

《泄水建筑物消能防冲论文集》编审组

XIE

SHUI

JIAN

ZHU

WU

XIAO

NENG

FANG

CHONG

LUN

WEN

JI

泄
水
建
筑
物
消
能
防
冲
论
文
集

水利出版社

泄水建筑物消能防冲论文集

《泄水建筑物消能防冲论文集》编审组

水利出版社

内 容 提 要

本书是一九七八年十二月在汉口召开的“消能防冲学术讨论会”上交流的论文汇编，共51篇，分为三部分：综合及底流消能，面流（包括岸流）消能，挑流消能。这些论文是全国水利水电科研单位、大专院校及工程设计管理单位的科研成果和工程运行经验的总结。论文反映了我国多年来在消能防冲方面科研工作的进展情况和取得的丰硕成果，代表了我国目前这一专题研究工作的发展水平。

本书可供从事水利水电设计、科研、工程管理单位的工程技术人员及有关院校师生参考。

泄水建筑物消能防冲论文集

《泄水建筑物消能防冲论文集》编审组

*

水利出版社出版

（北京德胜门外六铺炕）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 34 $\frac{1}{2}$ 印张 786千字

1980年11月第一版 1980年11月北京第一次印刷

印数 0001—2540册 定价 4.20元

书号 15047·4083

限国内发行

前 言

本书是一九七八年十二月在汉口召开的“消能防冲学术讨论会”上所交流的论文汇编。

消能防冲问题是全国高速水流科研协调组科研计划中的五个研究专题之一。高速水流科研协调组自一九七七年开展工作以来，决定在一九七八年内按专题进行学术活动。其中消能防冲专题，由原水利电力部（以下简称水利电力部）责成长江水利水电科学研究院、水利电力部东北勘测设计院科研所、湖南省水利电力勘测设计院等三单位主办。于一九七八年十二月在汉口召开了“消能防冲学术讨论会”。到会的有设计、科研、工程管理及大专院校等62个单位的120名代表，共提出论文报告60份。这些报告充分反映了多年来我国在高速水流消能防冲科研工作和经验总结方面取得的丰硕成果，内容比较丰富。为了交流研究成果，促进高速水流消能防冲专题研究的进一步深入，经水利电力部科学技术委员会同意，决定将这些论文报告汇编成册，定名为“泄水建筑物消能防冲论文集”，由长江水利水电科学研究院、水利电力部东北勘测设计院科研所、湖南省水利电力勘测设计院等三单位组成编审小组，进行编审工作。

本书分为：综合及底流、面流（包括岸流）、挑流消能三个部分。每一部分大致按理论分析、试验研究、原型观测的次序排列。由于有些论文进行了合并编写，有些论文已另行发表，故最后列入本书的论文共为51篇，并将学术讨论会的“消能防冲学术讨论会纪要”作为本书附录，以供参考。

本书编审工作的分工是：长江水利水电科学研究院负责综合及底流消能部分；电力部东北勘测设计院科研所负责面流消能部分；湖南省水利电力勘测设计院负责挑流消能部分。编审组成员是：长江水利水电科学研究院肖世泽同志、饶冠生同志；东北勘测设计院胡自兴同志；湖南省水利电力勘测设计院艾克明同志、王川龙同志等。整个工作是在水利电力部科学技术委员会领导下进行的，并得到水利水电科学研究院陈椿庭同志的关心和指导。

限于水平，本书难免存在错误和不足之处，请读者提出批评指正。

《泄水建筑物消能防冲论文集》编审组

一九七九年十一月

目 录

前 言

第一部分：综合及底流消能

平底塘二元水跃消能的无尺度运算·····	水利水电科学研究院	陈椿庭 (1)
适用于消能设计的水工计算尺·····	长江水利水电科学研究院	陈济生 (9)
消力井消能特性的试验研究·····	华东水利学院力学系水力学教研室	郭子中 王昌亨 (19)
水利枢纽下游附近冲淤问题的整体动床模型设计·····	华东水利学院	王世夏 (30)
在局部冲刷试验中应用冲料变态的模拟方法·····	陕西省水利科学研究所	施振兴 (39)
用分区调度的方法解决葛洲坝枢纽二江泄水闸消能防冲问题的研究 ·····	长江水利水电科学研究院葛洲坝枢纽水工模型试验组	(45)
葛洲坝水利枢纽三江冲砂闸多级消力池的水力特性 ·····	长江水利水电科学研究院葛洲坝三江闸水工模型试验组	(56)
复式断面消力池的试验研究·····	河北省根治海河指挥部勘测设计院	(64)
三江口溢流坝T型墩消力池的试验研究 ·····	湖南省水利电力勘测设计院	刘昭然 郭静霞 王雪莉 (75)
改建乌拉泊消力池的水工模型试验·····	新疆维吾尔自治区水利电力局	陈鑫荪 (84)
消力池水跃区水流的压强脉动及其模型律问题 ·····	华东水利学院	王世夏 (89)
芦苞水闸行水五十年的经验·····	广东省水利水电科学研究所	谭启霖 (98)
两个原型调查——富水枢纽溢洪道的弯曲型消力池和白莲河水库溢洪道的贴流冲刷 ·····	湖北省水利勘测设计院	刘文治 (106)
趾墩型消力池的空蚀与磨损问题·····	长江流域规划办公室施工试验总队	任苗兴 陈秋楚 (111)

