

高等学校教学参考书

水力学

下 册

华东水利学院水力学教研室

黄文煌 主编

人民教育出版社



本书是高等工业院校水利类各专业水力学课程教学参考书,根据专业要求对书中内容作适当取舍后,亦可作为教材使用。

本书共十五章,分上下两册出版。上册内容为:绪论、水静力学、液体恒定总流的基本理论、液体恒定三元运动基本原理、水头损失、管流、河渠水流、孔口与闸孔出流以及堰流等共九章。下册内容为:水工建筑物上下游水流衔接和消能、隧洞水流、水工建筑物的高速水流、河渠挟沙水流理论基础、渗流以及波浪理论基础等共六章。

高等学校教学参考书

水力学

下 册

华东水利学院水力学教研室

黄文鑑 主编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 10,125 插页 1 字数 240,000

1981年5月第1版 1981年11月第1次印刷

印数00,001—4,500

书号 15012·0322 定价 1.05 元

目 录

第十章 泄水建筑物下游水流衔接与消能

§ 10-1 概述	1
§ 10-2 一般消能原理及泄水建筑物下游水流衔接与消能方式	3
§ 10-3 底流式衔接与消能	6
§ 10-4 挑流衔接与消能	23
§ 10-5 面流衔接与消能	27
§ 10-6 消力戽消能简介	30
§ 10-7 跌水与陡槽的水力计算	32
习题	47

第十一章 隧洞水流

§ 11-1 概述	48
§ 11-2 隧洞水流状态的判别	50
§ 11-3 有压隧洞水流	52
§ 11-4 无压隧洞水流	68
§ 11-5 半有压隧洞水流	83
§ 11-6 隧洞出口水流的消能	89
§ 11-7 有压隧洞非恒定流	101
习题	104

第十二章 水工建筑物的高速水流

§ 12-1 概述	106
§ 12-2 水流脉动压力及建筑物的振动	106
§ 12-3 水工建筑物水流的气穴与气蚀	115
§ 12-4 明渠高速水流掺气	121

§ 12-5 明渠急流的冲击波及滚波·····	128
习题·····	138

第十三章 河渠挟沙水流理论基础

§ 13-1 概述·····	139
§ 13-2 泥沙的特性·····	139
§ 13-3 泥沙的沉降速度(水力粗度)·····	142
§ 13-4 河渠水流中泥沙运动的形式·····	144
§ 13-5 推移质运动·····	145
§ 13-6 悬移质运动·····	153
§ 13-7 泥沙异重流简介·····	157
习题·····	159

第十四章 渗 流

§ 14-1 概述·····	160
§ 14-2 渗流速度·····	162
§ 14-3 达西试验·····	163
§ 14-4 恒定无压均匀渗流和渐变非均匀渗流·····	167
§ 14-5 河间地区有地面水下渗的渗流·····	173
§ 14-6 水平不透水层顶面上梯形断面土坝渗流·····	177
§ 14-7 井的渗流·····	190
§ 14-8 井群的渗流·····	195
§ 14-9 用复变函数解平面渗流问题·····	200
§ 14-10 用保角变换解平面渗流问题·····	201
§ 14-11 渗流流网的绘制·····	219
§ 14-12 用流网解平面渗流问题·····	225
§ 14-13 用分段法解平面渗流问题·····	231
§ 14-14 成层土壤恒定渗流·····	237
§ 14-15 非恒定渗流·····	239
§ 14-16 用有限单元法解渗流问题简介·····	242
习题·····	251

第十五章 波浪理论基础

§ 15-1	概述	255
§ 15-2	风成波的发生、发展和消失以及临近岸滩的变化	258
§ 15-3	拉格朗日连续性方程和运动方程	261
§ 15-4	有限振幅的深水推进波	266
§ 15-5	有限振幅的浅水推进波	278
§ 15-6	有限振幅的深水立波	287
§ 15-7	有限振幅的浅水立波	294
§ 15-8	有限振幅的深水立波和浅水立波 最大波浪附加总压力的计算式和图解曲线	307
习题		318

