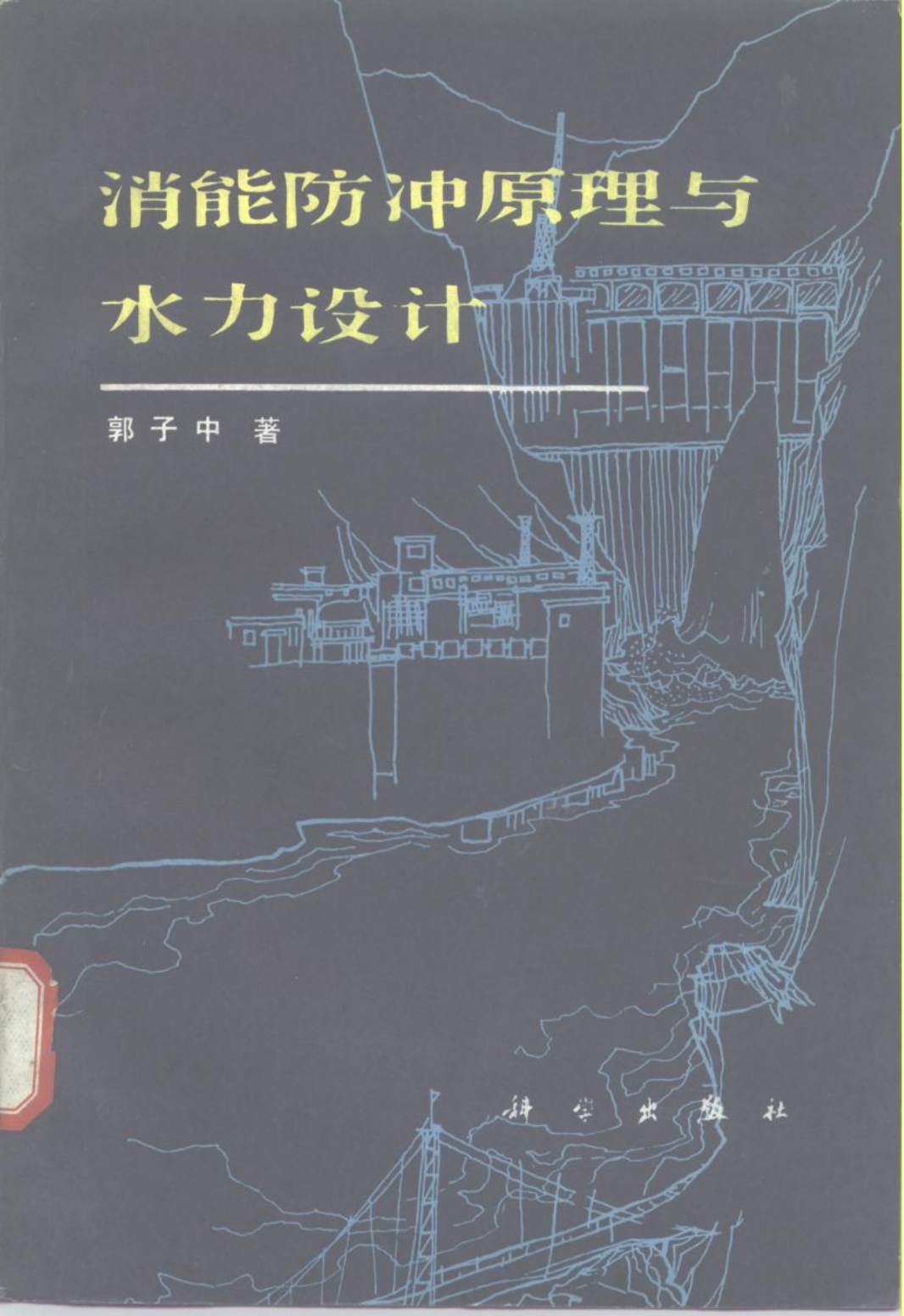


# 消能防冲原理与 水力设计



郭子中 著

科学出版社

275  
3

# 消能防冲原理与水力设计

郭子中 著

科 学 出 版 社

1 9 8 2

DUE 9-2

## 内 容 简 介

本书内容为作者对消能防冲问题调查研究与试验的结果。书中总结了各种水力现象后,首次提出了混合流概念,并用以解释和计算消能防冲工程中可能发生的各种水力问题。本书可供有关工程设计与科研人员参考。