第二部分：面流（包括库流）消能

消力库水力计算的理论解·····	成都科学技术大学水利科学研究所	吴持恭 (117)
连续式消力库的水力计算和设计·····	陕西省水利科学研究所	张志恒 (122)
旋滚面流消能的初步研究·····	广西大学土木系水利教研室	徐伟章 (134)
单圆弧式消力库水力特性的研究·····	清华大学水利工程系	冬俊瑞 (148)
实体消力库的水力特性·····	西北农学院西安水利实验站	王文焰 (160)
实体消力库的冲刷试验研究·····	西北农学院西安水利实验站	王文焰 (183)
岩滩水电站溢流坝消力库消能试验研究初步总结·····	广西水电局设计院科研所	(196)
大黑汀水库溢流坝消力库·····	河北省根治海河指挥部设计院	(205)
二元混合流初步研究与试验·····	华东水利学院力学系水力学教研室	郭子中 王昌亨 (208)

低鼻坎混流式消能工的特性与设计·····	长江水利水电科学研究院	汪定扬 (228)
溢流坝面流式鼻坎衔接流态的水力计算 ·····	水利电力部、交通部南京水利科学研究所	王正泉 (241)
面流消能在我国大坝建设中的应用·····	水利电力部东北勘测设计院科学研究所	胡自兴 (255)
西津水电站溢流坝坝下消能与冲刷·····	广西壮族自治区西津水力发电厂 水利电力部、交通部南京水利科学研究所	(275)
面流消能的运行验算与分析·····	水利电力部成都勘测设计院科学研究所	丁惠仪 (288)
西津水电站面流消能对下游坍岸的影响·····	广西壮族自治区西津水力发电厂	陈裕生 (299)
梳齿板消能防冲的初步试验研究·····	山西省水利科学研究所	(304)

第三部分：挑 流 消 能

溢流坝鼻坎挑流对岩基冲刷深度与位置的估算 ·····	水利电力部东北勘测设计院科学研究所	徐秉衡	刘新纪 (309)
挑射水流对岩石河床冲刷的估算与模拟 ·····	清华大学水利工程系	余常昭 李玉梁	周炳煊 (322)
鼻坎挑流对岩基河床的冲刷·····	水利水电科学研究院	章福仪	(341)
岩基挑流冲刷中岩体构造特性的影响和模拟试验问题 ·····	长江水利水电科学研究院水工研究室	饶冠生	(352)
挑射冲刷最大冲深位置有关因素讨论及估算方法比较 ·····	安徽省水利科学研究所	蒋玉玺	方乃华 (364)
挑射水流对岩基的冲刷及室内模拟研究综述 ·····	水利电力部第十三工程局勘测设计院科学研究所	刘树坤	(377)
岩性河床的挑流冲深计算及验证问题·····	武汉水利电力学院	陈菊清	(390)
从几个拱坝枢纽的泄洪消能试验谈几点初步体会 ·····	武汉水利电力学院水工结构教研室	胡诚义	(405)
拱坝泄洪挑流消能两种新型式的设计方法探讨 ·····	水利电力部东北勘测设计院科学研究所	孙思慧	(415)
溢流坝挑流射程的简捷计算·····	华南工学院建筑工程系	谭新贤	(426)
扩散挑水戽消能冲刷的初步分析·····	安徽省水利科学研究所	王艺雄	(434)
挑流消能中的反弧半径和临界挑射流量问题 ·····	郑州工学院水利系	刘子榕 姜也英 刘国昌	万随花 (441)
安徽省已建水利工程的岩基冲刷及分析讨论·····	安徽省水利科学研究所	王艺雄	(449)
湖南省几座溢流坝下游岩石冲刷的初步分析·····	湖南省水利电力勘测设计院	王川龙	(460)
三门峡水利枢纽隧洞出口鼻坎挑流冲刷 ·····	水利电力部第十一工程局勘测设计研究院	夏毓常	(484)
修文水电站厂房顶挑流的下游冲刷·····	水利电力部第九工程局勘测设计院	王世玲	(495)
利用宽尾墩提高溢流坝消能效果试验研究 ·····	水利部天津勘测设计院科学研究所	黄启明	何兆斌 (501)

等半径、变挑角、斜向连续式鼻坎挑流消能试验简介·····	云南省水电科学技术研究所 (513)
宋家场溢洪道砥柱墩消能防冲模型试验报告·····	河南省水利局科学研究所 崔铭 (518)
卧虎山水库溢洪道挑流冲刷的模型试验·····	山东省水利科学研究所水工研究室 (527)
宝珠寺水电站下游冲刷试验的动床模拟方法 ·····	成都科学技术大学水利科学研究所 潘瑞文 靳若兰 (534)