第十章 泄水建筑物下游水流 衔接与消能

§ 10-1 概 述

在河道上建造挡水建筑物后,抬高了上游河道的水位,当水流经泄水建筑物泄到下游时,便具有较高的流速。从泄水建筑物的经济造价和工程布置要求来说,往往要求尽可能缩短泄流宽度,但这样就造成下泄流量集中,单宽流量加大,以致经泄水建筑物下泄的水流具有更高的流速,大大地超过下游河道所能承受的不冲流速,引起下游河道的冲刷。故必须采取消能防冲的措施,使得高速集中的水流与下游河道的正常水流衔接起来。这就是本章所要讨论的泄水建筑物下游水流衔接和消能的问题。这些问题如不妥善处理,将会引起下述一些不良后果:

(一) 引起河床严重冲刷 如图 10-1 所示,水流自坝顶下泄

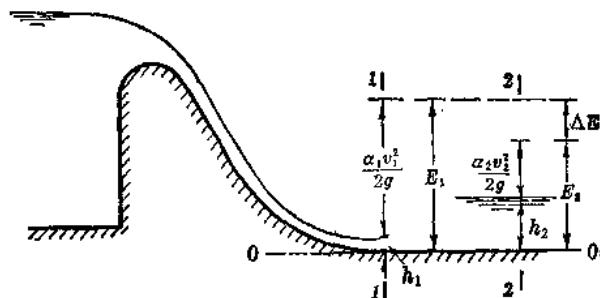


图 10-1

至坝趾断面所具有的比能为 E_1 , 下游河道正常水流所具有的比能为 E_2 , 两种水流比能差 $\Delta E = E_1 - E_2$ 常常很大, 如果下游河床不

加保护,必然引起冲刷,形成冲坑,威胁建筑物的安全。例如奥地利的 Lebring 坝,上下游水位落差为 11.35 米,砂卵石河床,冲刷坑的深度达到 12 米,可见冲刷之严重性。因此,在设计水工建筑物时,要选择合理的水流衔接形式,采取必要的工程措施,将泄水建筑物下泄水流的部分动能加以消除和转变为势能,即所谓消能问题,以改善水流状态,保证建筑物的安全。由上述可知,泄水建筑物下游水流衔接与消能有密切的联系,研究时应一起考虑。

(二) 发生折冲水流 经水工建筑物下泄的水流对其下游河渠中心线不对称时,或河槽的下游水面宽度 B 比溢流宽度 b 大得多时,以及多闸孔的闸门启闭程序不当时,经水工建筑物下泄的水流会向一边偏折,使另一边形成巨大回流,这种现象称为折冲水流。如图 10-2 所示的为某水力枢纽平面布置图,由溢流坝下泄的水流(为主流)速度比较大,即动能较大,势能较小,所以水位较低,

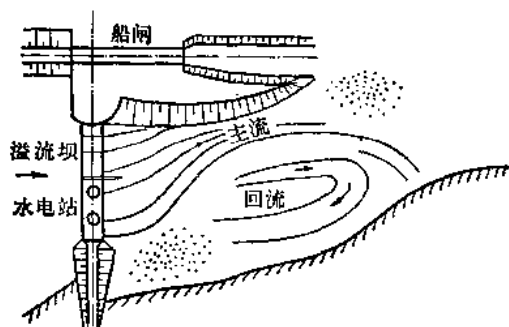


图 10-2

而由水电站泄出的水流速度较小(非主流),水位较高,这样便造成横向水位差,以致水电站泄出的水流挤压溢流坝泄出的水流,而使主流偏折,形成折冲水流。折冲水流对工程不利,如图 10-2 所示,由于主流偏向左岸,右岸就造成巨大的回流区,而靠近左岸的主流过水断面减小,流速加大,导致对河床及岸壁的冲刷。如在枢纽中