## 消能防冲原理与水力设计

郭子中 著

责任编辑 陈大宁、张鸿林

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1982年3月第一版 开本:850×1168 1/32

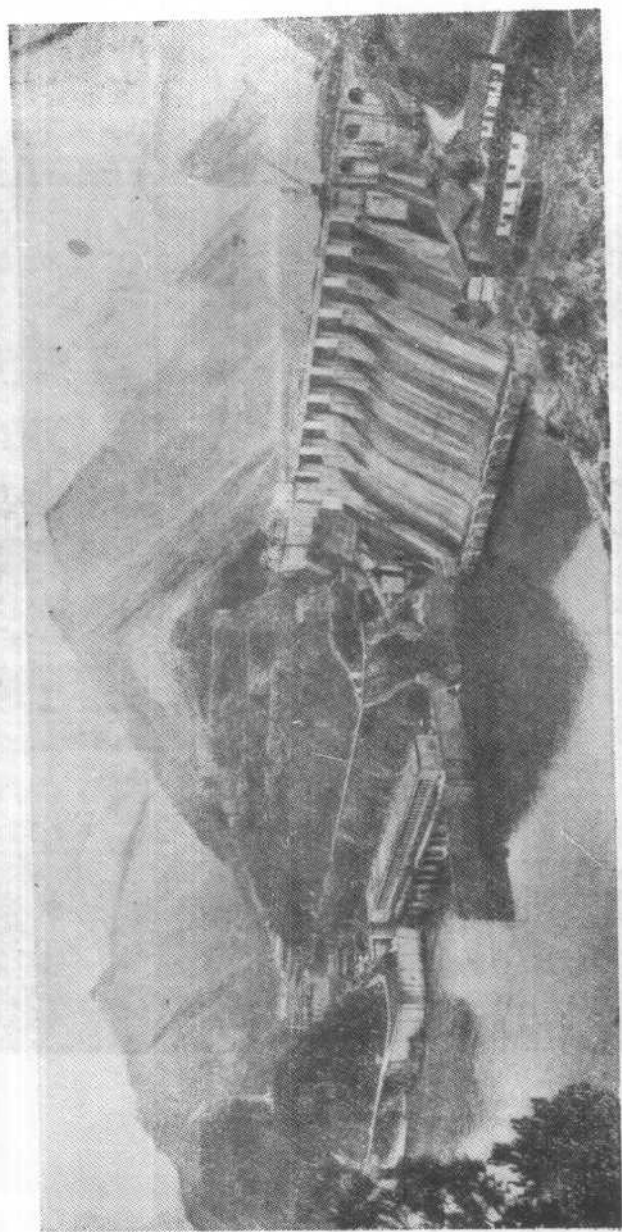
1982年3月第一次印刷 印张:14

印数:0001—2,720 字数:365,000

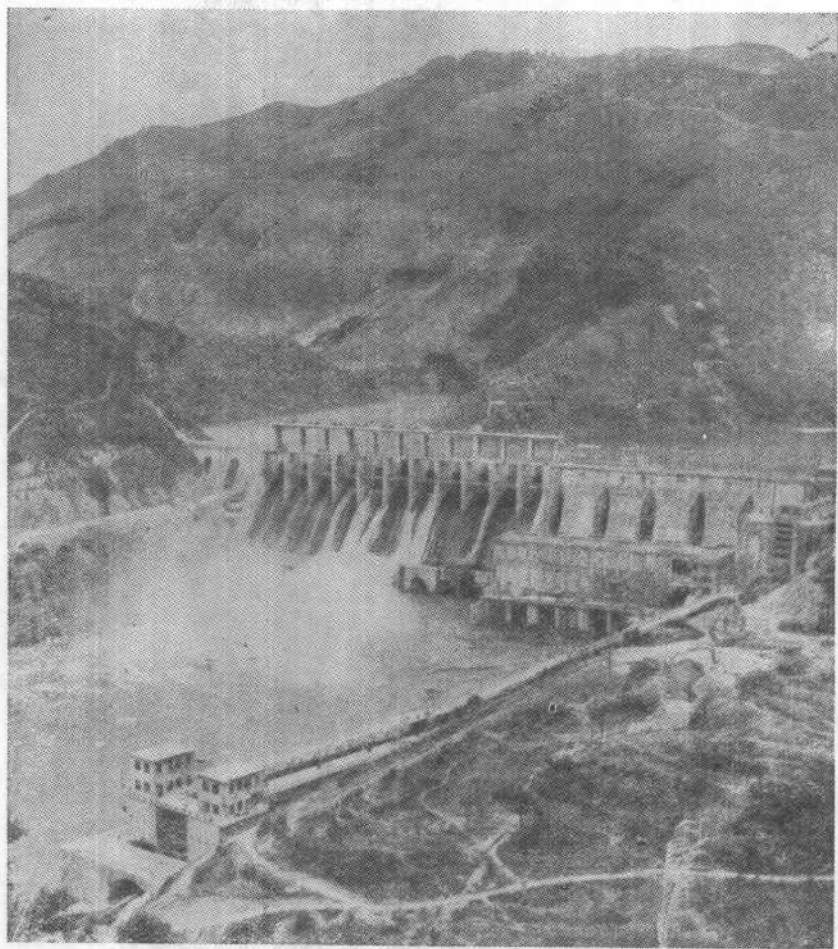
统一书号:13031·1854

本社书号:2519·13—2

定价:2.60元



图片一 柘溪大头坝全景



图片二 双牌大头坝全景

## 序 言

本书叙述了作者对消能防冲多年调查研究与试验的结果。部分调查工作是作者在参加修订水电部《重力坝设计规范》时完成的,调查过程中曾得到华东勘测设计院蒋毓龙主任工程师的大力协助。当作者总结了各种局部水力现象后开始提出混合流这一新概念时,得到了华东水利学院各级组织的鼓励和基层的水力学教研室,特别是室主任陈玉璞等同志的大力支持,为验证混合流理论的系统试验提供了必不可少的人力物力支援,使混合流这一理论得以初具规模,并从而能够解释和计算消能防冲工程中可能发生的各种水力问题。在此基础上,于1978年草成此书初稿。更承北京水电科学研究院副院长陈椿庭同志及该院水力学研究所所长兼清华大学水利系教授林秉南同志悉心审阅,提出宝贵的意见,经修改后定稿。为此,特别对促成此书出版的各单位,以及以上所提各同志表示衷心的感谢。以混合流这一新的概念贯穿全书,这样处理难免有不当之处;此外,消能防冲又是水利水电工程上一个重要的水力学专题,为科研、教学、设计、施工、运行管理等各方面所重视,国内外每年虽有本专题的大量论文发表,但专著成书的尚不多见,在国内更是如此,因无先例可循,本书在内容和章节安排上必有不少欠妥之处,为此希广大读者提供宝贵意见。

