

# 跌坎型底流消能工控制临底流速的跌坎最小深度

王海军, 杨红宣, 王立辉

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 跌坎型底流消能工的跌坎深度直接影响消力池内的水力学指标. 本文基于紊动射流理论, 以消力池中允许的最大临底流速为控制目标, 分析了跌坎的最小深度, 建立了跌坎最小深度的确定方法, 并通过水力学试验对该方法进行了验证.

**关 键 词:** 跌坎深度; 临底流速; 底流消能工; 紊动射流理论; 水力学试验

中图分类号: TV653

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)01-0078-04

## Minimum depth of falling-sill aiming at controlling underflow speed of falling-sill of falling-sill bottom-flow dissipation

WANG Hai-jun, YANG Hong-xuan, WANG Li-hui

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract:** The depth of falling-sill of falling-sill bottom-flow dissipation directly affects the hydraulic index of the energy dissipation pool. Based on the turbulent jet theory, in order to control the maximum underflow speed, a method for the minimum depth of falling-sill is deduced, and it is validated by hydraulic tests.

**Key words:** depth of falling-sill; underflow speed; bottom-flow dissipation; turbulent jet theory; hydraulic tests

坝下游消能方式主要有底流消能、挑流消能、面流消能和消力戽消能. 其中, 底流消能是常规的消能形式, 通过水跃产生漩滚和强烈的紊动以达到消能目的, 从而降低流速. 由于它具有入池流态稳定、消能效率高、尾水波动小、泄洪雾化影响小的特点, 工程中经常采用. 但高水头、大流量泄洪工程采用这种消能工时, 由于消力池底板临底流速较大, 底板的抗冲保护难度很大, 因此这种消能形式的研究和工程应用一直局限在中、低水头的泄水消能工程中. 如果在底流消能工中采取适当的措施, 降低消力池底板临底流速和脉动压强, 就能扩大应用范围. 分析底流消能机理及平面紊动射流的流速分布可知, 改变底流消能的入流方式和改进消力池的体形是行之有效的途径<sup>[1]</sup>.

跌坎型底流消能工是在常规底流消能工的基础上, 在消力池进口处, 将消力池底板向下开挖形成一跌

收稿日期: 2007-06-01

基金项目: 云南省自然科学基金项目(2006A0018M)

作者简介: 王海军(1961-), 男, 云南昆明人, 副教授, 硕士, 主要从事工程水力学的教学与科研工作.

E-mail: whjkmust@163.com

坎,向下开挖的垂直深度即为跌坎深度.在跌坎型底流消能工的消力池中(见图1),射流水流在消力池中的流速呈正态分布,在消力池进口处加一跌坎后,射流运动的断面面积增大,在射流主流到达底板之前,增加了射流的射程,根据流速分布图可知,距主流中心越远,水流速度越小,并且沿主流方向的流速随射流射程的增大而减小(以正态分布函数的趋势减小).这一特征在消力池中的前部尤为明显,因此加一跌坎可有效地减小临底流速.

跌坎深度直接影响消力池的临底流速、水流流态以及消能率.跌坎深度过大,下泄水流不易潜底,在消力池中形成面流或混合流,临底流速和底板脉动压力虽小,但表面流速和水面波动增大,消能效果差;跌坎深度过小,主流容易潜底,造成临底流速大,坎下局部区域存在强烈的横轴漩滚,对消能效果和消能工的安全稳定极为不利<sup>[2]</sup>.因此,本文对以消力池临底流速为控制目标对跌坎深度最小值进行了试验研究.

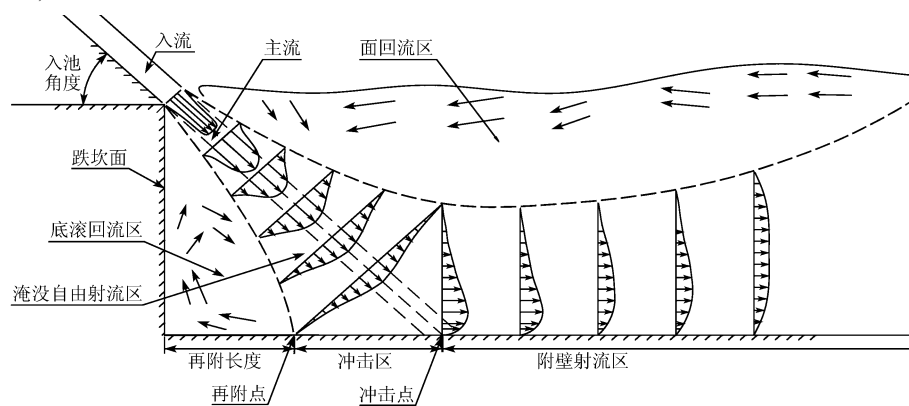


图1 跌坎式底流消能消力池中水流流速分布示意图

Fig. 1 Sketch of velocity distribution in stilling basin of bottom-flow dissipation

