

水力学

下册

HYDRAULICS

李家星 陈立德 主编

河海大学出版社

水 力 学

主编 李家星 陈立德

河海大学出版社

内 容 简 介

本书按国家教育委员会高等教育司制定的《水力学课程教学基本要求》分为基础水力学和专门水力学两部分。

上册为基础水力学部分,共十章,包括绪论、水静力学、液体一元恒定总流基本原理、层流和紊流,液流阻力和水头损失、液体三元流动基本原理、孔口、管嘴出流和有压管道恒定流、明渠均匀流、明渠水流的两种流态及其转换、明渠非均匀流、堰流和闸孔出流。

下册为专门水力学部分,共九章,包括泄水建筑下游水流的衔接和消能、渗流、管网水力计算、管道非恒定流、明渠非恒定流、高速水流、挟沙水流基础、波浪理论基础、水力模型试验基本原理。

本书主要作为高等院校水利类各专业本科和专科的教材,也可供有关工程人员参考。

责任编辑 吴毅文

水力学(下册)

李家星、陈立德 主编

河海大学出版社

(南京西康路1号,邮政编码:210098)

发行:江苏省新华书店

印刷:河海大学印刷厂

(南京西康路1号,邮政编码:210098)

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 9.875 插页 1 字数 266 千字

1996年6月第1版 1996年6月第1次印刷

印数 1—5500 册

ISBN 7-5630-0948-5

O·58

定价:14.00 元

前 言

本书按国家教育委员会高等教育司制定的《水力学课程教学基本要求》，结合我们多年的教学实践，并广泛地吸取国内外教材中的优点，编写而成。全书以分析水流现象、揭示水流规律、加强水力学的基本概念、基本原理为主，避免繁琐的数学推导，着重于物理概念的阐述。

全书分为上、下两册。上册为基础水力学部分；下册为专门水力学部分，可供不同专业选择。

本书主要由河海大学编写，部分章由兄弟院校编写。参加编写的有：河海大学李家星（第一、四、十章）、赵振兴（第二、十一章）、陈立德（第三、十六章）、吴如漪（第五章）、戎红玉（第六章）、王培莉（第七、八、九章）、薛朝阳（第十四、十八章）；南昌大学张良然（第十二章）；福州大学陈水佛（第十三章）、谢佩珍（第十九章）；西安理工大学王新宏（第十五章）、钱善琪（第十七章）。

全书由李家星、陈立德统编审定，由胡德保主审。在编写过程中得到陈玉璞、许荫椿、薛朝阳教授等的热情帮助和大力支持，在此一并表示衷心地感谢。

由于时间仓促，水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请批评、指正。

编 者

1995 年 12 月

目 录

第十一章 泄水建筑物下游水流的衔接和消能	(1)
第一节 概述.....	(1)
第二节 底流消能.....	(4)
第三节 挑流消能	(22)
第四节 面流消能	(27)
习 题	(36)
第十二章 渗流	(37)
第一节 概述	(37)
第二节 土壤的分类,渗流模型.....	(37)
第三节 达西定律	(40)
第四节 恒定无压渗流	(44)
第五节 井的渗流	(53)
第六节 土坝渗流	(61)
第七节 渗流的基本微分方程,渗流的流速势函数.....	(68)
第八节 恒定平面渗流的流网解法	(74)
习 题	(84)
第十三章 管网水力计算	(87)
第一节 概述	(87)
第二节 沿线流量和节点流量	(88)
第三节 管网计算的基本方程	(92)
第四节 流量分配与管径的确定	(97)
第五节 环状管网的平差计算	(98)
习 题.....	(102)
第十四章 有压管道非恒定流	(106)