附录

消能防冲学术讨论会纪要·····	(542)
------------------	-------

第一部分：综合及底流消能

平底塘二元水跃消能的无尺度运算

水利水电科学研究院 陈 椿 庭

提 要

这篇短文，提出以跃首断面的急流水深 h_1 作为无尺度运算的长度参数。无尺度数统一用单一变量——急流佛汝德（Froude）数 F_1 或共轭水深比 λ 表达，对平底塘二元完整水跃消能进行全盘的无尺度运算，并制成统一的无尺度曲线图，供直接检用。文中还从四方面讨论了二元完整水跃的消能效果，即：水跃的消能效率、对水流含能组成的改变、单位体积消能率以及平均能坡。这样，有助于加深对水跃消能作用的认识。

一、引 言

我国早在公元前三百年左右，就对水跃现象有所描述：“搏而跃之，可以过颡”^①。这比西方在十九世纪初才开始研究水跃，早二千一百多年。长期来，底流水跃一直被用作水工消能的一种有效措施。对于最基本的平底塘二元水跃的计算，论述很多，已为众所习知。

这里提出：对平底塘二元完整水跃的各项水力要素，以跃首急流断面的水深 h_1 为参数，换算成无尺度数，统一用急流断面的佛氏数 F_1 或水跃的共轭水深比 λ 进行表达。所有无尺度算式汇列成表，并制成统一的无尺度曲线图，供运算时直接检用。

水跃的宏观消能效果，可以从多方面进行考查，这里提出从以下四方面讨论水跃的消能效果——水跃的消能效率、对水流含能组成的改变、单位体积消能率、水跃的平均能坡等，以期有助于对水跃的消能作用加深认识。

关于斜坡塘水跃、不完全水跃和淹没水跃、辅助消能工和强迫水跃、三元水跃、水跃的紊动结构和消能机理、下游的大尺度紊动和脉动作用等，都未包括在这篇短文之内。

二、无 尺 度 运 算

平底塘二元完整水跃的水力要素（图1）主要有：单宽流量 q （米³/秒·米），水跃长度 L_j （米）；分别加以脚注“1”或“2”代表相应于第一共轭断面和第二共轭断面的变

① 见《孟子·告子上》。

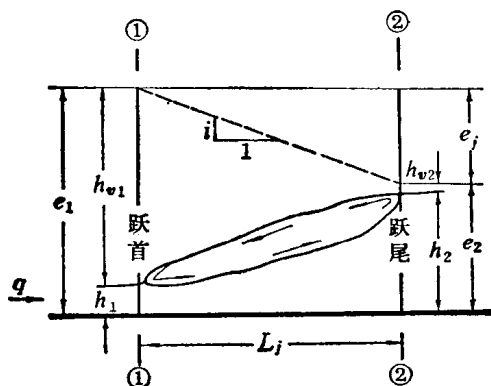


图 1 平底塘二元完整水跃符号示意

面的诸项无尺度数是:

$$\overline{h_1} = h_1 / h_1 = 1 \quad (1)$$

$$\overline{v_1} = v_1 / \sqrt{2gh_1} = F_1 / \sqrt{2} \quad (2)$$

$$\overline{h_{v1}} = (v_1^2 / 2g) / h_1 = F_1^2 / 2 = \overline{v_1}^2 \quad (3)$$

$$\overline{e_1} = (h_1 + h_{v1}) / h_1 = \overline{h_1} + \overline{h_{v1}} = 1 + (F_1^2 / 2) \quad (4)$$

$$\overline{q} = q / (\sqrt{2g} h_1^{1.5}) = \overline{h_1} \cdot \overline{v_1} = F_1 / \sqrt{2} = \overline{v_1} \quad (5)$$

$$F_1 = v_1 / \sqrt{gh_1} = q / (\sqrt{g} h_1^{1.5}) = \sqrt{2} \cdot \overline{v_1} = \sqrt{2} \cdot \overline{q} \quad (6)$$

式中, g 为重力加速度 (9.81 米/秒^2)。

通过水跃, 急流突然转变为缓流; 二元完整水跃的共轭水深比 λ 是 F_1 的函数, 由跃首断面与跃尾断面间压力动量和守恒原则导得, 从而可得第二共轭断面的无尺度水力要素如下:

$$\lambda = h_2 / h_1 = \overline{h_2} = \sqrt{2F_1^2 + 0.25} - 0.5 \quad (7)$$

$$\overline{v_2} = v_2 / \sqrt{2gh_1} = \overline{v_1} / \lambda = F_1 / (\sqrt{2} \lambda) \quad (8)$$

$$\overline{h_{v2}} = (v_2^2 / 2g) / h_1 = \overline{v_2}^2 = \overline{v_1}^2 / \lambda^2 = F_1^2 / (2\lambda^2) \quad (9)$$

$$\overline{e_2} = e_2 / h_1 = (h_2 + h_{v2}) / h_1 = \overline{h_2} + \overline{h_{v2}} = \lambda + \frac{F_1^2}{2\lambda^2} \quad (10)$$

$$F_2 = v_2 / \sqrt{gh_2} = (v_1 / \sqrt{gh_1}) / \lambda^{1.5} = F_1 / \lambda^{1.5} \quad (11)$$

水跃长度一般采用以实验资料为根据的经验式进行计算, 例如:

$$\overline{L_j} = L_j / h_1 = 6.9(\lambda - 1) = 6.9(\sqrt{2F_1^2 + 0.25} - 1.5) \quad (12)$$