郭 子 中

1979年10月于南京华东水利学院

# 主要符号

|                |                                       |                 |                              |
|----------------|---------------------------------------|-----------------|------------------------------|
| $a$            | 坎高                                    | $L_j$           | 河床上作用挑距                      |
| $A$            | 面积                                    | $L_0$           | 水面挑距                         |
| $B, b$         | 宽度                                    | $L_d$           | 冲坑处作用挑距                      |
| $c$            | 离心力改正系数                               | $m$             | 边坡系数, 流量系数                   |
| $c_{p, \max}$  | 最大离心力系数                               | $P, P_s$        | 压力、静水压力强度                    |
| $C_d, C'_d$    | 阻力系数                                  | $P_c$           | 离心压力强度                       |
| $d$            | 冲坑深, 直径                               | $P_i$           | 压力改正系数                       |
| $e$            | 墩坎或堆丘高                                | $P_1$           | 底流压力改正系数                     |
| $E$            | 能量                                    | $P_2$           | 底射混合流压力改正系数                  |
| $E_R$          | 消能率                                   | $P_A$           | 附着混合流压力改正系数                  |
| $F, \Sigma F$  | 外力或外力和                                | $P_B$           | 面流压力改正系数                     |
| $Fr$           | 弗汝德数 $= \sqrt{\frac{v_1}{g h_1}}$     | $P_C$           | 淹没混合流压力改正系数                  |
| $F_s$          | 流动参数 $= q / \sqrt{g} \text{ s}^{1/2}$ | $P_D$           | 回复淹没底射混合流压力改正系数              |
| $g$            | 重力加速度                                 | $P_W$           | 波流压力改正系数                     |
| $h_1, h_2$     | 跃前后水深                                 | $Q, q$          | 总流量, 单宽流量                    |
| $h_a$          | 水跃高度 $= h_2 - h_1$                    | $R$             | 反弧半径                         |
| $h_k$          | 临界水深                                  | $S, S_0$        | 护坦或鼻坎上水头                     |
| $h_c$          | 收缩断面水深                                | $T, T_0$        | 总水头 ( $T_0$ 包括行近流速水头)        |
| $H, H_0$       | 堰顶水头                                  | $T_d$           | 冲坑水垫深                        |
| $h_b$          | 坎上流速水头 $= \frac{v_1^2}{2g}$           | $t, t_i$        | 混合流各种尾水深                     |
| $h_r$          | 岸内旋滚水深                                | $t_2$           | 临界底混流界限水深                    |
| $h_s$          | 岸外涌浪水深                                | $\xi$           | 混合比 $= a/h_1$                |
| $h_w$          | 总水头损失                                 | $\varphi$       | 流速系数                         |
| $h_j$          | 局部水头损失                                | $t_A$           | 临界附混流界限水深                    |
| $i$            | 底坡                                    | $t_B$           | 面流界限水深                       |
| $i_k$          | 临界坡度                                  | $t_C$           | 淹混流界限水深                      |
| $k, K$         | 河床特性或冲坑系数                             | $t_D$           | 临界回底流界限水深                    |
| $l_j$          | 水跃长度(平底)                              | $t_W$           | 临界波流界限水深                     |
| $l_B$          | 消力池长                                  | $u$             | 渗透压力                         |
| $l_b, l_x$     | 射流贴底流动长度                              | $v_0, v_1, v_2$ | 流速                           |
| $l_r$          | 底旋滚长度                                 | $v_k$           | 临界流速                         |
| $l_a, l_\beta$ | 斜坡水跃长度                                | $v_a$           | 容许流速                         |
| $l_{sj}$       | 淹没水跃长度                                | $v_b$           | 底流速                          |
| $l_{jb}$       | 跃后长度                                  | $v_R$           | 相对流速 $\frac{v_b}{v_1} = v_R$ |
| $L$            | 主流区长或泛指挑距                             | $W$             | 宽度                           |
|                |                                       | $x, y$          | 坐标轴                          |

$\tau, z_0$  落差

$Z_e$  有效落差

$\alpha, \beta$  角度, 动能动量改正系数

$\beta$  离心力参数  $= \frac{h_b}{R}$

$\gamma$  水容重

$\theta, \theta_M$  挑角, 最佳挑角

$\lambda$  离心力参数  $= \frac{h_1}{R}$

$\eta = \frac{t}{h_1}$  或  $\frac{h_2}{h_1}$

$\eta_i = \frac{z_i}{h_1(p_i + c)}$ , 共轭水深比

$\sigma$  淹没系数

# 目 录

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| <b>第一章 消能防冲原理 .....</b>         | <b>1</b>   |
| 第一节 局部水力现象 .....                | 2          |
| 第二节 混合流原理与运动规律 .....            | 21         |
| 第三节 混合流特性及其应用 .....             | 39         |
| <b>第二章 消能防冲的选型与设计 .....</b>     | <b>59</b>  |
| 第一节 消能防冲的选型 .....               | 59         |
| 第二节 消能防冲的设计 .....               | 71         |
| 第三节 设计与模型试验 .....               | 87         |
| <b>第三章 挑流消能的水力设计 .....</b>      | <b>96</b>  |
| 第一节 水力计算 .....                  | 97         |
| 第二节 有关挑距的讨论 .....               | 124        |
| 第三节 有关冲刷的讨论 .....               | 140        |
| 第四节 挑坎上作用力及尾水泄降等的讨论 .....       | 161        |
| <b>第四章 面流和屏流消能的水力设计 .....</b>   | <b>177</b> |
| 第一节 水力计算之一——混合流算法 .....         | 179        |
| 第二节 水力计算之二——各种经验公式的算法 .....     | 224        |
| 第三节 有关问题的讨论 .....               | 271        |
| <b>第五章 底流消能的水力设计 .....</b>      | <b>283</b> |
| 第一节 水跃 .....                    | 284        |
| 第二节 水跃的控制 .....                 | 311        |
| 第三节 底流消能的水力计算 .....             | 320        |
| 第四节 有关问题的讨论 .....               | 348        |
| <b>第六章 特种消能的水力设计和发展趋势 .....</b> | <b>393</b> |
| 第一节 特种消能工的几种定型设计 .....          | 393        |
| 第二节 井流消能 .....                  | 412        |
| 第三节 消能工的发展趋势简介 .....            | 424        |