第一节	概述	(106)
第二节	水击现象及水击分类	(106)
第三节	直接水击压强和水击波速	(112)
第四节	一元非恒定流基本方程	(117)
第五节	水击基本方程	(121)
第六节	简单管道水击压强计算	(128)
第七节	调压系统非恒定流	(136)
习 题		(140)
第十五章 明渠非恒定流		(142)
第一节	概述	(142)
第二节	明渠非恒定渐变流的基本方程——圣维南方程组	(145)
第三节	特征线法	(153)
第四节	直接差分法	(162)
第五节	明渠非恒定急变流——断波	(174)
第十六章 水工建筑物的高速水流简介		(181)
第一节	概述	(181)
第二节	运动要素的数据处理	(182)
第三节	水工建筑物的空蚀	(186)
第四节	掺气水流简介	(190)
习 题		(193)
第十七章 挟沙水流基础		(194)
第一节	概述	(194)
第二节	浑水的特性	(194)
第三节	泥沙的沉速	(198)
第四节	推移质运动	(204)
第五节	悬移质运动	(216)
习 题		(228)
第十八章 波浪理论基础		(230)

第一节	概述.....	(230)
第二节	风成波的发生、发展和消失及其行近岸滩时的变化	(232)
第三节	拉格朗日连续方程和运动方程.....	(235)
第四节	有限振幅推进波.....	(241)
第五节	有限振幅立波.....	(265)
习 题		(283)
第十九章	水力模型试验基本原理.....	(284)
第一节	概述.....	(284)
第二节	量纲分析法.....	(284)
第三节	水力相似基本原理.....	(292)
第四节	相似原理的应用及水力模型设计.....	(300)
第五节	水力模型的分类.....	(305)
习 题		(307)

附 录

5. 矩形断面底流消能水力计算求解图

第十一章 泄水建筑物下游水流的衔接和消能

第一节 概 述

在河道上兴建的水工建筑物,如节制闸、溢流坝等,抬高了上游水位,使势能增大。当建筑物泄水时,势能转换成动能,再加上为了降低工程造价或工程布置的要求,又往往要求尽可能地缩短泄流宽度,使单宽流量增加,这样就使得流经泄水建筑物下泄的水流具有很高的动能,并引起下游河床的冲刷。为此,必须采取消能措施,使得泄水建筑物下游高速集中的水流与下游河道正常水流衔接起来,这就是本章所要讨论的泄水建筑物下游水流的衔接和消能问题。

泄水建筑物下游能量转换的情况如图 11.1 所示,设坝趾处单位重量水体所具有的能量为 E_1 ,下游河道单位重量水体的能量为 E_2 ,两者相差 $\Delta E = E_1 - E_2$,称 ΔE 为余能。泄水建筑物下游的消能就是要采取消能措施,在尽可能短的距离内有效的消除余能,使水流与下游河道正常水流很好的衔接。

消能问题处理不当常引起泄水建筑物下游严重的冲刷,并危及建筑物的安全。例如奥地利的列伯丁(Lebring)坝,上下游水位差为 11.35 m,砂卵石河床,冲刷坑的深度竟达到 12 m,其冲刷的严重性可见一斑。国内外由于下游冲刷引起的水工建筑物失事并非少见,因此,消能问题应引起足够的重视。

冲刷是水流与河床相互作用的结果。下泄水流巨大流速的冲刷作用和水流的强烈紊动使得河床组成物逐渐松动、瓦解、掀起和

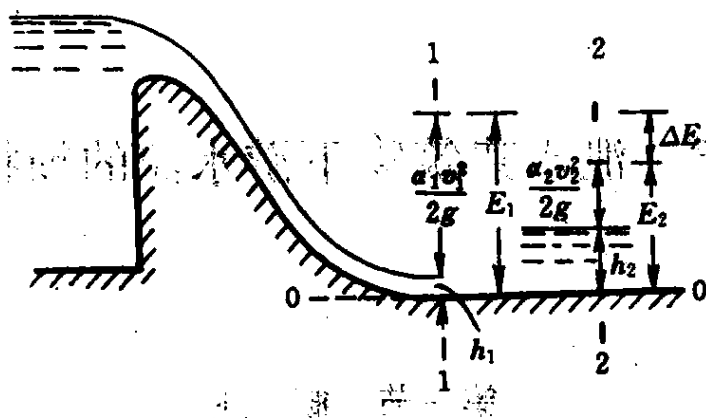


图 11-1

飘移。水流的能量随着冲刷深度的增加和冲刷距离的延长而不断地减少，直至和下游河道在天然状态下的水流能量接近时冲刷才会停止。当然，冲刷的情况还与河床的地质状况或土壤颗粒大小、组成及相互粘结情况等有关。