或

$$\overline{L_j'} = L_j' / h_1 = 9.4(F_1 - 1) \text{ ①} \quad (13)$$

水跃所消失的能头 e_j (米) 可由式 (4)、(10) 求得, 无尺度数为

$$\overline{e_j} = e_j / h_1 = \overline{e_1} - \overline{e_2} = \frac{(\lambda - 1)^3}{4\lambda} \quad (14)$$

通常称 e_j 与 e_1 之比值为水跃的消能效率, 以符号 ε 表示, 可由式 (14)、(4) 得

① 式中 L_j' 仅用来区别水跃长度经验算式的不同。

$$\varepsilon = e_j/e_1 = \frac{(\lambda-1)^3}{2\lambda(F_1^2+2)} \quad (15)$$

二元水跃所消失的单宽功率为 $N = 9.8qe_j$ (千瓦), 除以水跃的单宽体积而得水跃的单位体积消能率 η (千瓦/米³); 如取水跃单位体积的约式为 $(h_1+h_2)L_j/2$, 引入式(12), 可得 η 的无尺度数为

$$\overline{\eta} = \eta/\sqrt{2gh_1} = \frac{(\lambda-1)^2 F_1}{2\lambda(\lambda+1)} \quad (16)$$

水跃的平均能坡 i , 可由式(14)、(12)得出

$$i = e_j/L_j = \frac{(\lambda-1)^2}{27.6\lambda} \quad (17)$$

跃首断面的急流佛氏数 F_1 或共轭水深比 λ , 是水跃消能无尺度运算的关键, 两者的关系式——式(7)也可改写为

$$F_1 = \frac{\lambda}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda}} = \sqrt{\lambda(\lambda+1)/2} \quad (7a)$$

上述诸式都可统一写为单一变量 F_1 或 λ 的函数式, 汇列如表1。

表 1 二元完整水跃消能无尺度运算式

无尺度数	用 F_1 表 达	用 λ 表 达	式 号
$\overline{h}_1$	1	1	(1)
$\overline{v}_1$	$F_1/\sqrt{2}$	$\frac{\lambda}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda}}$	(2)
$\overline{h}_{v1}$	$F_1^2/2$	$\lambda(\lambda+1)/4$	(3)
$\overline{e}_1$	$1 + (F_1^2/2)$	$1 + [\lambda(\lambda+1)/4]$	(4)
$\overline{q}$	$F_1/\sqrt{2}$	$\sqrt{\lambda(\lambda+1)}/2$	(5)
F_1	F_1	$\sqrt{\lambda(\lambda+1)/2}$	(6)
$\lambda = \overline{h}_2$	$\sqrt{2F_1^2+0.25} - 0.5$	λ	(7)
$\overline{v}_2$	$F_1 / \left(\sqrt{4F_1^2+0.5} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$	$\frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda}}$	(8)
$\overline{h}_{v2}$	$\frac{F_1^2}{4F_1^2 - 2\sqrt{2F_1^2+0.25} + 1}$	$\frac{1}{4} \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right)$	(9)
$\overline{e}_2$	$\sqrt{2F_1^2+0.25} - 0.5 + \frac{F_1^2}{4F_1^2 - 2\sqrt{2F_1^2+0.25} + 1}$	$\lambda + \frac{1}{4} \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right)$	(10)
F_2	$F_1 / (\sqrt{2F_1^2+0.25} - 0.5)^{1.5}$	$\frac{1}{\lambda} \sqrt{(\lambda+1)/2}$	(11)

续表

无尺度数	用 F_1 表 达	用 λ 表 达	式 号
$\overline{L}_i$	$6.9(\sqrt{2F_1^2+0.25}-1.5)$	$6.9(\lambda-1)$	(12)
$\overline{L}_i'$	$9.4(F_1-1)$	$9.4(\sqrt{\lambda(\lambda+1)/2}-1)$	(13)
$\overline{e}_i$	$\frac{(\sqrt{2F_1^2+0.25}-1.5)^3}{4(\sqrt{2F_1^2+0.25}-0.5)}$	$\frac{(\lambda-1)^3}{4\lambda}$	(14)
ε	$\frac{(\sqrt{2F_1^2+0.25}-1.5)^3}{(F_1^2+2)(\sqrt{8F_1^2+1}-1)}$	$\frac{(\lambda-1)^3}{\lambda(\lambda^2+\lambda+4)}$	(15)
$\overline{\eta}$	$\frac{F_1^2-1.5\sqrt{2F_1^2+0.25}+1.25}{2F_1}$	$\frac{(\lambda-1)^2}{2\sqrt{2\lambda(\lambda+1)}}$	(16)
i	$\frac{F_1^2-1.5\sqrt{2F_1^2+0.25}+1.25}{13.8(\sqrt{2F_1^2+0.25}-0.5)}$	$\frac{(\lambda-1)^2}{27.6\lambda}$	(17)

在表1的两种无尺度表达式中,多数以采用 λ 表达的算式较为简便。当跃首的急流佛氏数 F_1 值较大时,式(7)尚可作如下简化:

$$\lambda \approx \sqrt{2}F_1 - 0.5 \quad (7b)$$

以 $F_1=3, 4, 5, 6$ 为例,式(7b)与式(7)的相对误差分别相应为 -0.8% 、 -0.4% 、 -0.3% 、 -0.2% 。一般可以认为:当 $F_1 \geq 4$ 时,简化的式(7b)可以满足水跃计算精度的要求;此时表1中用 F_1 表达的无尺度数算式,可获得较多的简化。

