀渐变流	1
§ 11-1 概述.....	1
§ 11-2 明槽均匀流.....	3
(一) 明槽均匀流的特征及其形成条件.....	3
(二) 明槽均匀流的基本公式.....	6
(三) 渠道水力计算中的几个问题.....	8
(四) 渠槽水力计算实例.....	14
§ 11-3 缓流, 急流, 临界流.....	18
(一) 微波的波速, 临界流速.....	19
(二) 流态判别数——佛汝德数.....	23
(三) 断面单位能量, 临界水深.....	23
(四) 临界底坡.....	28
§ 11-4 明槽恒定非均匀渐变流基本方程.....	30
(一) 棱柱形槽水深沿程变化的微分方程.....	32
(二) 人工渠槽断面单位能量沿程变化的微分方程.....	33
(三) 天然河道水位沿程变化的微分方程.....	34
§ 11-5 明槽非均匀渐变流水面变化的分析.....	34
(一) 棱柱形槽渐变流水面线型式.....	34
(二) 水面线分析的一般原则.....	39
(三) 水面线分析举例.....	41
§ 11-6 明槽水面线的计算.....	44
(一) 分段法.....	44
(二) 数值积分法.....	53
(三) 水力指数法简介.....	56
(四) 电算实例.....	59
§ 11-7 明槽水流的掺气.....	68
(一) 掺气现象和掺气发生的条件.....	68
(二) 掺气水流的水力计算.....	71
习题.....	75

