

击波 水跃 跌水 消能

SHOCK WAVE HYDRAULIC JUMP
PLUNGE ENERGY DISSIPATION

倪汉根 刘亚坤 著

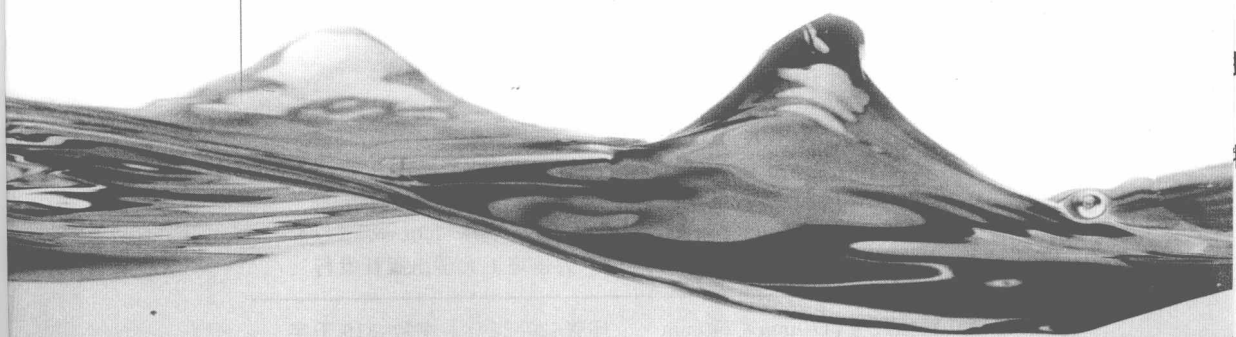


大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

击波 水跃 跌水 消能

SHOCK WAVE HYDRAULIC JUMP
PLUNGE ENERGY DISSIPATION

倪汉根 刘亚坤 著



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

击波 水跃 跌水 消能/倪汉根,刘亚坤著. —大连:
大连理工大学出版社,2008.1
ISBN 978-7-5611-3851-9

I. 击… II. ①倪… ②刘… III. ①水动力学—冲击波
②水跃③跌水④消能(水流) IV. TV13 TV672

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 187338 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:<http://www.dutp.cn>

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:170mm×240mm	印张:20.25	字数:319千字
2008年1月第1版	2008年1月第1次印刷	

责任编辑:于建辉

责任校对:石子

封面设计:宋蕾

ISBN 978-7-5611-3851-9

定 价:48.00 元

内容简介

本书分6章：边墙转折引起的急流冲击波、窄缝挑坎的水力设计与水力计算、其他收缩式消能工、水跃、消力池水力设计中的若干问题、挑跌流水垫塘消能。前3章为一组，第1章是急流冲击波的基本理论与计及波后非静水压强分布及底坡对冲击波影响后的修正理论。第2、3章是以冲击波理论为依据的收缩式消能工的水力设计与水力计算，鉴于窄缝挑坎的研究成果与运行经验较多，所以独立成章，其他收缩式消能工则合成一章。迄今，使用最多的是底流消能，它利用了水跃消能的水力现象，本书第4章首次给出了各种工况下水跃共轭水深比的显式解。第5章则是直接利用第4章的结果设计消力池，它和传统的设计方法不完全相同。第6章阐述了水舌跌入水垫后的消能机制及介绍了水垫塘水力设计必要的水力参数。

本书基本上涵盖了国内外近期的有关研究结果，可供水工专业的师生及工程技术人员参考。

作者简介

倪汉根

上海市崇明县人，1935年7月生。1963年大连工学院水动力专业研究生毕业。大连理工大学教授。著有《气核-空化-空蚀》、《大坝抗震特性与抗震计算》(合著)及《高效消能工》，发表学术论文近200篇。

刘亚坤

黑龙江省讷河人，1968年11月生。博士、副教授、硕士生导师。中国水利学会青年工作委员会委员，中国水力发电工程学会水工水力学专业委员会委员，水利水电泄水工程与高速水流信息网网员。研究方向为工程水力学。负责完成辽宁省基金及水利工程科研课题30余项。著有《水力学》，发表学术论文40余篇。