对表1中用 F_1 表达的无尺度运算式,已制成一幅统一的无尺度曲线图(图2)。图中以 F_1 为横坐标,其余16个纵坐标无尺度数中,式(2)的 $\overline{v}_1$ 和式(5)的 $\overline{q}$ 公用一线, $\overline{h}_{v_1}(=\overline{e}_1-\overline{h}_1)$ 、 $\overline{h}_{v_2}(=\overline{e}_2-\overline{h}_2)$ 、 $\overline{e}_j(=\overline{e}_1-\overline{e}_2)$ 三项可由相应曲线的纵坐标差量得。因此,连同 $\overline{h}_1=1$ 水平线共有12条曲线。其中除式(8)的 $\overline{v}_2$ 、式(11)的 F_2 、式(15)的 ε 、式(16)的 η 为曲线外,其余都是直线或左端的曲率较明显而右部为近似的直线。

通过表1和图2,对二元完整水跃水力要素间的相互联系,可进一步加深认识,并进行全盘的无尺度运算。检用图2,还可使有一些较复杂的计算工作,例如给定条件中有一项是跃尾缓流断面的要素时,进一步加快计算速度。因为图中每一纵线与诸曲线相交,给出了相应于横坐标 F_1 值的全部无尺度数,纵线的改换就代替了方程式组的求解。

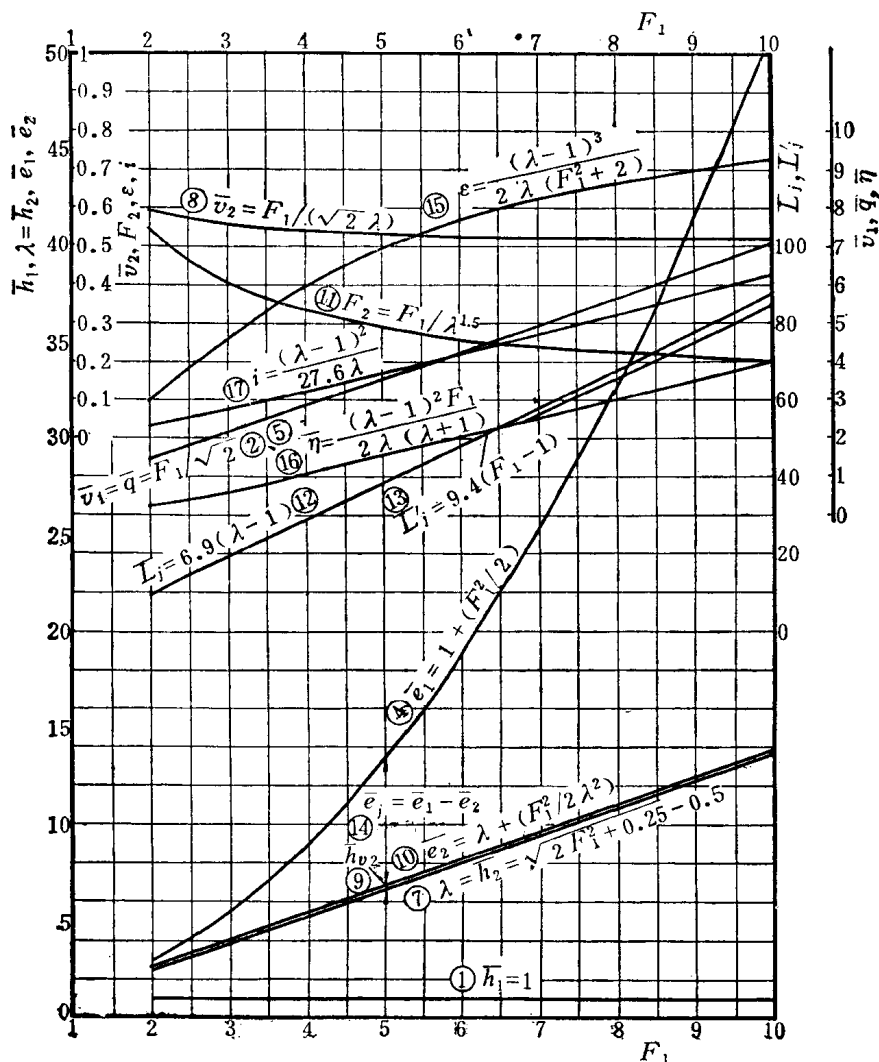


图 2 平底塘二元完整水跃无尺度运算曲线图

三、水跃的消能效果

为了进一步加深对二元完整水跃消能效果的认识，可从下述四方面进行讨论：（1）水跃的消能效率，（2）水跃对水流含能组成的改变，（3）水跃的单位体积消能率，（4）水跃的平均能坡。以下将（1）、（2）两点合并，分三小节依次进行阐述。