为了防止河床冲刷，保证水工建筑物的安全，必须采取工程措施，使下泄水流中的多余动能尽可能在较短的距离内消耗掉，以便尽快地与天然河道中的水流衔接起来。

怎样才能消耗下泄水流的大部分动能呢？我们知道摩擦和碰撞是动能转化为热能而耗散的主要形式。要尽快地消耗水流的多余动能，就要加剧水流内部质点之间、水质点与空气或固壁之间的摩擦和碰撞。常用的消能方式有底流消能、挑流消能和面流消能等。

1. 底流消能

利用水跃旋滚区中水流的激烈紊动进行消能。由于水跃区的主流靠近底部，故称这种消能方式为底流消能。如图 11.2(a) 所示。

2. 挑流消能

在泄水建筑物的末端利用下泄水流本身的动能因势利导采用挑流坎（又称挑流鼻坎）将水股抛射入空中，使水流扩散并与空气

我的管径4米

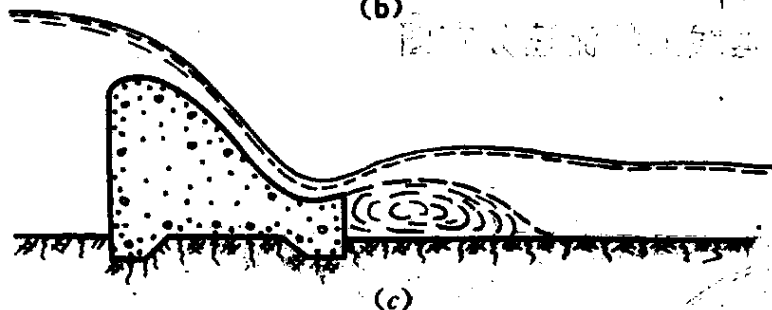
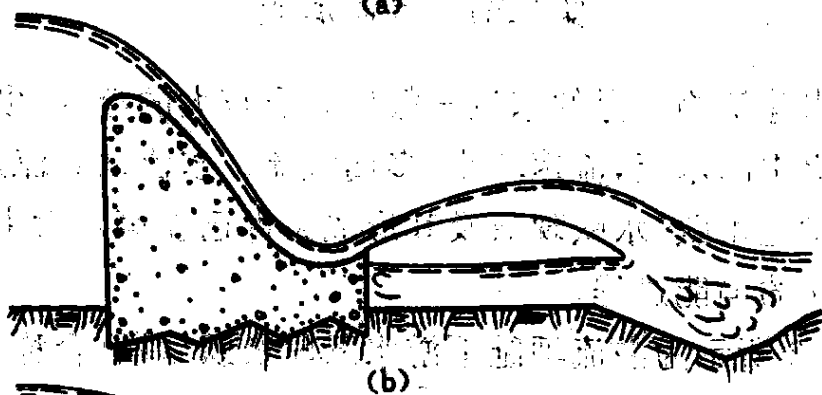
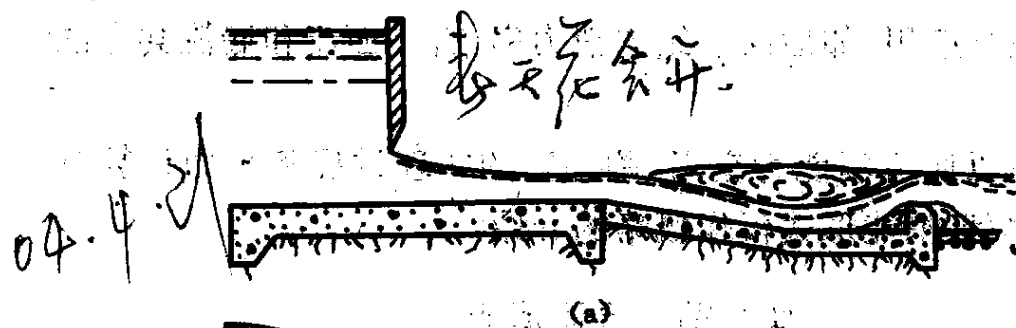