设有船闸,则折冲水流对船闸的下游会造成不利的航行条件。而回流往往把主流冲刷的泥沙带到水电站下游形成淤积,影响水电站发电。因此,在水利工程的设计时必须注意避免出现折冲水流。关于折冲水流问题将由专业课讨论。

这样看来,水流衔接和消能的任务是用最有效的措施将集中下泄水流的部分动能消除,以改善水流在水平面上及过水断面上的流态,减少水流对河床及两岸的冲刷,以保证建筑物的安全。

§ 10-2 一般消能原理及泄水建筑物下游水流衔接与消能方式

水利工程上为了避免水流对河道的冲刷,必须采取一些减小泄水建筑物下泄水流动能的措施,以满足工程的经济与安全的要求。减小下泄水流的动能,从水力学角度来看主要是增加下游水深,使动能转变为势能,以减少水流对河床的冲刷;或增加下游水流紊动程度,使动能转变为热能消散掉;此外,还可以利用挑流水股与空气的摩擦以及水流掺气等来消能。

利用上述原理设计的水流衔接和消能主要方式一般有下列二类:

(一) 利用固体边界将水股分散,增加水流紊动程度,达到消能目的。常用的方式有:

(1) 挑流消能 在溢流建筑物的末端设置比下游水位高的挑流坎,利用高速水股下泄的动能,把水股抛向空中,再投入下游河道。水股与空气的摩擦、水流掺气以及水股射进下游河道时形成冲坑产生漩滚,均可消减能量,如图 10-3 所示。

(2) 面流消能 在溢流建筑物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,将高流速的水流引向下游水流的表层,在河床与表层高流速水流间形成漩滚区,以消减能量,如图

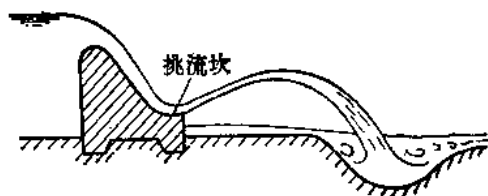


图 10-3

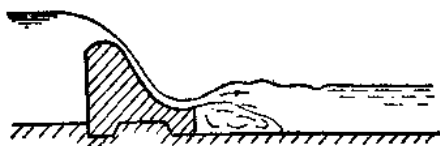


图 10-4

10-4所示。

(3) 消力戽消能 在建筑物末端设置一个大反弧的低鼻坎, 下游水位比鼻坎高, 鼻坎把高流速的水流挑离河床, 在反弧及坎下分别形成两个或三个大漩涡, 以达到消能目的, 如图 10-5 所示。

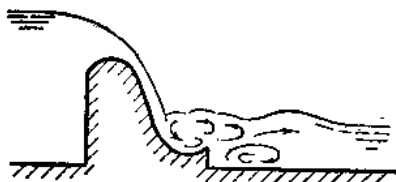


图 10-5

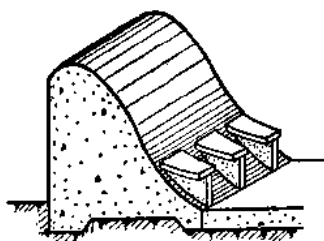


图 10-6

在水利工程上常在面流、挑流及消力戽中设置差动式的齿坎, 如图 10-6 所示, 其目的是为了更好地把水流分散, 增加消能效果。

(二) 下泄水流通过水跃与下游水流衔接, 利用水跃消能。由第七章已知, 水跃分为主流区和漩滚区两部分, 水流能量主要在主流区与漩滚区的接触地带消失, 因为该处的紊动附加切应力很大, 一般在该处可以消耗总能量的 40%~67%。由于水跃中的高速水

流靠近河渠底部，因此将利用水跃进行水流衔接和消能的方式称为底流式的水面衔接与消能。从工程的经济和安全要求出发，希望在泄流建筑物下游河道中产生淹没式水跃。产生淹没式水跃要求水工建筑物下游要有足够的水深，而要增加下游水深就需要修建一些辅助建筑物，常用的有以下几种：