## 1 跌坎深度最小值的求解

跌坎型底流消能工消力池内水流流态为淹没紊动射流,池内水流流态见图1.根据紊动射流理论<sup>[3]</sup>,以消力池中允许的最大临底流速为控制目标,求解跌坎深度最小值.求解时假设:①射流水流入池后运动规律近似符合平面紊动射流理论,水流流速分布是力学相似的;②射流形成稳定底流消能后,消力池中水流流态、流速分布也相对稳定;③射流水流在消力池中的扩散近似按直线扩散<sup>[4-6]</sup>,其扩散角相对不变;④以射流自由扩散末端断面的最大流速 $u_M$ 为消力池中允许的最大临底流速.

如图2所示, $P$ 点为再附点,通过再附点与射流轴线垂直的断面即为射流自由扩散末端断面.此断面上的最大流速即为射流轴线上的流速 $u_M$ ,根据文献[4]可得射流轴线上流速:

$$u_M = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{K_0 \sigma}{x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: $K_0$ 为单位时间泄流的动量, $\rho K_0 = \rho u_0^2 h_c$ ;  $\sigma$ 为射流扩散系数; $x$ 为射流距离.可见,随着水流运动距离 $x$ 的增加,射流轴线上的流速 $u_M$ 逐渐减小.

根据假设条件及(1)式,并令 $u_{\max} = u_M$ ,建立淹没紊动射流的扩散方程:

$$x = \frac{3\sigma K_0}{4u_{\max}^2} \quad (2)$$

$$b = x \tan \theta_2 + \frac{h_c}{2} \quad (3)$$

式中: $u_{\max}$ 为最大临底流速; $b$ 为射流半宽; $\theta_2$ 紊动射流扩散角; $h_c$ 为收缩水深.

在假定射流入池角度  $\theta$  已知的前提下,联立求解(2)、(3)式(加之图 2 所示的几何关系  $d = |op| \cos \theta_1$ ,  $b = |op| \sin \theta_2 + \frac{h_c}{2}$ ),得跌坎深度最小值计算式:

$$d_{\min} = \frac{3\sigma K_0}{4u_{\max}^2} (\sin \theta + \operatorname{tg} \theta_2 \cos \theta) \quad (4)$$

$$\sigma = \left[ \frac{-h_c \operatorname{tg} \theta_2 + \sqrt{4(1 + (\operatorname{tg} \theta_2)^2)(d^2 + L^2) - h_c^2}}{2(1 + (\operatorname{tg} \theta_2)^2)} \right] \left/ \left( \frac{3K_0}{4u_{\max}^2} \right) \right.$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta - \operatorname{arctg} \left( \frac{L}{d} \right)$$

式中:  $\theta$  为入流角度;  $d$  为跌坎深度;  $L$  为再附长度(由试验确定)。

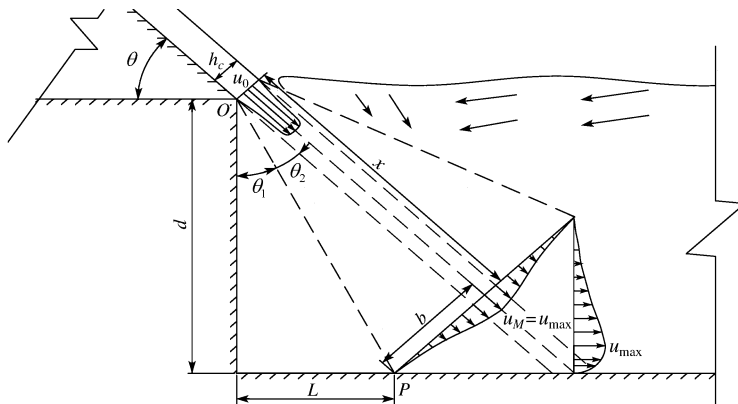


图 2 跌坎式底流消能消力池中水流扩散示意图

Fig. 2 Sketch of diffusion of flow in stilling basin of bottom-flow dissipation

需要说明的是,上述计算式是在令  $u_{\max} = u_M$  的基础上求得的射流长度  $x$  和射流半宽值  $b$ ,而实际上  $u_{\max} < u_M$ ,因此,  $x$  和  $b$  值都大于实际值.按(4)式计算得到的跌坎深度值大于实际所需的值,可以为降低消力池中水力学指标提供一定的富余度。