参考文献	82
------	----

第十二章 明槽中的恒定急变流	83
-----------------------	-----------

§ 12-1 概述	83
-----------	----

§ 12-2 水跌——缓流到急流的过渡	84
---------------------	----

§ 12-3 水跃——急流到缓流的过渡	86
---------------------	----

(一) 水跃现象	86
----------	----

(二) 平底棱柱形明槽中的水跃方程式	87
--------------------	----

(三) 矩形断面明槽中的水跃共轭水深关系式	90
-----------------------	----

(四) 矩形断面明槽中的水跃长度	91
------------------	----

(五) 水跃公式的验证	91
-------------	----

(六) 其他类型明槽中的水跃	93
----------------	----

§ 12-4 缓流弯段水流	101
---------------	-----

(一) 弯段水流的横向水面坡降	102
-----------------	-----

(二) 弯段上的断面环流	104
--------------	-----

(三) 弯段的水头损失	106
-------------	-----

§ 12-5 急流的冲击波与弯段水流	107
--------------------	-----

(一) 冲击波的基本性质	108
--------------	-----

(二) 急流弯段水流	113
------------	-----

§ 12-6 直槽变断面的过渡段水流	114
--------------------	-----

(一) 平面上断面突变的流动分析	114
------------------	-----

(二) 过渡段的缓流	117
------------	-----

(三) 过渡段的急流	119
------------	-----

习题	122
----	-----

参考文献	125
------	-----

第十三章 闸堰和洞涵的过流	127
----------------------	------------

§ 13-1 闸堰过流的水流特点	127
------------------	-----

§ 13-2 闸孔出流	130
-------------	-----

(一) 平板闸门下出流	130
-------------	-----

(二) 影响闸孔过水能力因素的分析	134
-------------------	-----

(三) 其他孔口出流	139
------------	-----

(四) 闸孔非恒定出流	142
-------------	-----

§ 13-3 堰顶溢流	145
-------------	-----

(一) 薄壁堰溢流	145
-----------	-----

(二) 实用堰溢流·····	149
(三) 宽顶堰溢流·····	166
§ 13-4. 明流洞、涵的过流·····	173
(一) 隧洞过流的流态及其判别·····	174
(二) 明流隧洞的泄流能力的计算·····	176
(三) 明流隧洞断面余幅问题·····	181
习题·····	181
参考文献·····	187
第十四章 建筑物出流与下游的衔接和消能 ·····	189
§ 14-1 泄水建筑物出流的特性与衔接消能问题·····	189
(一) 问题的提出·····	189
(二) 泄水建筑物出流与下游衔接和消能的主要方式·····	191
(三) 建筑物出流收缩断面的水力要素·····	192
§ 14-2 底流型的衔接与消能·····	195
(一) 底流型的衔接形式·····	195
(二) 水跃消能段中水流的特征·····	198
(三) 水跃的消能量·····	202
(四) 简单消能池的水力计算·····	204
(五) 辅助消能工·····	210
(六) 护坦后的冲刷与河床加固·····	211
§ 14-3 面流型和混合流型的衔接与消能·····	219
(一) 水平或小挑角跌坎射流的下流衔接形式·····	219
(二) 面流衔接的水力计算·····	221
(三) 消能岸的水流衔接消能·····	224
§ 14-4 挑流型的衔接与消能·····	227
(一) 挑流射程·····	228
(二) 冲刷坑的估算·····	231
§ 14-5 关于水流衔接消能的空间问题·····	238
习题·····	241
参考文献·····	245
第十五章 明槽中的非恒定流动 ·····	247
§ 15-1 概述·····	247
(一) 明槽非恒定流的特性·····	247

(二) 位移波的分类	249
§ 15-2 明槽非恒定渐变流动的基本方程	250
(一) 明槽非恒定流动的连续方程	250
(二) 明槽非恒定渐变流动的运动方程	253
(三) 明槽非恒定渐变流动的计算方法	255
(四) 初始条件和边界条件	257
§ 15-3 特征线法	258
(一) 特征方程及其物理意义	258
(二) 特征差分方程和定解条件	261
§ 15-4 直接差分法	266
(一) 概述	266
(二) 常用的显式差分格式	269
(三) 常用的隐式差分格式	271
(四) 显式与隐式差分格式的比较	272
(五) 电算实例	273
§ 15-5 瞬态法	288
(一) 瞬态法的有限差量方程式	289
(二) 瞬态法的图解计算简介	290
§ 15-6 明槽中的非恒定急变流动——断波	293
(一) 棱柱形明槽中的断波波速和波流量	294
(二) 溃坝波的简化解	298
习题	302
参考文献	303
第十六章 波浪理论基础	304
§ 16-1 概述	304
§ 16-2 势波理论	308
(一) 基本方程、边界条件和初始条件	308
(二) 余弦推进波	313
(三) 势波的叠加	323
§ 16-3 拉格朗日连续方程和运动方程	327
(一) 连续方程	327
(二) 运动方程	330
§ 16-4 有限振幅推进波	333

(一) 深水推进波.....	333
(二) 浅水推进波.....	343
(三) 关于波浪要素的估选.....	351
§ 16-5 有限振幅立波.....	352
(一) 深水立波.....	354
(二) 浅水立波.....	358
(三) 关于浅水立波理论的讨论.....	363
§ 16-6 作用在孤立式建筑物上的波压力.....	365
(一) 绕流的阻力和惯性力.....	365
(二) 小尺度孤立式柱体上的波压力.....	370
习题.....	375
参考文献.....	377
第十七章 动床水力学基础.....	378
§ 17-1 概述.....	378
(一) 问题的提出.....	378
(二) 泥沙的主要特性.....	379
§ 17-2 泥沙的起动.....	384
(一) 床面颗粒的受力分析.....	385
(二) 起动条件.....	387
§ 17-3 床面形态.....	390
§ 17-4 动床的水流阻力.....	396
(一) 动床阻力的组成.....	396
(二) 总阻力和部分阻力之间的关系.....	400
(三) 床面形态阻力.....	408
§ 17-5 挟沙水流及其特性.....	412
(一) 沙粒的悬浮.....	415
(二) 含沙浓度的分布.....	413
(三) 含沙水流的特性.....	418
§ 17-6 水流的挟沙能力.....	424
(一) 推移质输沙率.....	424
(二) 悬移质输沙率.....	426
习题.....	430
参考文献.....	433