图 11.2

摩擦,消耗部分动能,然后当水股落入水中时,又与下游水流和河床摩擦碰撞再进一步消耗能量。由于这种消能方式是将高速水流抛射至远离建筑物的下游,使下落水股对河床的冲刷不危及建筑物的安全,故称这种消能方式为挑流消能,如图 11.2(b)所示。

3. 面流消能

在泄水建筑物的末端设置一个比下游水位低的水平的或仰角较小的导流坎,将高速水流射入下游水域的表层,在主流与河床之间形成底部旋滚以消耗水流的能量。由于在消能段中高流速的主流位于表面部分,故称这种消能方式为面流消能,如图 11.2(c)所

示。

实际工程的消能方式可能不是单一的形式,而是两种甚至三种方式的混合应用,如后面介绍的消力库,就是面流和底流共存的混合流型。

本章将以底流消能为重点,阐述它的物理过程和水力计算方法,对其它两种消能形式仅作概略的介绍。

第二节 底流消能

从泄水建筑物下泄的水流一般均具有较大的流速,多属急流,而下游河道中的水流,流速较小,多属缓流。水流从急流过渡到缓流必然会发生水跃。水跃现象及其形成条件已在第八章中阐明,下面介绍水跃的消能过程。

图 11.3 所示为溢流坝趾下游水跃段及跃后段(合称水跃消能段)各断面铅垂线上的流速分布图。

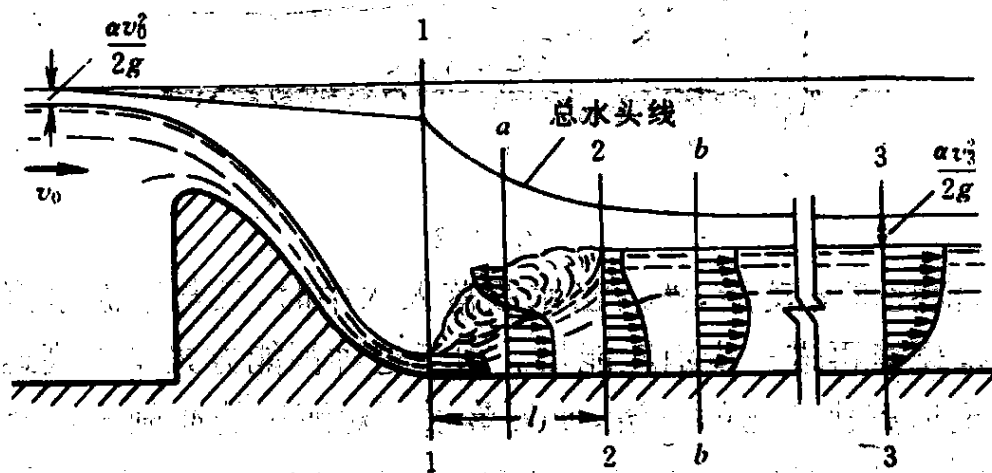


图 11.3

在跃前断面 1 上,流速最大,流速分布比较均匀。在水跃区内流速分布呈 s 形(如断面 a),表面旋滚的上半部流速指向上游,下半部流速指向下游,近底部流速最大,但此断面的平均流速比断面 1 有所减小。跃后断面 2 的流速进一步减小,但底部流速仍比表面