本书由

大 连 市 人 民 政 府 资 助 出 版
大连理工大学学术著作出版基金

The published book is sponsored by

The Dalian Municipal Government
and

The Publishing Academic Works Foundation
of the Dalian University of Technology

序

我国尚有蕴藏量极丰的水能资源等待开发。许多已建和待建枢纽都有大流量、窄河谷、高落差或大流量、深尾水、低弗氏数的泄洪消能问题。

30 多年来,我国水利工作者借鉴国外经验,结合二滩、东江、龙羊峡、安康、小湾等工程的开发,研究和多种新型消能元件和消能方式,收缩式消能工的应用达到了国际先进水平。2000 年,童显武教授主编出版了《高水头泄水建筑物收缩式消能工》一书,较全面地总结了窄缝挑坎、宽尾墩用于东江、安康、岩滩、五强溪等工程的研究、设计、施工、管理以及原型观测全过程中的技术问题。几乎同时,本书的第一作者出版了《高效消能工》一书,内容除了涉及收缩式消能工外,还包括孔板、螺旋流等内消能工的研究结果。

本书延拓了《高效消能工》一书,是关于冲击波、水跃、跌水等水力现象及其有关消能工近期国内外主要研究结果的汇集与整理。全书共分 6 章,第 1 章:“边墙转折引起的急流冲击波”,除简洁说明 Ippen 冲击波理论和其简化方法外,着重介绍了折流器长度、底坡对冲击波的影响,它们是设计收缩式消能工的理论基础。第 2 章是“窄缝挑坎的水力设计与水力计算”,第 3 章是“其他收缩式消能工”。第 2、3 章都是第 1 章的工程应用,进一步完善了收缩式消能工的水力设计与水力计算方法。鉴于底流消能应用广泛,国外水跃研究的近期结果又可应用于改善消力池的设计方法。因此,在第 4 章“水跃”中给出了 17 类水跃共轭水深的显式解,并在第 5 章“消力池水力设计中的若干问题”中,说明了如何应用第 4 章的结果,拟订新的消力

池设计方法。第 6 章是“挑跌流水垫塘消能”,用跌水和射流理论分析了水垫塘的水力特性,并给出了底板随机振动与计及振动的稳定性计算方法。

本书的很多内容尚无定论,有些结果和观点是作者及其合作者们的近期研究成果,并不成熟,仅为进一步研究的引玉之砖。西北林业大学的刘韩生教授参与了本书第 1、2 章的研究,谨表谢忱。

作 者

2008 年 1 月于大连

目 录

第 1 章 边墙转折引起的急流冲击波	1
1.1 概 述	2
1.2 Ippen 理想冲击波模型	2
1.3 冲击波的近似计算	6
1.4 非对称收缩段中的冲击波	7
1.5 冲击波后非静水压强分布对冲击波参数的影响	11
1.5.1 计及波后非静水压强分布影响后的 冲击波基本关系	11
1.5.2 非静水压强分布修正系数 ξ 的测定	13
1.5.3 参数 k 与 ξ 的关系	22
1.5.4 对比计算	23
1.5.5 计及非静水压强修正后比值 Y 的近似计算	24
1.6 底坡对冲击波参数的影响	27
1.6.1 底坡对冲击波影响的近似分析	27
1.6.2 陡坡上的冲击波试验	30
1.6.3 陡坡上冲击波试验结果与计算结果的比较	33
参考文献	34
第 2 章 窄缝挑坎的水力设计与水力计算	37
2.1 概 述	38
2.2 窄缝挑坎水力特性的近似计算	38
2.2.1 窄缝挑坎内水流机械能损失的估计	39
2.2.2 窄缝挑坎中水面曲线的一维近似计算	40
2.2.3 窄缝挑坎内的压强计算	41
2.3 一级对称直线边墙窄缝的设计	43
2.3.1 已有的一些经验性意见	43
2.3.2 边墙收缩角 α 的选择范围	44

2.3.3	$\frac{B_c}{B_0}$ 的选择范围	48
2.3.4	窄缝挑坎收缩段长度的确定	50
2.3.5	窄缝出口竖向挑角及挑坎出口高程的选择	53
2.4	一级非对称直线窄缝	56
2.4.1	一级非对称直线窄缝中水流的转向角	56
2.4.2	几个算例	58
2.4.3	一级非对称直线边墙窄缝的水力设计	58
2.5	非对称曲线边墙窄缝	60
2.5.1	对称边墙窄缝与非对称边墙窄缝对河床底板的冲击压强	60
2.5.2	非对称曲线边墙窄缝的体型设计	63
2.5.3	非对称曲线窄缝的设计水流转向角与实测水流转向角	67
2.6	窄缝挑坎水力特性试验值与计算值的比较	67
2.6.1	窄缝内的水深	68
2.6.2	窄缝底板实测压强与计算压强的比较	72
2.6.3	窄缝挑坎水舌实测挑距与计算挑距的比较	74
2.6.4	窄缝挑坎挑流最大冲坑深度的估计	87
	参考文献	91
第3章	其他收缩式消能工	93
3.1	宽尾墩挑流消能	94
3.1.1	宽尾墩与窄缝的区别	94
3.1.2	宽尾墩几何参数的选择	95
3.1.3	宽尾墩出口的水流断面计算	98
3.1.4	宽尾墩后的水股相交	100
3.2	异形宽尾墩挑流消能	104
3.2.1	异形宽尾墩与宽尾墩的区别	104
3.2.2	常规尾墩、宽尾墩和异形宽尾墩冲刷对比试验	106
3.3	转向分流墩	112
3.3.1	概 述	112
3.3.2	转向分流墩附近流场的平面几何关系	114
3.3.3	最大转向角 $\alpha_{\max}$	115
3.3.4	水深比 η 与 θ 的近似计算	116
3.3.5	转向分流墩上的动水压力	116
3.3.6	水力模型试验	117