## 第一章 消能防冲原理

目前采用的消能方式可分为两大类：一类属于基本消能方式范畴，如底流、挑流、溢流、面流及戽流（或称消力戽）消能；一类属于特种消能方式，如冲击、喷射或深井消能等。后者水力现象复杂，且其使用不很普遍，其规律仍有待探索。前者应用普遍，且面多量广。但由于目前对基本消能方式的研究，是按其具体形式的不同而分别进行的，忽略了各种消能方式之间的相互联系，由于孤立片面，因而对消能存在的问题，有些还不能从理论上加以解决，比较突出的如面流及戽流的水力计算，有些虽已部分解决，但还不够完善或准确，如消力池的水跃稳定，池长的设计，辅助消能的设置，挑距和冲坑的计算等。更重要的是对各种基本消能方式中的水力现象及特性缺乏系统的比较，对消能机理缺乏深入细致的分析，从而在很大程度上对消能方式的选择与设计不当，运用不妥，这是大多数工程发生种种消能防冲问题的重要原因。

通过调查研究与实验，可以发现在各种基本消能方式中，流态虽然有所区别，但无非是简单的或复杂的局部水力现象而已。前者是水流在特殊边界条件下运动的结果，后者则是水流在比较复杂即一般边界条件下的产物。底流消能的水力设计之所以相对地比较成熟，正是由于人们对底流消能所依据的局部水力现象——水跃进行了长达百余年研究的结果。如果对一般边界条件下复杂的局部水力现象进行系统的研究，当不难收到同样的效果。

特殊包含于一般之中，将局部水力现象的研究由特殊推进到一般，将可使各种基本消能方式的水力设计得到理论的依据。同时还可以对比各种消能方式的消能特性及防冲效果，也可以有助于结合具体工程的水力、边界条件，选择适当的消能方式。对已建的工程，也可以根据运行中的水力、边界条件，推算可能发生的流

态,并采取相应的管理操作措施、收到较好的消能防冲效果。

一般边界条件下的局部水力现象表现为射流与水跃流的混合流动,故可定名为混合流。混合流是射流(含挑流、溢流)及水跃流各种组合流态的统称,举凡底流、挑流、溢流、跌水、面流及岸流等基本消能方式中可能出现的各种局部水力现象与流态,无一能超越混合流的范畴。

本章将首先介绍特殊边界条件下的局部水力现象水跃与跌水,然后介绍一般边界条件下的局部水力现象混合流,并对其水流运动规律及水流特性加以详细的介绍。希望能通过对混合流的系统研究,逐步完善各种基本消能方式的有关水力设计的种种问题。由于这是一种新的尝试,可能存在不少缺点与不足之处,还有待于实践的检验。但从已取得的初步成果来看,混合流至少已为消能防冲的理论探讨提供了一条新的切实可行的途径。

## 第一节 局部水力现象

水的机械运动是水和边界相互作用的结果,从而形成了种种水力现象。在水流的局部区域里,如输、泄水建筑物出口及其下游附近,由于水力条件或边界条件的剧变或突变,于是形成局部水力现象。水流沿程因克服阻力做功,消耗了一部分机械能量,如动能或势能,使之转换为热能,不复再为水流所利用。这种消耗了的能量称为能量损失或能量消耗,也可径称为消能。在局部水力现象中,能量的转换比较剧烈,能量的消耗也较多。消能的多少取决于水流机械能做功的情况。在固体力学中,做功的形式是摩擦和碰撞。在流体力学中,做功的形式也是类似的,只不过是更复杂一些而已。在流体力学一个分支的水力学中,具有粘滞性的水作为连续介质在无边界分离的流动情况下,做功的形式主要表现为水流与边界相互作用由切应力形成的摩擦阻力,和维持紊动水流中的漩涡运动。在有边界分离流动的情况下,做功的形式就表现得更为复杂。除上述的摩擦阻力外,如果分离只是由于流体动力学的原