流速为大。断面 2 下游的流速分布情况沿流改变(如断面 b)，直到水跃下游相当距离的断面 3，流速分布才与下游原河道的水流流速分布相一致。从总水头线的变化可见，从跃前断面 1 至断面 a ，总水头线急剧降落，从断面 a 至跃后断面 2，降落也很显著，说明水跃区中能量消耗较大。断面 2 至断面 3 的跃后段，总水头线缓缓降低，斜率较小，说明在此段能量消耗较小。

当工程中采用底流消能时，必须探讨水跃发生的位置并进行消能工的计算。

一、水跃发生的位置和水跃的形式

以图 11.4 所示的溢流坝为例。当水流沿坝面下泄时，由于势能不断转换为动能，愈往下则流速越大，到达坝趾某断面处，流速最大，水深最小，这个水深最小的断面称为收缩断面，该断面的水深称为收缩断面水深，以 h_{c0} 表示。收缩断面可视为渐变流断面，水流为急流。

从收缩断面的急流通过水跃过渡到下游缓流，其水跃发生的位置可以有图 11.4 所示的三种形式。图(a)，跃前断面发生在收缩断面处，称这种形式的水跃为临界水跃；图(b)，水跃发生在收缩断面的下游，远离收缩断面，称这种形式的水跃为远离水跃；图(c)，收缩断面被淹没，称这种形式的水跃为淹没水跃。

水跃发生的位置是要加以判别的。判别时，假设收缩断面的水深 h_{c0} 和下游水深 h_t 为已知。先假设水跃的跃前断面发生在收缩断面，则如图 11.4(a) 的所示，收缩断面水深 h_{c0} 等于跃前水深 h_1 ，为了区别于其它情况下的跃前水深，将这个水深写为 h_{c0_1} ，由水跃函数关系式，可求得一个相应于 h_{c0_1} 的跃后水深 h_{c0_2} 。因为下游河渠中的水深 h_t 就是发生水跃时的实际跃后水深，因此可用 h_t 值与所求得的 h_{c0_2} 值相比较来判别水跃发生的位置和水跃的类型。