3.4 收缩式大型非转向分流墩	119
3.4.1 概 述	119
3.4.2 收缩式非转向大型分流墩的水力特性	121
3.4.3 设计收缩式非转向分流墩的参考意见	128
3.5 急流的折射 ^[16]	128
参考文献	130
第4章 水 跃	133
4.1 概 述	134
4.2 矩形断面渠道水跃共轭水深比的一般解	135
4.3 水平底等宽矩形渠道中的水跃	136
4.3.1 不计渠底剪力	136
4.3.2 考虑壁面剪力	137
4.4 水平底渐扩渠道中的水跃	140
4.4.1 矩形断面渐变段中的水深	140
4.4.2 渐扩段中的水跃	140
4.5 水平底矩形断面突扩渠道中的 T 型水跃	144
4.6 水平底矩形断面收缩段中的水跃	148
4.7 逆坡矩形断面渠道上的水跃	150
4.8 矩形断面折坡渠道中的 D 型和 B 型水跃	154
4.8.1 D 型水跃	154
4.8.2 B 型水跃	158
4.9 水平底矩形断面渠道的坎控水跃	161
4.9.1 坎控水流的分类	161
4.9.2 水平底矩形渠道坎控水跃的控制方程与解	163
4.10 逆坡上的坎控水跃	169
4.11 正坡上的阶控水跃	172
4.11.1 正坡上阶控水跃的分类与控制方程	172
4.11.2 A ⁺ 型水跃的共轭水深比	173
4.11.3 B ⁺ 型水跃的共轭水深比	176
4.11.4 A ⁻ 型水跃的共轭水深比	179
4.11.5 B ⁻ 型水跃的共轭水深比	182
4.11.6 阶控水跃的稳定性与水跃长度	184
4.12 三角形与梯形断面渠道中的水跃	185
4.12.1 梯形断面渠道中的水跃	185

4.12.2 三角形断面渠道中的水跃	189
参考文献	192
第5章 消力池水力设计中的若干问题	197
5.1 名义消能率与实际消能率	198
5.2 消力池水力计算方法的比较	207
5.2.1 底流消能与控制水跃	207
5.2.2 水平底坎控消力池水力计算方法的比较	208
5.2.3 阶控消力池水力计算方法的比较	212
5.2.4 形成D型水跃的折线形消力池	214
5.2.5 形成B型水跃的折线形消力池	216
5.2.6 正坡阶控消力池	217
5.2.7 单向突扩消力池	219
5.2.8 堰下带跌坎的平面突扩(双向突扩)	221
5.2.9 跌水消力池	229
5.3 低弗劳德数消力池	230
5.3.1 几种定型消力池及低弗劳德数消力池	230
5.3.2 四种低弗劳德数消力池的冲坑对比试验	233
5.3.3 SAF型消力池下游的保护	235
5.4 宽尾墩-消力池	237
5.4.1 有分流时水跃的水力简图及控制方程	237
5.4.2 式(5-32)的特性	238
5.4.3 宽尾墩-消力池的等效分流比 α_e	240
5.5 宽尾墩和加T型墩消力池联合消能	244
参考文献	246
第6章 挑跌流水垫塘消能	249
6.1 概 述	250
6.2 自由水舌的运动特征	252
6.3 自由水舌的碰撞	256
6.4 自由水舌入水引起的水垫流态	257
6.4.1 表面滑移流和表面波流	259
6.4.2 附着流	261
6.4.3 潜入射流	262
6.5 水垫塘的消能率	268
6.6 水垫塘底部的时均压强	273