因,则将有法向应力形成的压强阻力,或称为形状阻力;如果还伴有波浪或发生非恒定流动,则压强阻力还应包括波浪阻力和惯性阻力.如果是惯性分离,将发生冲击或碰撞,例如挑流鼻坎出口射流的冲击下游河床或河面的现象,射流在此种冲击前后的短暂时间内,其运动速度在大小和方向上都会产生有限的改变,这与固体力学中定义的碰撞,可以近似认为没有多大的区别.此外水流在剧烈运动过程中,还可能有大量水质团以水溅的形式溅离水面,在大气中发生水质团之间的相互碰撞或水质团对固体边界的撞击.有时因水面的剧烈掺气,破坏了水流的连续性,甚至在水流内部也可能发生微小水质团间的相互撞击现象.因此对于水流而言,凡是能产生水流与边界剧烈摩擦和冲击或碰撞的局部水力现象,都具有程度不同的消能效果.当摩擦与冲击发生于边界上,并超过边界抗冲抗摩能力时,必然会造成边界上不同程度的磨损,冲刷等破坏,以及由此引起的淤积等不利影响.因此,消能防冲的核心问题就是研究局部水力现象中的水流运动规律,水流特性以及消能的机理.

局部水力现象有二元流动与三元流动之分.由于水力学上许多三元流动问题均可化简作为二元流动处理,并能解决大多数工程的实际问题,故本书除特别注明者外,均以二元流动为准.

## 一、特殊边界条件下的局部水力现象

### (一) 水跃

1. 水跃现象: 水跃是明渠水流由急流过渡至缓流,即由低水位向高水位过渡时,水深沿流急剧增加,水面突然跃起的局部水力现象.它常发生于闸坝下游或陡槽突变为缓坡处,如图 1-1 所示.水跃是明渠水流中的一个最基本的局部水力现象,其特点是水流的动能转换为势能,在转换过程中有剧烈的能量消耗.水跃在消能防冲中有重要的作用,是底流消能的水力依据.

2. 水跃名词: 图 1-1 中, 1—1 及 2—2 断面分别称为跃前及跃尾断面,两断面之间为水跃区,其水平长度称为跃长  $l_j$ , 2—2 断面下游为跃后区,无一定范围.跃前、跃尾断面上的水深及平均

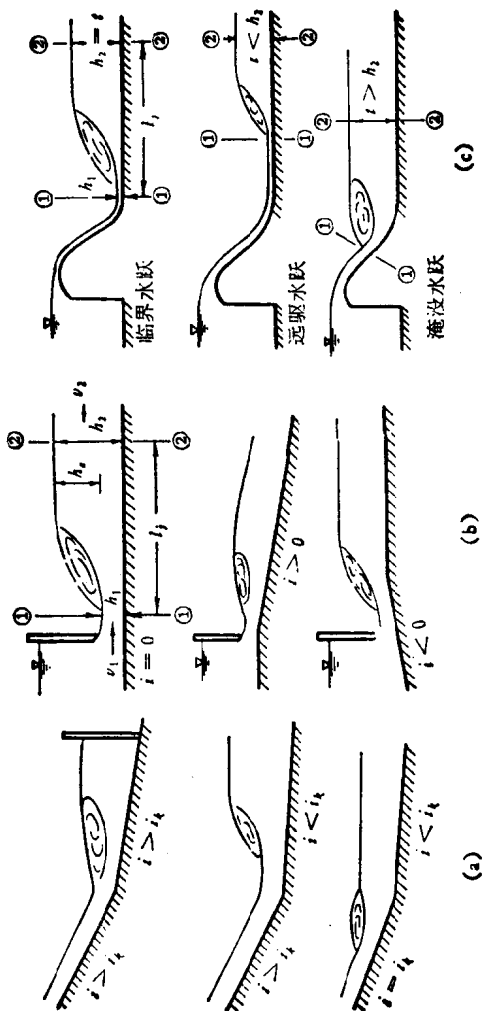


图 1-1 各种水跃示意图

流速分别以  $h_1, h_2$  及  $v_1, v_2$  表示,  $h_1$  为跃前水深,  $h_2$  为跃后水深, 其比值  $\frac{h_2}{h_1} = \eta$ , 为共轭水深比或共轭比, 其差值  $h_2 - h_1$  为跃高  $h_s$ 。跃前断面的弗汝德数  $Fr = v_1 / \sqrt{gh_1}$ 。