1. 当 $h_t = h_{c0_2}$ [图 11.4(a)]，跃前断面恰好在收缩断面，称这种水跃为临界水跃。

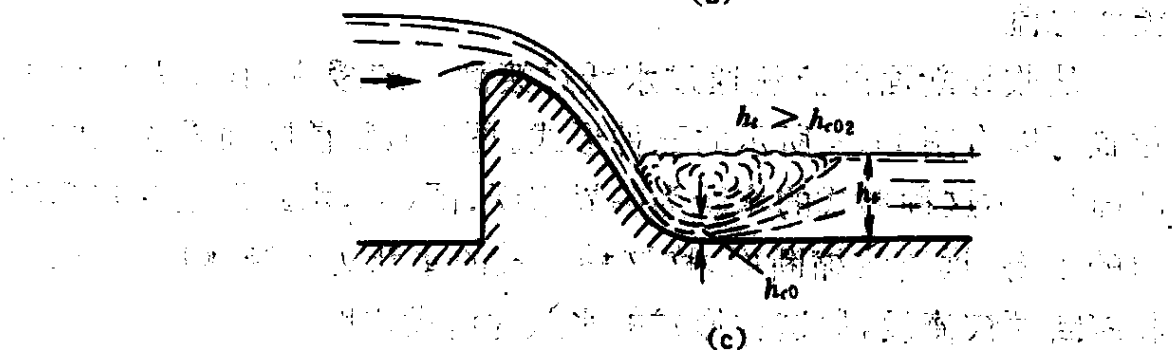
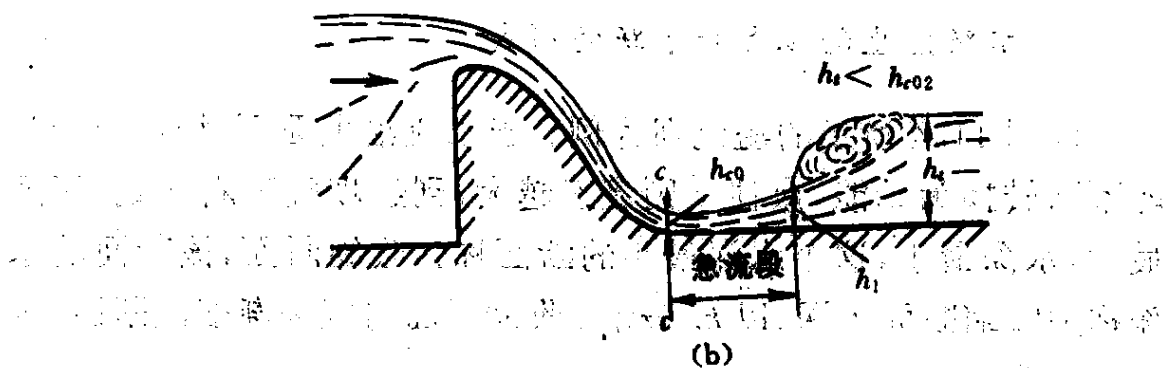
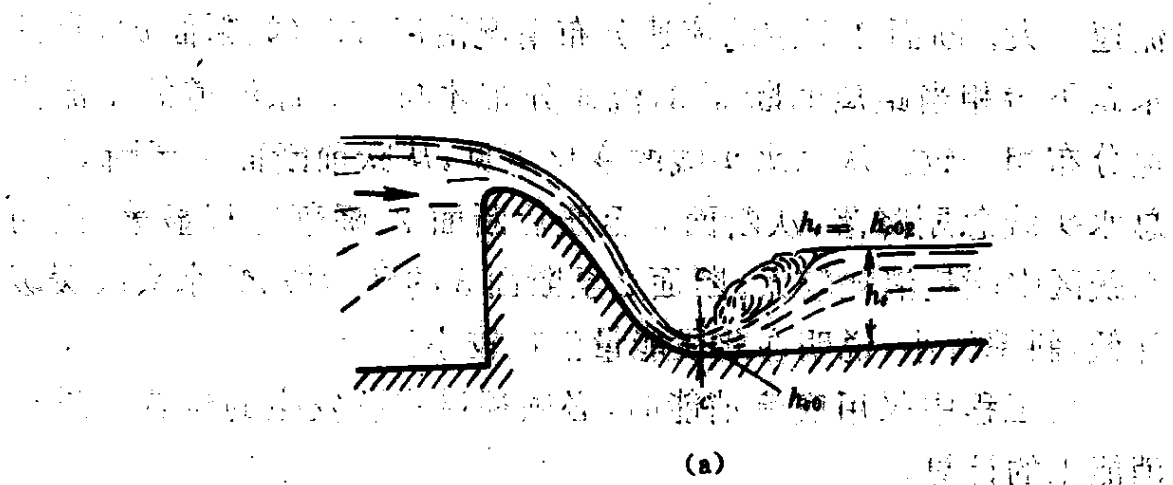


图 11.4

2. 当 $h_2 < h_{c02}$ [图 11.4(b)], 由共轭水深的关系可知, 较小的跃后水深对应较大的跃前水深, 因此水流从收缩断面起要经过一段急流后, 使水深由 h_{c0} 增至 h_1 (相应于下游水深 h_2 的跃前水深) 再发生水跃, 称这种水跃为远离水跃。

3. 当 $h_2 > h_{c02}$ [图 11.4(c)], 这个下游水深要求一个比 h_{c0} 更小的跃前水深 h_1 与之相对应。而收缩断面水深 h_{c0} 是建筑物下游的最小水深, 所以不可能再找到一个比 h_{c0} 更小的水深。若下游水深满

足上述关系时,水跃只能淹没收缩断面,形成淹没水跃。

以上三种形式的水跃虽然都能起到衔接和消能的作用,但由于远离水跃的跃前断面和建筑物之间有一急流段,流速较大,对河床有冲刷作用,如果采用这种方式消能,则必须对这段河床进行加固,工程量大,很不经济,所以工程中不采用远离水跃与下游水流衔接。淹没水跃衔接在淹没程度较大时,消能效率较低,也不经济。对于临界水跃,不论其发生位置或消能效果对工程都是有利的,但是这种水跃不稳定,如果下游水位稍有变动,即将转变为远离水跃或淹没水跃。因此,从水跃发生的位置、水跃的稳定性以及消能效果等方面综合考虑,采用淹没程度较小的淹没水跃进行衔接与消能较为适宜,因为这种水跃既能保证有一定的消能效果,又不致因下游水位的变动而转变为远离水跃。