(1) 消力池 在靠近建筑物下游降低河床高程，形成水池，增加水深，如图 10-7 所示，这种池称为消力池。

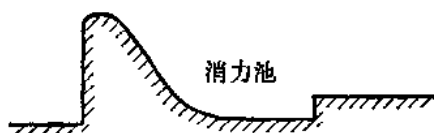


图 10-7

(2) 消力墙 在靠近建筑物下游河床上修筑挡水墙，抬高建筑物与挡水墙间水位，增加水深，如图 10-8 所示，这种挡水墙称为消力墙。



图 10-8

(3) 综合式消力池 当地质或施工条件受到限制，单做消力池或消力墙不适合时，可以把池和墙结合起来做成综合式消力池，以增加下游水深，如图 10-9 所示。使水流在池中发生淹没式水跃

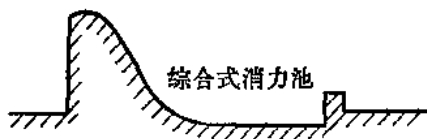


图 10-9

进行消能。这样的水池称为综合式消力池。

为了改善消力池中的水流, 增加消能效果, 还可在池中设计一些辅助的消能工, 如消力墩等, 如图 10-10 所示。消力墩在平面上交错排列, 由于消力墩的阻碍, 使水流在平面和立面上被分散, 流过墩顶及侧壁时, 水股发生脱离现象, 从而产生更多的漩滚, 以增加消能效果。

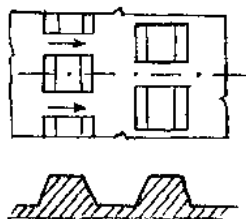


图 10-10

美国垦务局(Bureau Reclamation)通过一系列的试验, 提出五种设有辅助消能工的消力池形式, 并提供了确定池深、池长及辅助消能工尺寸的图表公式等, 读者可参阅有关书籍和文献^①。

§ 10-3 底流式衔接与消能

(一) 底流式衔接的主要形式

当水流经泄水建筑物(如闸、坝等)下泄时, 势能逐渐减小, 动能逐渐增加, 在建筑物下游某过水断面上水深达到最小值, 平均流速达到最大值, 这个断面称为收缩断面, 该断面的水深用 h_c 表示, 因下泄水流速度较大, 所以收缩断面水深 h_c 常小于临界水深 h_K , 水流属于急流状态, 如建筑物下游水深 t 也小于 h_K , 水流为急流, 则在这种情况下水流为从急流到急流的水面衔接, 可按第七章河渠非均匀流水面线进行分析研究。一般情况下, 下游水深 t 常大于临界水深 h_K , 水流为缓流, 则下泄水流与下游水流为由急流到缓流的水面衔接, 必然有水跃发生, 按水跃发生的位置, 将底流式水面衔接分为三种情况。

^① Ven Te Chow: «Open-Channel Hydraulics», 1959.

J. N. Bradley and A. J. Peterka: «The Hydraulic Design of Stilling Basins», Proceedings, American Society of Civil Engineers, Journal, Hydraulics Division, Vol. 83 no Hy5 Oct. 1957.

(1) 当 $h_c'' = t$ 时, 水跃在收缩断面处发生, 这种衔接称为临界式水跃衔接, 如图 10-11 所示。这时 h_c 为第一共轭水深, 即 $h_c = h_c'$, 第二共轭水深 $h_c'' = t$ 。