3. 水跃形式: 水跃可发生于任何坡度上, 即平坡 ( $i = 0$ )、正坡 ( $i > 0$ ) 和逆坡 ( $i < 0$ )。图 1-1 (b) 所示为三种不同底坡上的闸下水跃(坝下情况亦同、图略)。同属正坡上, 由于陡缓的不同, 水跃可以发生于陡坡 ( $i > i_k$ )、缓坡 ( $i < i_k$ ) 和临界坡 ( $i = i_k$ ) 上, 以明渠为例, 如图 1-1(a) 所示。应该指出: 工程上一般只注意利用平坡上的水跃, 作为唯一的底流消能手段, 其实为了节省开挖, 完全可以结合实际地形条件设计正坡或逆坡上的底流消能。此外, 不同坡度衔接处的水跃, 在岸边溢洪道具有折坡的陡槽上也有发生的可能, 正可因势利导加以利用。

4. 水跃发生条件: 对于平坡上的矩形明渠, 根据动量守恒原理, 可以推导出水跃发生条件的表达式如下:

$$\eta = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1) \quad (1-1)$$

上式说明平底矩形明渠水跃共轭水深的比值  $\eta$  是  $Fr$  的函数,  $\eta = f(Fr)$ , 即水跃的发生条件与  $Fr$  值有关。

若底坡为平坡, 但明渠为梯形时,  $\eta = f\left(Fr, \frac{b}{mh_1}\right)$ ,  $b$  为梯形底宽,  $m$  为梯形边坡系数。若底坡为非平坡时的矩形明渠, 则  $\eta = f(Fr, \alpha)$ ,  $\alpha$  为坡度角。若为梯形时, 则  $\eta = f\left(Fr, \alpha, \frac{b}{mh_1}\right)$ 。

以上各种关系式将在第五章中另行介绍。

必须指出: 平底矩形水跃是一切其它形式水跃的基础。其它形式的水跃因边界复杂, 其发生条件尚需考虑底坡角及断面几何要素。但不管水跃形式如何,  $Fr$  值仍是确定水跃发生条件的决定因素。 $Fr$  在局部水力现象中是一个不可忽视的重要参数。

5. 水跃形态: 依  $Fr$  值的不同, 水跃约可分为五种形态, 参看图 1-2.