第十八章 渗流	435
§ 18-1 概述	435
(一) 土壤的水力特性	436
(二) 水在土壤中的状态	436
(三) 渗流理论的简化模型	437
§ 18-2 渗流的达西定律	439
(一) 达西定律	439
(二) 达西定律的适用范围	440
(三) 渗透系数及其确定方法	442
§ 18-3 渗流运动的微分方程	444
(一) 渗流阻力的表达式	445
(二) 渗流的运动方程	445
(三) 渗流的连续性方程	447
(四) 渗流的流速势与拉普拉斯方程	449
(五) 无压渐变渗流的布辛尼斯克方程	450
(六) 起始条件和边界条件	452
(七) 渗流问题的求解方法	453
§ 18-4 地下明槽中的渐变渗流	455
(一) 一维渐变渗流的一般公式	456
(二) 地下明槽渐变渗流的浸润线	457
(三) 河间地区的渗流	460
§ 18-5 井的渗流	462
(一) 完全普通井	463
(二) 完全自流井	465
(三) 井群	467
§ 18-6 均质土坝的渗流	471
(一) 不透水地基上均质土坝的渗流	471
(二) 有限深度透水地基上的均质土坝	478
§ 18-7 水工建筑物透水地基中的渗流	479
(一) 复变函数法	480
(二) 分段法	485
§ 18-8 河渠自由渗流	487
(一) 平面无压渗流的求解方法	487
(二) 无地下水回水时的河渠自由渗流	489

§ 18-9 渗流的水电比拟实验法	493
(一) 水电比拟法原理	494
(二) 水电比拟法的设备及操作	495
(三) 应用流网求解渗流	496
§ 18-10 非恒定渗流	498
(一) 弹性释放与弹性贮存	498
(二) 非恒定渗流的基本方程	500
(三) 无压渐变非恒定渗流	502
§ 18-11 应用有限单元法解渗流问题	503
(一) 概述	504
(二) 有限单元法的主要步骤	506
(三) 电算实例	510
习题	519
参考文献	524
索引	525
附录II 梯形、矩形断面明槽正常水深求解图	
附录III 梯形、矩形、圆形断面明槽临界水深求解图	
附录IV 矩形断面明槽收缩断面水深及水跃共轭水深求解图	
附录V 沉降粒径~沉降速度关系曲线图	
附录VI 爱因斯坦推移质输沙率公式 $\psi \sim \Phi$ 曲线图	

第十一章 明槽中的恒定均匀流 与非均匀渐变流

§ 11-1 概 述

前面第八、九章已经讨论了管道中的有压流动,从本章开始将讨论明槽中的水流问题。天然河道或渠道、涵洞、渡槽等人工输水道中的水流,都具有显露在大气中的自由水面,水面上各点的压强一般都等于大气压,相对压强为零,所以明槽水流又称无压流动。在水利工程中经常遇到这类流动问题。例如拦河筑坝形成水库,需要计算上游河道中水面的壅水长度,以估计淹没影响的范围;开挖溢洪道或泄洪隧洞需要有一定的输水能力,以宣泄多余的洪水;为引水灌溉或发电而修建的渠道,应有合理的断面尺寸等等。这些都需要掌握明槽水流的运动规律,研究明槽水流的水力计算方法,为规划设计提供科学的依据。

明槽水流的水面不受固体边界的约束。在明槽中如有干扰出现,例如槽底坡度改变,断面形状尺寸变化,沿程粗糙情况不一致等,自由水面的位置都将随之升降。在一定的流量下,由于上下游控制条件的不同,同一明槽中的水流可以形成各种不同型式的水面线。正因为明槽水流的上边界不固定,故解决无压流动的问题比解决有压流动问题要复杂得多。

明槽中的水流根据其空间点上运动要素是否随时间变化,也分成恒定流与非恒定流;根据其运动要素是否随流程变化,也分成均匀流与非均匀流。非均匀流又有渐变流与急变流之分。这一章讨论的是恒定均匀流和非均匀渐变流,常用能量方程进行分析;下