水跃的淹没程度常用水跃淹没系数 $\sigma' = h_1/h_{c0}$ 来表示。显然,对于临界水跃, $\sigma' = 1$; 对于远离水跃, $\sigma' < 1$; 对于淹没水跃, $\sigma' > 1$ 。在进行泄水建筑物下游的消能设计时,一般要求

$$\sigma' = 1.05 \sim 1.1$$

从以上分析可知,要判别建筑物下游水跃发生的位置,即判别水跃的形式,必须已知收缩断面水深 h_{c0} 。下面介绍收缩断面水深的计算。

二、收缩断面水深的计算

仍以溢流坝为例,如图 11.5 所示。设流量为 Q ,行近流速为 v_0 ,坝上水头为 H ,下游坝高为 a_1 。以收缩断面最低点为基准面,对坝前断面 1 和收缩断面 c 列能量方程,则有

$$\begin{aligned} H + a_1 + \frac{\alpha v_0^2}{2g} &= h_{c0} + \frac{\alpha v_{c0}^2}{2g} + \zeta \frac{v_{c0}^2}{2g} \\ &= h_{c0} + (\alpha + \zeta) \frac{v_{c0}^2}{2g} \end{aligned}$$

令 $H + a_1 + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = T + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = T_0$, T 为有效水头, T_0 称为有效总

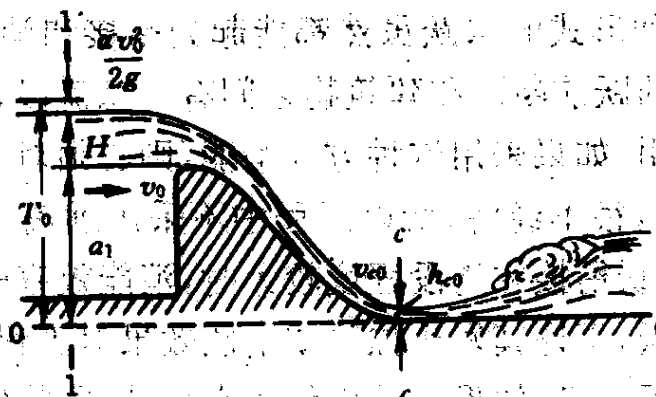


图 11.5

水头。则上式可写为

$$T_0 = h_{c0} + (\alpha + \zeta) \frac{v_{c0}^2}{2g}$$

再令 $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}}$, 则 $\alpha + \zeta = \frac{1}{\varphi^2}$, 代入上式得

$$T_0 = h_{c0} + \frac{v_{c0}^2}{2g\varphi^2}$$

式中 φ 为溢流坝的流速系数。

用 $v_{c0} = \frac{Q}{A_{c0}}$ (A_{c0} 为收缩断面面积) 代入上式, 得

$$T_0 = h_{c0} + \frac{Q^2}{2g\varphi^2 A_{c0}^2} \quad (11.1)$$

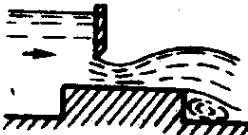
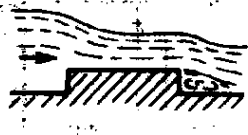
对于矩形断面河渠, $Q = qb$, $A_{c0} = h_{c0}b$, b 为河渠底宽, 则得

$$T_0 = h_{c0} + \frac{q^2}{2g\varphi^2 h_{c0}^2} \quad (11.2)$$

以上诸式中, q, a_1, v_0, T_0 是已知的。坝的流速系数 φ 的影响因素比较复杂, 它与进口形式、坝面粗糙程度、坝高、坝上水头等有关, 其值一般由经验确定, 可参照表 11.1 选取。