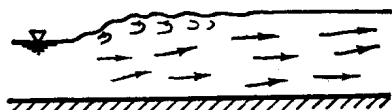
(1)  $Fr = 1 \sim 1.7$ : 波状水跃, 水面仅有微波。

(2)  $Fr = 1.7 \sim 2.5$ : 弱水跃, 水跃表面有一连串小的旋滚, 但下游水面平顺, 能量消耗很小。

(3)  $Fr = 2.5 \sim 4.5$ : 不稳定水跃, 或称震荡水跃, 射流进入跃区发生震荡现象, 时而趋向水表面、时而趋向底部, 周而复始, 极



(1)  $Fr = 1 \sim 1.7$  波状水跃



(2)  $Fr = 1.7 \sim 2.5$  弱水跃



(3)  $Fr = 2.5 \sim 4.5$  不稳定水跃



(4)  $Fr = 4.5 \sim 9.0$  稳定水跃



(5)  $Fr > 9.0$  强水跃

图 1-2 水跃形态示意图

不稳定，每一次震荡即造成周期不规则的巨大波浪。本型水跃有严重的波浪问题。

(4)  $Fr = 4.5 \sim 9.0$ : 稳定水跃，水跃的作用与位置较少受尾水变幅的影响，消能良好。

(5)  $Fr > 9.0$ : 强水跃，高速射流间歇地将水跃表面旋滚中的水体带往下游，下游水面波涛起伏，水跃作用剧烈。

必须指出：低水头大流量的泄水建筑物，如水闸、低的堰坝或渠系建筑物，其  $Fr$  值常在不稳定水跃范围内。对原型工程的观测表明，当发生不稳定水跃时，波浪可延绵下游连续数公里以远处，对海漫及土质堤岸有破坏作用，必须设法避免采用  $Fr = 2.5 \sim 4.5$  范围内的水跃作底流消能，一般可变更建筑物的尺寸予以避免，若不能避免时，则消能防冲设施必须慎重。当  $Fr > 9.0$  以后，若作底流消能，则因池深过大，边墙过高、不一定经济，宜改用其它消能方式。但对于各种有闸门控制的泄水建筑物，当闸门开度很小时，如其泄量只占设计流量很小的比值，则此种情况下出现的高  $Fr$  值不应予以考虑。不少设计人员很不习惯于以  $Fr$  值的大小作为判别水跃形态的一种手段，对不稳定水跃的危害程度，在认识上也有不足之处。

6. 水跃位置：依尾水  $t$  与跃后共轭水深  $h_2$  的不同，水跃有三种位置：参看图 1-1(c)。

(1)  $t = h_2$ : 临界水跃，跃首适在建筑物出口处或其收缩断面上。

(2)  $t < h_2$ : 远驱水跃，跃首远离建筑物出口。

(3)  $t > h_2$ : 淹没水跃，跃首上移，淹没建筑物出口。

应该指出，作底流消能设计时，必须避免出现远驱水跃，以减轻下游的冲刷。同时，正是由于这种水跃跃首的位移现象，若与射流的流动配合时，将可产生一系列的混合流动现象，所以水跃流是混合流的一个重要组成部分。

7. 水跃长度：水跃长度  $l_j$  与  $Fr$  值有关，对于平底矩形槽，可采用下式计算：

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } Fr \geq 4.5, \quad l_j &= 6.1h_2 \\ \text{当 } Fr < 4.5, \quad l_j &= [3.6 + 0.9(Fr - 1.7)]h_2 \end{aligned} \right\} (1-2)$$

## (二) 跌水

1. 跌水现象：跌水是明渠水流由缓流过渡到急流，即自高水位向低水位过渡时，水深沿流急剧降低，流线急剧变曲，水面突然跌落的局部水力现象。它常发生于明渠断面突然扩大处或缓坡突变为陡坡处（极限情况为  $i = \infty$ ）。在此情况下，水面急剧降落，同时又以临界流动状态通过此突变断面或该断面附近的上游断面。输水建筑物中最常见跌水现象，泄水建筑物中的坝顶溢流，如拱坝坝顶的自由溢流或通过插板闸门的门顶溢流等，也都属于跌水范畴，如图 1-3 所示，从图上可以看出，由于明渠断面突然扩大形

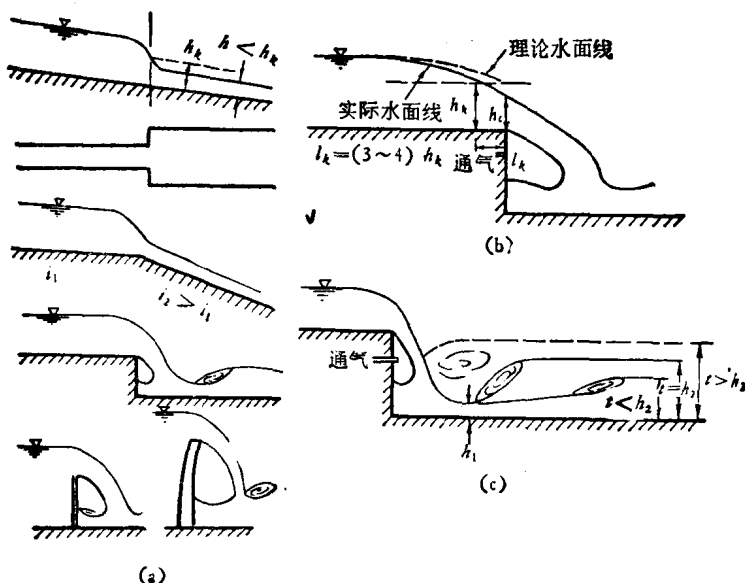


图 1-3 各种跌水示意图

成的跌水，上下游落差较小，其特点是水流的势能转换为动能，在能量的转换过程中，无剧烈的能量消耗。这种单纯由缓流向急流过渡的局部水力现象，不能作为消能的一个手段。

2. 跌水与水跃的混合流动：具有消能作用的是底坡突变处或