一章讨论的是恒定非均匀急变流, 常用动量方程进行分析。

明槽的槽身分成棱柱形槽与非棱柱形槽两类。断面形状和尺寸保持不变的长直明槽称为棱柱形槽。棱柱形槽中水流过水断面面积 A 的大小只随水深 h 而变化。轴线顺直, 断面规则的人工渠、槽、洞、涵均属棱柱形槽。断面形状和尺寸沿程不断变化的明槽称为非棱柱形槽。非棱柱形槽中过水断面既随水深改变, 又因位置不同而不同, 渠系建筑物进出口的渐变段就是典型的非棱柱形槽, 天然河道的断面不规则, 主流弯曲多变, 也是非棱柱形槽。

明槽断面有各式各样的形状, 见图 11-1。人工渠槽的断面形

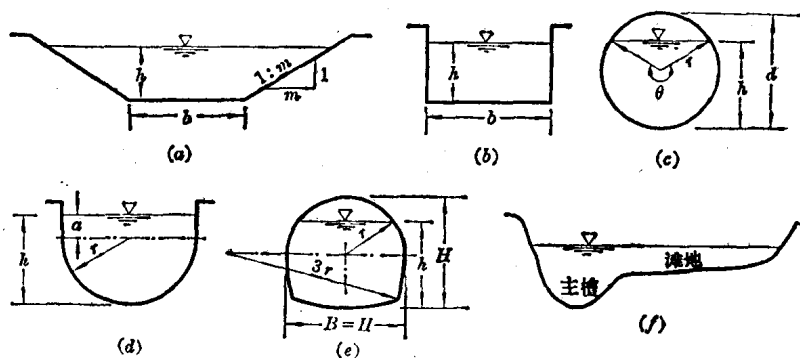


图 11-1

状既要考虑水力学条件, 又要结构合理, 施工方便, 一般是对称的矩形、梯形、圆形、马蹄形或 U 形等。天然河道常有主槽与滩地之分, 形成复式断面。

人工渠槽槽底一般向下游倾斜。槽底与纵剖面的交线称为槽底线。槽底线与水平线的夹角 θ 的正弦, 称为槽底纵坡或底坡, 以符号 i 表示。如果选取的两个断面的槽底高程各为 z_{b1} 和 z_{b2} , 其间流程长度为 s , 则

$$i = \sin \theta = \frac{z_{b1} - z_{b2}}{s} \quad (11-1)$$

通常 θ 角很小, $\sin \theta \approx \tan \theta$, 因而也常以两断面之间的水平距离 L

来代替流程长度, 见图 11-2, 则

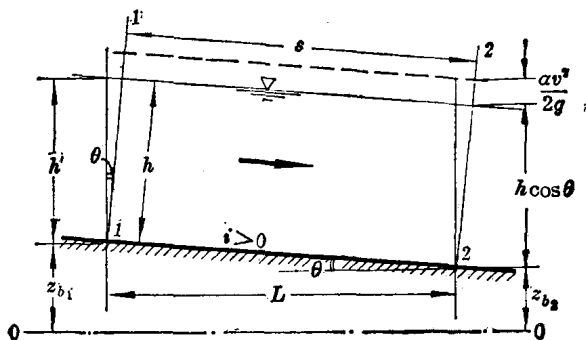


图 11-2

$$i \approx \tan \theta = \frac{z_{b1} - z_{b2}}{L}. \quad (11-1a)$$

明槽水流的过水断面垂直于流动方向, 因而水深 h 垂直于流向。但为了量测和计算的方便, 也常取铅垂断面为过水断面, 采用垂直于水平方向的铅垂水深 h' 代替实际水深 h 。由图 11-2 可以看出, $h' = h / \cos \theta$ 。在底坡 $i \leq 0.1$ ($\theta \approx 6^\circ$) 的情况下, 采用水平距离 L 代替流程长度 s 或铅垂水深 h' 代替 h 引起的误差是不大的。

明槽的槽底沿程降低 ($z_{b1} > z_{b2}$), $i > 0$, 称为正底坡或顺坡; 槽底高程沿程不变 ($z_{b1} = z_{b2}$), $i = 0$, 称为平底坡; 槽底沿程抬高 ($z_{b1} < z_{b2}$), $i < 0$, 称为反底坡或逆坡。天然河道的底坡陡坦相间, 参差不一, 计算时采用的是一定河段上的平均底坡。