表 11.1

泄水建筑物的流速系数 φ 值

建筑物泄水方式	图 式	φ
溢流面光滑的曲线型 实用堰上自由出流 1. 溢流面长度较短 2. 长度中等 3. 长度较长		1.00 0.95 0.90
折线型实用堰上自由出流		0.80—0.90
宽顶堰上自由孔流		0.85—0.95
实用堰上自由孔流		0.85—0.95
宽顶堰上自由出流		0.85—0.95
平底闸上自由孔流		0.95—1.00

式(11.1)和(11.2)为收缩断面水深 h_{c0} 的三次方程,一般用试算法求解。对矩形断面河渠, h_{c0} 亦可用图解法求解。

1. 试算法

已知 T_0 , Q 及河渠断面形状,在选定 φ 值后,可假定一个 h_{c0} 值,求得 A_{c0} ,则由式(11.1)右端可以算得某一数值,若恰好等于已知的 T_0 值,则所设的 h_{c0} 即为所求。如不等,再假定 h_{c0} 值进行试算,直至相等为止。但要注意,式(11.1)为一个三次方程,可以有三个根,而符合实际情况的是小于 h_c 的那一个 h_{c0} 值,所以试算时可只在小于 h_c 的数值中取假定值。

2. 图解法

对于矩形断面明渠的 h_{c0} 值可用附录图解 5 (矩形断面明渠底流消能水力计算求解图*) 求解。

如已知 φ 和 T_0/h_c , 可以应用图解 5 求得 h_{c0}/h_c , 则 $h_{c0} = \frac{h_{c0}}{h_c} h_c$ 。

例 11.1 某水库溢洪道进口为曲线型实用堰(图 11.6)。溢流长度中等, 堰顶高程为 112.5 m, 溢洪道宽度 $B=18$ m, 下游渠底高程为 107.5 m。当溢洪道渲泄流量 $Q=250\text{m}^3/\text{s}$ 时, 相应的上游水位为 117.72 m, 下游水位为 112.2 m, 行近流速 $v_0=1.36\text{m/s}$ 。试求收缩断面水深, 并判别下游发生何种形式的水跃。

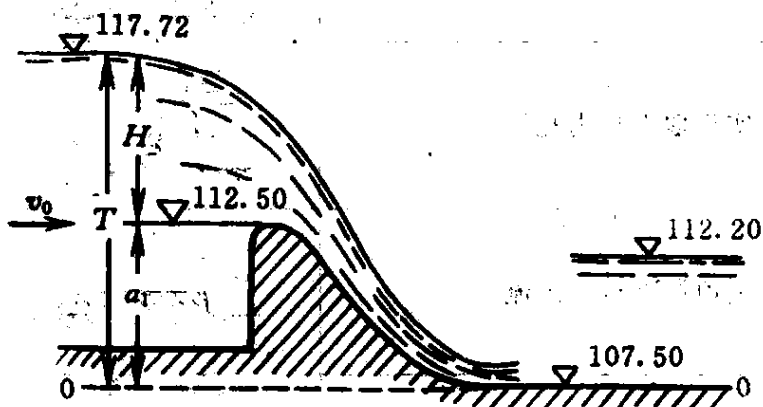


图 11.6

解: 1. 求 h_{c0}

单宽流量 $q = \frac{Q}{B} = \frac{250}{18} = 13.9\text{m}^3/\text{s}$

下游堰高 $a_1 = 112.5 - 107.5 = 5\text{m}$

堰上水头 $H = 117.72 - 112.50 = 5.22\text{m}$

$T = H + a_1 = 5.22 + 5 = 10.22\text{m}$

行近流速 $v_0 = 1.36\text{m/s}$

上游有效总水头

$$T_0 = T + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = 10.22 + \frac{1.0 \times 1.36^2}{2 \times 9.8} = 10.31\text{m}$$

* 本图解系由河北农业大学绘制