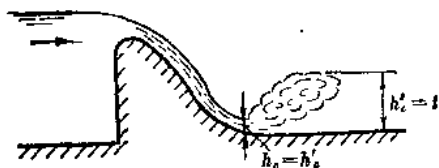


图 10-11

(2) 当 $h_c'' > t$ 时, 急流向下游流动一段距离, 由于水流摩擦阻力消耗部分动能, 流速渐减, 水深渐增, 从而与下游水深衔接起来, 即水历经 c 型水面曲线的流段之后发生水跃, 水跃后的水深 h'' 和下游水深恰好相等, 这种衔接称为远离式水跃衔接, 如图 10-12 所示。这时若以 h_c 为第一共轭水深 ($h_c = h_c'$), 则计算出的第二共轭水深 $h_c'' > t$ 。

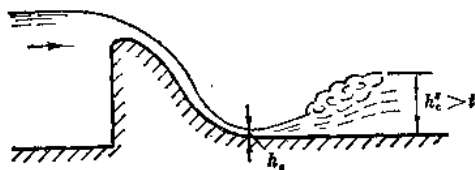


图 10-12

(3) 当 $h_c'' < t$ 时, 由于下游水深大于 h_c'' , 水跃将被推向上游, 并淹没收缩断面, 这种衔接称为淹没式水跃衔接, 如图 10-13 所

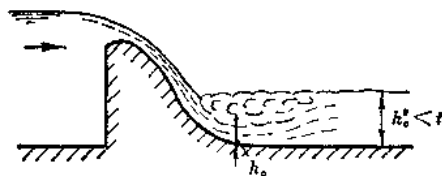


图 10-13

示。这时以 h_c 为第一共轭水深 ($h_c = h'_c$)，则计算出的第二共轭水深 $h''_c < t$ 。

关于这三种衔接形式，远离式水跃对工程最为不利，因为有一段处于急流状态的 c 型水面线，流速较大，这段河床需要加固，要增加工程费用，所以在设计水工建筑物时常设法避免。对临界式水跃衔接，如其下游水深稍有减小，则立即发生远离式水跃衔接，发生水跃的位置不稳定。因此设计水工建筑物时常设法达到淹没式水跃衔接。

(二) 底流式水跃衔接的水力计算

由上可知，判定泄水建筑物下游水流衔接形式，是以收缩断面水深为第一共轭水深 $h_c = h'_c$ 求第二共轭水深 h''_c 与下游水深 t 相比较而定的，故问题归结为如何确定 h_c 。

水流经泄水建筑物流至下游断面 $c-c$ 断面处，形成收缩断面，如图 10-14 所示。对断面 0 和断面 c 写能量方程，得

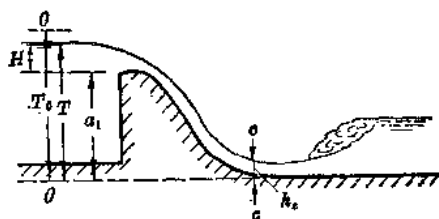


图 10-14

$$a_1 + H + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = h_c + \frac{\alpha v_c^2}{2g} + h_w,$$

即
$$T_0 = h_c + \frac{\alpha v_c^2}{2g} + h_w,$$

式中 $T_0 = a_1 + H + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = T + \frac{\alpha v_0^2}{2g}$ ，为以收缩断面底部为基准面的建筑物上游断面水流的总比能。 $h_w = \xi \frac{v_c^2}{2g}$ 为断面 0 至断面 c 之间

的水头损失, 今 $v_c = \frac{Q}{\omega_c}$, ω_c 为收缩断面积, 则

$$T_0 = h_c + (\alpha + \xi) \frac{Q^2}{2g\omega_c^3}$$

令 $\frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}} = \varphi$, φ 称为流速系数, 则上式可写为

$$T_0 = h_c + \frac{Q^2}{2g\varphi^2\omega_c^3} \quad (10-1)$$

对于矩形断面河渠, $Q = qb$, $\omega_c = h_c b$, 则得

$$T_0 = h_c + \frac{q^2}{2g\varphi^2 h_c^2} \quad (10-2)$$

影响流速系数 φ 值的因素比较复杂。对于溢流坝 φ 值与坝面粗糙度、坝高、坝上水头等有关; 对于闸孔出流, φ 值与闸门和底板的形式等有关。 φ 值可由试验确定, 亦可参照表 10-1 选取。