§ 11-2 明槽均匀流

(一) 明槽均匀流的特征及其形成条件

均匀流动是明槽中最简单的流动型式。均匀流的运动规律是渠槽水力设计的基本依据, 均匀流的特征及其形成条件在分析明槽非均匀流问题时重要的作用。

前面已经提到, 均匀流动是指运动要素沿程不变的流动。明槽均匀流就是明槽中水深、断面平均流速、流速分布等均保持沿程不变的流动⁵, 其流线为一组与槽底平行的直线。由于水深沿程不变, 水面线与槽底线平行; 又由于流速水头沿程不变, 总水头线与水面线平行, 如图 11-3 所示。也就是均匀流动的水面坡度 J_z 、总水头线坡度 J_f (即水力坡度 J , 因在均匀流中只有沿程水头损失 h_f , 故用符号 J_f 表示) 和底坡 i 都相等。

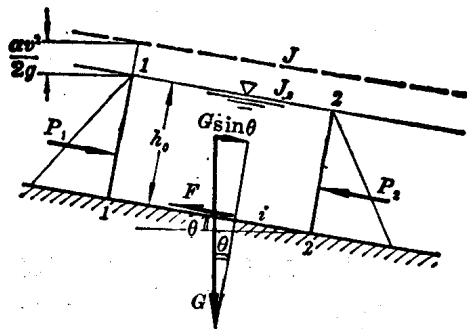


图 11-3

$$J_f = J_z = i. \quad (11-2)$$

明槽均匀流既然是一种等速直线运动, 没有加速度, 则作用在水体上的力必然是平衡的。在图 11-3 所示均匀流动中取出断面 1-1 和断面 2-2 之间的水体进行分析, 作用在水体上的力有重力 G 、阻力 F 、两端断面上的水压力 P_1 和 P_2 。沿流动方向写平衡方程, 得

$$P_1 + G \sin \theta - F - P_2 = 0. \quad (11-3)$$

因为是均匀流动, 其压强符合静水压强分布规律, 水深又不变, 故 P_1 和 P_2 大小相等, 方向相反, 互相抵消。因而 $G \sin \theta = F$, 也就是明槽均匀流动中阻碍水流运动的摩阻力 F 与促使水流运动的重力分量 $G \sin \theta$ 相平衡。

从能量的观点来看, 在明槽均匀流动中, 对于单位重量液体,

重力所做的功正好等于阻力所做的功。在一定的距离上，水流因高程降低所引起的势能减少正好等于克服水流阻力所损耗的能量，而水流的动能维持不变。这也就是(11-2)式的物理意义。

为了区别均匀流动与非均匀流动，通常称明槽内均匀流动的水深为正常水深，以符号 h_0 表示。

由于明槽均匀流动有上述特征，它的形成就需要一定的条件，即：明槽中的水流必须是恒定的，流量保持不变，沿程没有水流出或汇入。渠槽必须是长而直的顺坡($i > 0$)棱柱形槽，粗糙情况沿程不变，没有建筑物的局部干扰。而且，只有离渠槽进口一定距离，边界层充分发展以后才能形成均匀流。

明槽均匀流由于种种条件的限制，往往难以完全实现，在渠槽中大量存在的是非均匀流动。然而，对于顺直的正底坡棱柱形槽，只要有足够的长度，总是有形成均匀流动的趋势的。例如，由于边界条件的控制，若明槽内水深小于正常水深，则这时重力作用因水深减小而相应减小，但平均流速却大于均匀流动的平均流速。明槽中多数为紊流粗糙区，水流阻力与流速平方成正比。这样，阻力就大于重力沿流动方向的分力，促使水流作减速运动。随着流速的减小，阻力相应减小，水深不断增加，经过一段流程，重力分量与阻力在新的状态下达到平衡，水深等于正常水深。反之，如果边界条件使得明槽内水深大于正常水深，则平均流速小于均匀流动的平均流速，这时重力沿流动方向的分量大于水流阻力，促使水流作加速运动。随着流速的增加，阻力相应加大，水深不断减小，经过一段流程，重力分量与阻力也能平衡，这时水深又等于正常水深。所以，无论是水深大于或小于正常水深的非均匀流动，只要渠槽足够长，又没有其他干扰，水流的趋势总是向均匀流动发展的。