1. 水跃的消能效率及对含能组成的改变

水跃是急流在短距离内突然转变为缓流的过程，同时也是进行有效消能的过程。跃首断面急流的能头组成如式（4）所示，流速水头所占的比重很大。急流突变为缓流后，含能的组成发生了根本性改变，水深加大为 λ 倍，相应的流速水头则降为 $1/\lambda^2$ ，如式（10）所示。因此，通过水跃，急流所含动能一部分通过紊动转化为热能而散逸，一部分转换为缓流断面的位能。用式（14）表达的无尺度数 e_j 可直接由第一、第二共轭断面之间流速水头之减小及水深之增大来求得

$$\bar{e}_j = \frac{F_1^2}{2} \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \right) - (\lambda - 1) \quad (14a)$$

这里也反映了无尺度运算的简便之处。

水跃的消能效率 $\varepsilon = e_j/e_1 = \bar{e}_j/\bar{e}_1$ ，如式(15)所示。 $\bar{e}_j$ 、 $\bar{e}_1$ 、 ε 三者都随 F_1 值的增大而增大，但 ε 值的增率较 $\bar{e}_1$ 的增率为小，见表1的算式及图2的曲线。

取 $F_1=6$ 及 $F_1=3$ 分别代表急流的较高佛氏数及低佛氏数情况，举例比较计算水跃的消能效果如次。

(1) $F_1=6$ 跃首急流断面的无尺度能头 $\bar{e}_1=19$ ，其中流速水头 $\bar{h}_{v1}=18$ 占94.7%，位能仅为动能的1/18；通过水跃，水深跃高8倍， $\bar{h}_2=\lambda=8$ ，消能效率为 $\varepsilon=\bar{e}_j/\bar{e}_1=56.4\%$ ，缓流断面的余能为 $\bar{e}_2/\bar{e}_1=43.6\%$ ， $\bar{e}_2+\bar{e}_j=\bar{e}_1$ ；在余能中 $\bar{h}_2/\bar{e}_2$ 高达96.6%， $\bar{h}_{v2}$ 仅为 $\bar{h}_{v1}$ 的1/64，在 $\bar{e}_2$ 中仅占3.4%。

(2) $F_1=3$ 急流断面 $\bar{e}_1$ 中流速水头尚占81.8%，为水深 h_1 的4.5倍，共轭水深比 $\lambda=3.77$ ，消能效率降为 $\varepsilon=25.6\%$ ，余能 e_2 为 e_1 的74.4%；但余能中位能仍占92.2%，动能仅占7.8%，缓流的流速水头 h_{v2} 已降为 h_{v1} 的1/14.2。

单从水跃的消能效率来看，低佛氏数水跃的消能效率不高，通过水跃只能消除急流含能的一小部分；同时从水跃改变水流含能组成的情况来看，低佛氏数水跃的作用仍显著，急流的大部分动能被转换为缓流的位能，缓流的流速降为急流流速的 $1/\lambda$ ， h_{v2} 降为 h_{v1} 的 $1/\lambda^2$ 。

从工程实践中水跃消能的任务或目标来看，在上下游水流衔接中，余能 e_2 为尾水位及选定的塘底高程所决定，所要求于二元水跃消除的能头即为 e_1-e_2 ，如图1所示意，低佛氏数水跃也完成了这个任务。当然，尚须注意跃尾断面的大尺度紊动和脉动，避免出现较大的波浪及较高的底流速。

2. 水跃的单位体积消能率

二元完整水跃的单位体积消能率无尺度数 $\bar{\eta}$ ，如式(16)及图2中的曲线所示， $\bar{\eta}$ 与 F_1 之间存在近似的线性关系。 $\bar{\eta}$ 值乘以相应的 $\sqrt{2gh_1}$ 而得 η 值，水跃的单位体积消能率愈大，所需的水跃消能塘的尺寸愈小，水跃的消能作用愈高。

以 $F_1=3、6、8$ 为例，各分别相应于三种急流水深： $h_1=1、2、4$ 米，计算相应的 η 值如下：

$F_2 \dots \dots \dots$		3	6	8
$\bar{\eta}$, 式(16) $\dots \dots \dots$		0.638	2.04	3.02
η (千瓦/米 ³)	$h_1 = 1$ 米	2.82	8.81	13.1
	$h_1 = 2$ 米	4.00	12.7	18.8
	$h_1 = 4$ 米	5.64	17.6	26.1
q (米 ³ /秒·米)	$h_1 = 1$ 米	9.4	18.8	25.1
	$h_1 = 2$ 米	26.6	53.1	70.9
	$h_1 = 4$ 米	75.2	150	200

当 F_1 及 h_1 为已知时, 相应的单宽流量 q 也就确定, 式(5)可改写为

$$q = (\sqrt{g} h_1^{1.5}) F_1 \quad (5a)$$

上例中将相应的 q 值也一并计算列入。

在上表的算例范围内, η 值为2.82~26.1千瓦/米³, 随 F_1 值及 h_1 (或 q)值的增大而增大, 其中以 F_1 值的影响为较大。

3. 水跃的平均能坡

在水跃长度范围内, 表面漩辊下的主流流速沿程递减, 因此可以定性地认为: 水跃的能坡线是陡度沿程递减的凹曲线。在实验资料很少的情况下, 取用水跃消失的能头 e_j 与水跃长度 L_j 之比, 作为水跃的平均能坡 i 进行讨论, 如式(17)所示。在图2中, i 与 F_1 的关系也接近于直线, i 值随 F_1 值同增大; 同样反映了水跃的消能作用随 F_1 值的增大而增大。