对于曲线型实用堰流速系数 φ 亦可按下列经验公式确定:

$$\varphi = 1 - 0.0155 \frac{\alpha_1}{H} \quad (10-3)$$

上式中 α_1 为从收缩断面底部算起的坝高, 以米计; H 为坝上水头, 以米计。上式适用于 $\frac{\alpha_1}{H} < 30$, 且坝面水流无显著掺气的情况。

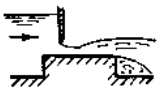
由于式(10-1)和(10-2)为未知数 h_c 的三次方程式, 因此求 h_c 时, 一般需要用试算法求解, 亦可用图解法求解。

1. 试算法

已知 T_0 、 Q 及河渠断面形式, 在选定 φ 值后, 可假定一个 h_c 值, 求得 ω_c , 则由式(10-1)右边可以算得某一数值, 如恰好等于已知的 T_0 值, 则所设的 h_c 即为所求。如不相等, 则再假定 h_c 值进行试算, 直至相等或相接近为止。但要注意, 式(10-1)为三次方程,

① 陈椿庭:《关于溢流坝的空穴数和坝面不平整度控制》, 水利学报, 1962 年, 第 4 期。

表 10-1 流速系数 φ 值表

建筑物泄水方式	图 式	φ
曲线型实用堰, 溢流面为光滑的 } 1. 溢流面长度较短 曲线, 自由出流 } 2. 溢流面长度中等 3. 溢流面长度较长		1.0 0.95 0.90
折线型实用堰自由出流		0.80~0.90
宽顶堰自由出流		0.85~0.95
实用堰上有平板闸门, 闸孔自由出流		0.85~0.95
宽顶堰上有平板闸门, 闸孔自由出流		0.85~0.95
平底上有平板闸门, 闸孔自由出流		0.95~1.00
跌 水		当 $a_1=5$ 米时 0.85~0.86 当 $a_1=3$ 米时 0.88~0.91 当 $a_1=1$ 米时 0.95~0.97

可以有三个根, 我们需要的只是小于 h_K 的那一个 h_c 值, 所以试算时, 可只在小于 h_K 的数值中取假定的 h_c 值。

2. 图解法

梯形断面的 h_c 值, 可先算出 $\frac{\sqrt{\alpha} Q}{\varphi T_0^{1.5} b}$ 及 $\frac{m T_0}{b}$ 的数值后, 可由附

录图解 I 中查得 $\frac{h_c}{T_0}$ 值, 从而可得 $h_c = \left(\frac{h_c}{T_0}\right) T_0$ 。

矩形断面的 h_c 值, 由 $\xi_0 = \frac{T_0}{h_K}$ 及 φ 查本书上册附录二图解 III, 可得 ξ_c , 从而可得

$$h_c = \xi_c h_K.$$

例 10-1 某设有平板闸门的平底水闸下游为梯形断面渠道, 流经水闸的流量 $Q=95$ 米³/秒, $\varphi=0.95$, 上游水深 $H=5.4$ 米, 下游水深 $t=3.0$ 米, 底宽 $b=12$ 米, 边坡系数 $m=2.0$, 不计来水流速, 试求 h_c , 并判明下游水面衔接形式。