6.6.1 最大时均压强的估计	273
6.6.2 单股射流时掺气对底板上时均压强分布的影响	277
6.6.3 多股水舌入射时水垫塘底部的时均压强	279
6.7 水垫塘底部的脉动压强	282
6.7.1 点脉动压强	282
6.7.2 水垫塘底板上点、面脉动压强幅值的转换关系	288
6.8 水垫塘底板的稳定性	290
6.8.1 水垫塘底板的静力稳定	290
6.8.2 计及水垫塘底板动力特性时的抗浮稳定性	294
参考文献	310

第 1 章 边墙转折引起的急流冲击波

1.1 概 述

收缩式消能工是指由明渠道道的边墙向水流侧转折(收缩型转折)形成的消能元件。窄缝挑坎、宽尾墩、异形宽尾墩、使水流转向的分流墩、折流墩等都是收缩式消能元件。通常上述这些消能元件都位于急流区,因此边墙向水流侧转折的水力特征是形成斜水跃,也称冲击波。为了进一步认识各种已有收缩式消能元件的水力特性,根据工程具体条件设计适宜的收缩式消能工,乃至发展新型消能装置,都必须对因边墙收缩引起的冲击波有一定的认识。本章只说明因边墙收缩型转折引起的冲击波的水力特性。

文献[1]的有关评述表明 Preiswerk(1938)是斜水跃的第一个研究者^[2],但他并没有给出完整的结果。1943年, Ippen 提出了沿用至今的理想冲击波理论^[3],它对强、弱冲击波均适用,但使用不太方便。1987年 Hager 和 Brete 建议了一种冲击波简化计算方法^[4]。1989年 Hager 又建议了改进的强冲击波近似计算方法^[5],它的精度高于文献[4]的。1999年刘韩生和倪汉根也建议了一种冲击波简化计算方法^[6],与试验结果相比,误差略小于文献[5]的。但上述这些方法都不能用于非等强度冲击波交汇后的计算。文献[7]在比能不变的假定下,给出了非等强度冲击波交汇后的近似计算方法,由于假定比能不变,对强冲击波误差较大。文献[8]实验研究了边墙偏角较大,长度较小,来流弗劳德数较高时,波后的非静水压力分布对冲击波的影响并建议了相应的计算方法。文献[9]则实测了正坡渠道上的冲击波并给出了相应的近似计算方法。

1.2 Ippen 理想冲击波模型

理想冲击波理论采用了下面四个基本假定:(1)冲击波前、后的压强都符合静水压强分布;(2)冲击波上、下游的流速都为均匀分布;(3)冲击波的波头厚度为零;(4)平底。坡度为零时的理想冲击波如图 1-1 所示。

可以写出与图 1-1 相应的连续性方程、与冲击波垂直和平行两个方向的动量方程,分别为

$$h_1 v_{n1} = h_2 v_{n2} \quad (1-1)$$

$$\frac{\rho g h_1^2}{2} + \rho h_1 v_{n1}^2 = \frac{\rho g h_2^2}{2} + \rho h_2 v_{n2}^2 \quad (1-2)$$

$$v_{t1} = v_{t2} \quad (1-3)$$

求解上面 3 个方程,可得冲击波上、下游水力参数间的关系式:

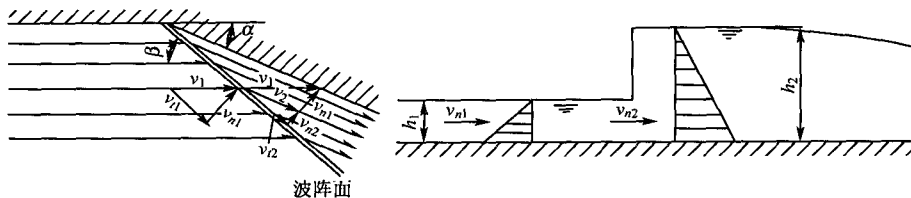


图 1-1 坡度为零时的理想冲击波示意图

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \alpha)} \quad (1-4)$$

$$\sin \beta = Fr_1^{-1} \left[\frac{1}{2} (1 + Y) Y \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-5)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\cos \beta}{\cos(\beta - \alpha)} \quad (1-6)$$

$$Fr_2^2 = Y^{-1} \left[Fr_1^2 - \frac{1}{2Y} (Y - 1)(Y + 1)^2 \right] \quad (1-7)$$

$$\frac{\Delta H}{h_1} = \frac{(Y - 1)^3}{4Y} \quad (1-8)$$

式中, Fr 表示弗劳德数, 定义为 $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$; ΔH 是水质点穿过冲击波时的能量水头损失。