水跃的平均能坡 i 可与相同佛氏数的均匀急流能坡 i_0 进行对照比较; i_0 值按曼宁(Manning)公式计算并取 h_1 作为水力半径时, 可得

$$i_0 = gn^2 F_1^2 / h_1^{1/3} \quad (18)$$

式中 n 为糙率系数。由式(17)、(18), 可得比值 i/i_0 为

$$\frac{i}{i_0} = \frac{(\lambda-1)^2 h_1^{1/3}}{271 n^2 F_1^2 \lambda} \quad (19)$$

以 $n=0.014$ 为例时, 上式改为

$$\frac{i}{i_0} = \frac{18.8(\lambda-1)^2 h_1^{1/3}}{F_1^2 \lambda} \quad (19a)$$

仍以 $F_1=3、6、8$ 及 $h_1=1、2、4$ 米为例, 按式(17)计算 i 值及按式(19a)计算 i/i_0 值, 比较如下:

F_1		3	6	8
i , 式(17),		0.0763	0.222	0.324
i/i_0 , 式(19a)	$h_1 = 1$ 米	4.25	3.20	2.62
	$h_1 = 2$ 米	5.35	4.03	3.30
	$h_1 = 4$ 米	6.71	5.08	4.16

上表算例说明: i 值随 F_1 值同增大, 且具有近似的线性关系; $i > i_0$; q (或 h_1)值为常数时, 比值 i/i_0 随 F_1 值的增大而减小; F_1 为常数时, 比值 i/i_0 随 q (或 h_1)值同增大。上表算例范围内, i 值为1/13.1~1/3.1, i 值为相应 i_0 值的2.62~6.71倍。

均匀急流的能坡 i_0 与糙率系数 n 的平方成正比, 在流速较小不发生空蚀破坏的情况下, 有时也可采用人工加糙作为急流的消能措施之一, 例如筏道及鱼道工程。

以上从不同的方面对水跃的消能效果作了简要的讨论, 可以看出相互间存在密切的联系, 而跃首断面的急流佛氏数是最重要的参数。 F_1 值愈大, 水跃的消能效率及单位体积

消能率愈大，水跃的平均能坡愈陡，水跃改变水流含能组成的作用也愈大，见表1及图2。低佛氏数水跃的消能效率低，但改变水流含能组成的作用仍显著。

四、小 结

1.以跃首断面的急流水深 h_1 作为长度参数，对平底塘二元完整水跃进行全面的无尺度运算，用单一变量 F_1 或 λ 表达的无尺度运算式见式(1)~(17)，已汇列于表1；并统一制成了以 F_1 为横坐标的无尺度曲线图，如图2，可供直接检用。

2.当跃首断面的急流佛氏数 F_1 愈大，水跃的消能效率和单位体积消能率愈大，水跃的平均能坡愈陡，水跃改变水流含能组成的作用愈大。低佛氏数水跃的消能效率和单位体积消能率不高，水跃的平均能坡不陡，但改变水流含能组成的作用仍显著。

3.水跃的平均能坡大于相同佛氏数的均匀急流能坡，对于较光滑的混凝土过水表面，其比值在常用范围内为2~7。

参 考 文 献

- [1] B.A. Bakhmeteff and A.E. Matzke, "The Hydraulic Jump in Terms of Dynamic Similarity", Tran. ASCE, Vol.101, 1936.
- [2] 水利部教育司,《水工建筑物下游的消能问题》,水利出版社,1956.
- [3] R.H. Berryhill, "Stilling Basin Experiences of Corps of Engineers", Proc., ASCE, Vol.83, Journal of Hydr. Division, NO. HY3, June 1957.
- [4] E.A. Elevatorski,《Hydraulic Energy Dissipators》, 1959.
- [5] 陈椿庭, "平底槽二元水跃长度公式的比较",《水利水电技术》, 1964年第4期.
- [6] S.P. Garg and H.R. Sharma, "Efficiency of Hydraulic Jump, " proc, ASCE, Vol. 97, Journal of Hydr. Division, No. HY3, Mar, 1971.
- [7] 武汉水利电力学院,《水力学》, 1974.
- [8] 清华大学水利系,《水力学》, 1977.

适用于消能设计的水工计算尺

长江水利水电科学研究院 陈济生

提 要

水工建筑物消能设计, 无论采用底流、面流或挑流衔接方式, 都涉及一系列繁复的水力学计算。

下泄单宽流量 q 与消能前总能头 E_0 (或 S_0) 组成的无量纲值, 流能比 $q/(\sqrt{g} E_0^{1.5})$, 可用以表征下泄水流特性; 而下游相对水深则反映尾水衔接条件。

按流能比与坝下收缩断面相对水深、佛汝德数、水跃相对共轭水深的特定函数关系划分刻度制成计算尺, 可显著简化消能设计的演算过程。配合以流能比与相对尾水深度为座标的消能工适用范围图, 可以迅速分析推估衔接流态并选择合适的消能型式。