此外,消力池内的水深对跌坎深度也有一定的影响,随着消力池内水深的增加,主流到达底板时的流速会有所降低.其具体影响将另作研究。

## 2 试验及验证

采用水力学试验的方法,对云南某水电站跌坎型底流消力池的临底流速进行试验,分别测量了入池角度为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  及跌坎深度为 2、4、6 及 10 cm 等 14 个工况下的下泄流量及水头、入池水深、流速、特征断面流速和底板压力分布.通过(4)式计算自由扩散角  $\theta_2$  和射流扩散系数,然后对计算结果进行加权平均.初步计算时取射流扩散角  $\theta_2 = 16.5^\circ$ ,射流扩散系数  $\sigma = 2.7$ ,计算的跌坎最小深度与实际坎深的比较见表 1。

从表 1 可见,最小坎深的计算值与试验值基本吻合,计算值小于试验坎深,即按该法确定的跌坎深度能够保证消力池中临底流速控制在允许的范围內。

另外,在对某水电站溢洪道跌坎式底流消能工的优化中,利用该方法计算最大临底流速.工程要求消力池临底流速小于 20 m/s,计算得坎深为 6 m。

工况一,入池角度为  $0^\circ$ ,坎深为 6 m,入池流量为  $14\,782\text{ m}^3/\text{s}$  ( $p=0.2\%$ ),实测入池流速为 22.36 m/s,入池水深为 4.8 m,最大临底流速  $u_M$  为 15.43 m/s,用该方法计算的最大临底流速  $u_{\max}$  为 15.49 m/s。

工况二,入池角度为  $0^\circ$ ,坎深为 6 m,入池流量为  $17\,795\text{ m}^3/\text{s}$  ( $p=0.02\%$ ),实测入池流速为 23.15 m/s,

入池水深为 5.85 m,最大临底流速  $u_M$  为 17.54 m/s,用该方法计算的最大临底流速  $u_{\max}$  为 17.70 m/s. 可见,该方法具有较强的实用性.

表 1 跌坎最小深度的试验与理论计算结果比较  
Tab. 1 Comparison between experimental and calculated values

| 入池角度<br>/ (°) | 实际坎深<br>/ cm | 实测流量<br>/ (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ) | 实测入池流速<br>/ (m · s <sup>-1</sup> ) | 实测入池水深<br>/ m | 实测再附长度<br>/ m | 实测临底流速<br>/ (m · s <sup>-1</sup> ) | 计算最小坎深<br>/ cm |
|---------------|--------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|------------------------------------|----------------|
| 0             | 2            | 5.09                                                           | 2.121                              | 0.012         | 0.08          | 1.30                               | 1.9            |
| 0             | 4            | 5.70                                                           | 2.192                              | 0.013         | 0.12          | 1.13                               | 2.9            |
| 0             | 6            | 7.01                                                           | 2.504                              | 0.014         | 0.20          | 1.20                               | 3.7            |
| 15            | 2            | 3.62                                                           | 2.011                              | 0.009         | 0.04          | 1.69                               | 1.4            |
| 15            | 4            | 5.91                                                           | 2.463                              | 0.012         | 0.06          | 1.78                               | 2.5            |
| 15            | 6            | 6.04                                                           | 2.517                              | 0.012         | 0.08          | 1.30                               | 5.0            |
| 15            | 10           | 6.80                                                           | 2.615                              | 0.013         | 0.15          | 1.00                               | 9.8            |
| 30            | 2            | 2.64                                                           | 3.300                              | 0.005         | 0.03          | 1.17                               | 3.9            |
| 30            | 4            | 4.57                                                           | 2.856                              | 0.009         | 0.06          | 1.55                               | 3.7            |
| 30            | 6            | 5.06                                                           | 3.163                              | 0.008         | 0.07          | 1.62                               | 4.7            |
| 30            | 10           | 5.36                                                           | 3.350                              | 0.008         | 0.09          | 1.17                               | 10.0           |
| 45            | 4            | 2.64                                                           | 2.200                              | 0.006         | 0.03          | 1.18                               | 3.9            |
| 45            | 6            | 2.90                                                           | 2.900                              | 0.005         | 0.04          | 1.21                               | 5.3            |
| 45            | 10           | 4.02                                                           | 2.871                              | 0.007         | 0.07          | 1.34                               | 6.0            |