具体计算时, 可以从式(1-4)、式(1-5)中消去 Y , 得到 β 与 α 及 Fr_1 间的关系:

$$\frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \alpha)} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2 \sin^2 \beta} - 1) \quad (1-9)$$

在式(1-9)中, α 和 Fr_1 都是已知的, 通过迭代计算即可确定待求的冲击波波角 β , 然后再由式(1-4)和式(1-7)确定 h_2 和 Fr_2 。

图 1-2 是依据式(1-4)~式(1-7)给出的 Fr_1 - α - β - $\frac{h_2}{h_1}$ - Fr_2 关系曲线。先根据给定的 α 值和 Fr_1 值, 从图 1-2(II)查得 β 值, 从图 1-2(III)得到 Fr_2 值, 再从图 1-2(I)或图 1-2(IV)确定 $\frac{h_2}{h_1}$ 。从图 1-2(II)和图 1-2(III)可以看到, 与一对 α 值和 Fr_1 值对应的有两个 β 值和两个 Fr_2 值, 那个小的 β 值和大的 Fr_2 值是所求的解。图 1-2 表明, 对于每一个 Fr_1 值, 都对应着一个最大的边墙偏转角。例如, 当 $Fr_1 = 6$ 时, 边墙的极限偏转角 $\alpha = 50^\circ$, 相应的 $\beta = 70^\circ$ 。如果 α 大于可能的极限值, 那就不会形成斜向冲击波(斜水跃), 而形成直水跃, 其锋面的位置比偏转角顶部所在的位置要靠上游一些(图 1-3)。

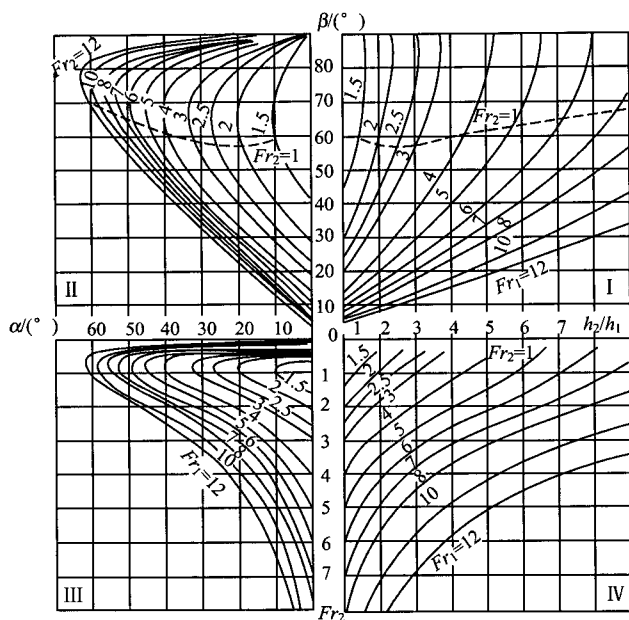


图 1-2 A·伊本的 $Fr_1 - \alpha - \beta - \frac{h_2}{h_1} - Fr_2$ 关系

最大偏转角 $\alpha_{\max}$ 与 Fr_1 的关系如图 1-4 所示,在该图上还给出了确定弱水跃 ($Fr_2 > 1$) 和强水跃 ($Fr_2 < 1$) 之间界限的 $\alpha_k - Fr_1$ 曲线。当 $\alpha \geq \alpha_k$ 时,形成直水跃。

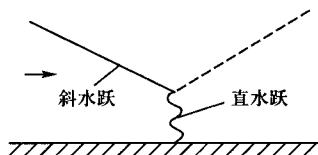


图 1-3 斜水跃反射并在反射点附近形成直水跃

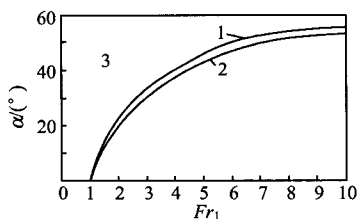


图 1-4 $\alpha_{\max} - Fr_1$ 关系曲线图

1— $\alpha_{\max}$, $\alpha > \alpha_{\max}$ 出现强水跃;
2—弱水跃界限; 3—直水跃区

由图 1-2 知,当 $\alpha > 0$ 时, $\frac{h_2}{h_1} > 1$,即水流通过压缩波的波峰,水深增大,流速减小, Fr_2 值下降。因此当陡冲击波(压缩波)多次从边墙反射后,水流的弗劳德数愈来愈小。当 $Fr_2 = 1$ 时,在冲击波波峰后面,波与边墙的交点附近,产生直水跃。