解 用附录图解 I 求 h_c 值。 $T_0 = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = 5.4 + 0 = 5.4$ 米, 取 $\alpha=1.1$, 则

$$\frac{\sqrt{\alpha} Q}{\varphi T_0^{1.5} b} = \frac{\sqrt{1.1} \times 95}{0.95 \times 5.4^{1.5} \times 12} = 0.7,$$

$$\frac{m T_0}{b} = \frac{2.0 \times 5.4}{12} = 0.9,$$

由 $\frac{\sqrt{\alpha} Q}{\varphi T_0^{1.5} b} = 0.7$ 及 $\frac{m T_0}{b} = 0.9$ 值查附录图解 I 得

$$\frac{h_c}{T_0} = 0.15,$$

故 $h_c = 0.15 \times 5.4 = 0.81$ 米,

用上册附录(二)图解 IV 求 h_c^* 。由 $q = \frac{Q}{b} = \frac{95}{12} = 7.92$ 米²/秒, 计算 $q^{2/3}$
 $= 7.92^{2/3} = 3.97,$

$$\frac{h_c'}{q^{2/3}} = \frac{h_c}{q^{2/3}} = \frac{0.81}{3.97} = 0.204,$$

$$N = \frac{m q^{2/3}}{b} = \frac{2.0 \times 3.97}{12} = 0.66,$$

由 $\frac{h_c'}{q^{2/3}} = 0.204$ 和 $N = \frac{m q^{2/3}}{b} = 0.66$ 查上册图解 IV 得 $\frac{h_c^*}{q^{2/3}} = 0.75$, 则

$$h_c^* = 0.75 \times q^{2/3} = 0.75 \times 3.97 = 2.93 \text{ 米}.$$

因 $h_c^* = 2.93 < t = 3.0$ 米, 故下游水流衔接为淹没式水跃。

例 10-2 在某河道上修建滚水坝一座, 坝高 $a_1=5$ 米, 流量系数 $m=$

0.45, 通过的流量 $Q=500$ 米³/秒, 溢流面宽度 $b=80$ 米。 $\alpha=1.1$, 下游河道断面为矩形且与溢流坝等宽, 下游水深 $t=2.5$ 米, 试求收缩断面水深 h_c , 并判别下游水面衔接形式。

解

(1) 按堰流公式求 H_0 。

$$H_0 = \left(\frac{Q}{mb\sqrt{2g}} \right)^{2/3} = \left(\frac{500}{0.45 \times 80 \times \sqrt{2 \times 9.8}} \right)^{2/3} = 2.14 \text{ 米。}$$

故 $T_0 = a_1 + H_0 = 5.0 + 2.14 = 7.14$ 米。

(2) 求 h_c 及 h_K' 。

用上册附录图解 II 求 h_c ,

$$q = \frac{500}{80} = 6.25 \text{ 米}^2/\text{秒},$$

$$h_K = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{1.1 \times 6.25^2}{9.81}} = 1.63 \text{ 米},$$

$$\xi_0 = \frac{T_0}{h_K} = \frac{7.14}{1.63} = 4.38,$$

根据溢流坝面较长的情况查表 10-1, 取 $\varphi=0.90$, 由 φ 及 ξ_0 查附录图解 II, 可得 $\xi_c=0.391$, 因 $h_c' = h_c$, 故 $\xi_c' = \xi_c = 0.396$ 。由图中查得 $\xi_c'' = 2.05$ 。

故 $h_c'' = \xi_c'' \times h_K = 2.05 \times 1.63 = 3.34 \text{ 米} > t = 2.5 \text{ 米}$

(3) 因 $h_c'' > t$, 故下游出现远离式水跃衔接。

(三) 底流消能的水力计算

(1) 消力池深度 d 的计算

这里仅限于讨论整个消力池从进口到出口是等宽的矩形断面的情况。消力池中的水流现象如图 10-15 所示。消力池深为 d , 水

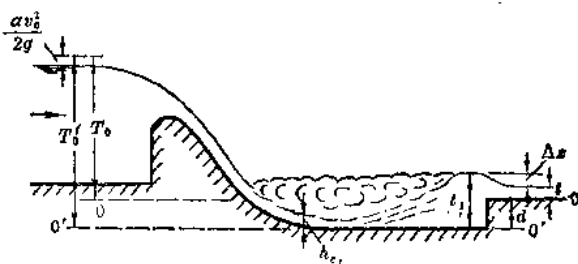


图 10-15