### 3 结 语

基于紊动射流理论,以临底流速为控制目标,求得求解跌坎最小深度的计算式,并用水力学试验进行了验证,算例结果表明该方法具有一定的实用性.

### 参 考 文 献:

- [1] 张功育,汤健,王海军,等. 跌坎式底流消能工的消能机理分析与研究[J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(6): 43-45.
- [2] 孙双科,柳海涛,夏庆福,等. 跌坎型底流消力池的水力特性与优化研究[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1188-1193.
- [3] Rajaratnam N. Hydraulic jump[J]. **Advances in Hydrosience**, 1967, 4: J97-280.
- [4] 张长高. 水动力学[M]. 北京: 高等教育出版社,1993: 842-856.
- [5] 刘沛清,李福田. 高坝下游水垫塘内典型流态演变问题探讨[J]. 水利学报, 2001, (10): 38-43.
- [6] 吕阳泉,李永祥,冬俊瑞. 水垫塘的水流特征和消能规律研究[J]. 长江科学院院报, 2001, (1): 10-12.

## 版 权 转 让 声 明

本刊已加入万方数据数字化期刊群(www.wanfangdata.com.cn)、中国知网(www.cnki.net)、维普资讯网(dx1.cqvip.com)和思博网—中文电子期刊服务(www.ceps.com.tw)等网站,并被中国核心期刊(遴选)数据库、中国期刊全文数据库等收录.凡本刊录用的稿件将同时通过因特网进行网络出版或提供信息服务,稿件一经刊用,将一次性支付作者著作权使用报酬(即包括印刷版、光盘版和网络版各种使用方式的报酬),作者将该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、汇编权等在全世界范围内转让给本刊,不再另行签署《论文著作权转让书》.若有异议,请在投稿时作文字说明,编辑部将酌情处理.

特 此 声 明

《水利水电工程学报》编辑部

2008 年 3 月 30 日

### 科技部项目“水利水电工程结构剪力测试系统升级改造” 顺利通过验收

2008 年 2 月 27 ~ 28 日,受科技部条件与财务司委托,水利部国际合作与科技司在南京组织专家召开了我院承担的科技部科研条件升级改造项目——“水利水电工程结构剪力测试系统升级改造(JG-2004-36)”验收会.来自科技部、水利部、清华大学、河海大学和江苏省水利厅等的验收专家组共计 10 余人,认真听取了项目组的执行情况总结报告、测试专家组的测试报告和财务专家的经费审核报告,审阅了验收文件,并进行了现场考察、质询和讨论.

该项目针对现有水利水电工程结构剪力测试系统集成差、精度相对较低、仪器数据控制系统不配套、维修困难、数据不兼容、试验对象尺寸较小等缺点,对原有水利水电工程结构剪力测试系统进行升级改造,旨在解决结构尺寸较大的模型加载和测控的技术难题,使之升级为精度高、稳定好、位移和荷载双控的液压伺服控制系统,实现加荷系统、稳压系统、数据处理、图像显示等微机全自动控制.

验收专家一致认为项目组完成了该项目原定的研究任务,达到了项目任务书规定的考核目标.通过升级改造,该测试系统实现了加荷系统、稳压系统、数据处理、图像显示等计算机全自动控制,可以进行多方向、多点、不同荷载形式和等级的复杂大型结构试验,具有灵活、便利、精度高的特点.项目组提交的验收资料齐全、数据详实完整,项目管理规范,经费使用合理,符合验收要求.

改造升级的水利水电工程结构剪力测试系统为开展复杂地基超高拱坝结构、穿越活动断层引水隧洞、高边坡稳定和加固机理、高碾压混凝土坝结构稳定等水利水电工程结构模型试验和理论研究提供技术支撑.

——摘自《南京水利科学研究院网站》(<http://www.nhri.cn>)