流 能 比 概 念

下泄单宽流量 q 与消能前总能头 E_0 (或 S_0) 组成的无量纲值 $K = q/(\sqrt{g} E_0^{1.5})$, 称之为流能比。可以用于表征下泄水流的特性。这一无量纲值与常用的佛汝德数保持特定的函数关系; 但由于 q 、 E_0 等值通常都是给定的, 不象 V_1 、 t_1 等尚待推求, 因而流能比的应用比较直观方便; 而且不象佛汝德数有很大的变化范围, 工程实践中遇到的许多消能水力学问题可以取流能比为座标, 紧凑地列成曲线图表进行分析对比^{[1]、[2]}。

按流能比对数尺及相应的坝下收缩断面相对水深、佛汝德数、水跃相对共轭水深等划分刻度制成的算尺, 能显著地简化消能设计的演算过程。配合一些以流能比与相对尾水深度为坐标的各类消能工的特性与适用范围图, 可以迅速分析估算各种衔接流态并选择合适的消能型式^[3]。

算 尺 结 构

算尺由定尺、滑尺及游标三部分组成, 均分正反两面 (见图16)。

算尺正面全部都是相互呈简单线性关系的常用对数尺。正面定尺分别配合滑尺可进行 $x = A^i B^m C^n$ (相当于 $\lg x = \lg A^i + \lg B^m + \lg C^n$) 类型的演算。如计算堰流泄水能力、挑流水舌射程、坝下局部冲刷深度和明渠均匀流动等 (见图1)。

正面诸定尺及滑尺的符号、含义、单位及相当于普通算尺的刻度名称见下表。其中01至04及09至017为上下定尺, 05至08为滑尺。

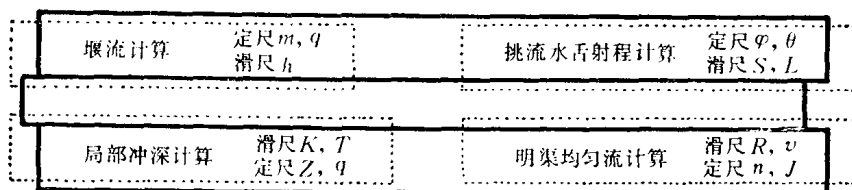


图 1

算尺编号	算尺符号	含 义	单 位	相当于普通算尺 刻 度 名 称	备 注
01	L	常用对数	(无)	L	
02	q	单宽流量	立米/秒/米	K	(始点前移 $\sqrt{g} = 3.13$)
03	m	堰流流量系数	(无)	K	(始点后移 $\sqrt{2} = 1.414$)
04	t_K	临界水深	米	A	
	A		(无)		
	E_0, H_0, Z	总水头、堰上水头、水头差	米	B	
	B	原型模型几何倍比	(无)		
05	S, L	挑坎上水头、坎高程挑距	米		
	V	明渠均匀流速	米/秒	K	
	K	冲深系数	$\sqrt{\text{米/秒}^2}$		
06	T	冲 深	米		
	R	明渠水力半径	米		
	$B^{1.5}$	原型模型单宽流量倍比	(无)	C'	
07	CL	C尺倒数	(无)		
08	C	原型模型流速倍比	(无)	C	
09	D	(≤ 1.0 时)流速系数	(无)	D	
	D		(无)		
10	v	流 速	米/秒	D	(始点前移 $\sqrt{2g} = 4.43$)
11	$Z(\leftrightarrow K)$	上下游落差	米	K^{-4}	
12	$q(\leftrightarrow T)$	单宽流量	立米/秒/米	K^2	
13	$D^5 = B^{2.5}$	原型模型流量倍比	(无)	$B^{2.5}$	
14	$J(\leftrightarrow v)$	水力坡降	(无)	A^2	
15	$n(\leftrightarrow R)$	糙 率	秒/米 $^{1/3}$	A	通常均不注单位
16	$\theta(\leftrightarrow L)$	挑 角	度	以 $2\sin 2\theta$ 值按 A 尺刻度	
17	$\varphi'(\leftrightarrow S)$	挑距计算系数	(无)	$A^{-0.5}$	

正面有些尺是一种刻度作为几种尺应用，运算时注意避免混淆。

背面上边定尺的基尺为流能比 $K = q/(\sqrt{g} E_0^{1.5})$ [或 $q/(\sqrt{g} S_0^{1.5})$] 的常用对数刻度尺。基尺上方为与流能比呈特定函数关系的消能诸参数的刻度尺(当 $\varphi = 1$ 时为精确值, $\varphi < 1$ 时为近似值)。包括基尺在内的上述诸尺都借背面滑尺 φ 而与算尺正面的 q (上定尺 02) 及 E_0 或 S (滑尺 05) 相关, 详见算尺用法。

背面诸尺集中在上方进行消能水力学计算。另有一些自然对数刻度尺; 其 LL_0 及 LL_0 为底数 $0.00005 \sim 0.999$ 间的刻度, 与正面滑尺 B 相互配合应用; 而 LL_1, LL_2, LL_3 为底数 $1.01 \sim 2.2 \times 10^4$ 间的刻度, 与正面滑尺 C 相互配合应用(图 2)。

背面滑尺 T 及 ST, S 为三角函数正切、正弦等的角度刻尺, 和普通计算尺完全一样,