人工渠道一般都是尽量使渠线顺直，底坡在较长距离内维持不变，并且采用同一种材料做成规则一致的断面，这样就基本上能

保证均匀流形成的条件。因此,按明槽均匀流来设计渠道是符合实际情况的。天然河道中一般不容易形成均匀流,但对于某些顺直整齐的河段,也有按均匀流作近似估计的。其他人工非棱柱形槽通常采用分段计算,在各段上按均匀流考虑,一般情况下也可以满足生产上的要求。因此,均匀流动理论是分析明槽水流的一个基础。

(二) 明槽均匀流的基本公式

明槽水流多属紊流粗糙区,沿程水头损失主要与固体边界的形状尺寸以及粗糙情况有关,其大小与断面平均流速的平方成正比。

明槽均匀流水力计算的基本公式是连续方程和谢才公式:

$$Q = Av, \quad (2-12)$$

$$v = C\sqrt{RJ}. \quad (6-45)$$

在明槽均匀流的情况下,水力坡度 J 等于槽底纵坡 i , 水深为正常水深 h_0 , 相应的过水断面为 A_0 , 水力半径为 R_0 , 谢才系数为 C_0 , 则明槽均匀流的流量公式为

$$Q = A_0 C_0 \sqrt{R_0 i}. \quad (11-4)$$

在第八章有压管流中称 $K = AC\sqrt{R}$ 为流量模数,在明槽均匀流中与此类似,称

$$K_0 = A_0 C_0 \sqrt{R_0} \quad (11-5)$$

为明槽均匀流的流量模数,则(11-4)式可写为

$$Q = K_0 \sqrt{i}. \quad (11-6)$$

均匀流公式中的谢才系数 C , 在上册已有说明,通常采用曼宁公式(6-47)或巴甫洛夫斯基公式(6-49)来确定,即

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (6-47)$$

或

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (6-49)$$

$$y = 2.5\sqrt{n} - 0.13 - 0.75\sqrt{R} (\sqrt{n} - 0.10). \quad (6-50)$$

谢才系数 C 是反映断面形状尺寸和粗糙程度的一个综合系数。从计算式可以看出, 它与水力半径 R 值和粗糙系数 n 值有关, 而 n 值的影响远比 R 值大得多。明槽表面材料愈光滑平整, n 值就愈小, 相应的水流阻力也小, 在其他条件不变的情况下, 通过的流量就愈大。如果在设计中选择的 n 值与实际相比偏大, 则势必增大断面尺寸, 增加工程量, 不仅造成浪费, 而且渠中实际流速大于设计值, 还可能引起土渠的冲刷。反之, 如果选择的 n 值偏小, 渠槽建成后实际流速达不到设计值, 影响渠槽的过流能力, 造成渠槽漫溢或渠中淤积。所以, 正确选择粗糙系数 n 值是明槽均匀流计算中的一个关键问题。

对于人工渠槽, 多年来积累了较多的实验资料和工程经验。例如混凝土的 n 值约为 0.013~0.017; 浆砌石的 n 值约为 0.025 左右; 土渠的 n 值约为 0.0225~0.0275; 开挖的岩石面 n 值约为 0.025~0.035。上册表 6-4 已列出了粗糙系数 n 值。更详细的资料可查阅该表附注所列水力计算手册。

对于天然河流, 实际情况要复杂得多, 因为它是不规则的非棱柱形槽, 总是形成非均匀流动, n 值的正确估计就很困难, 常要通过实际河流的量测来确定。一般是选取河道顺直、水面宽度和断面形状变化不大的河段, 量测流量 Q , 测绘横断面图, 量测河段长度、水面高差, 利用均匀流公式(11-4)和曼宁公式(6-47)来反求 n 值。

影响天然河道 n 值的因素很多, 正确选择比较困难。河床组成材料的粗糙不同、河床断面的不规则性、平面上河道弯曲变化情况、河滩的复盖情况(如有无树木杂草等), 河道的阻碍情况(如有