

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.04.006

高淹没度下平底宽顶堰流量计算问题探讨

袁新明,邓继军,祁国军

(扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009)

摘要 对高淹没度平底宽顶堰流量计算存在的问题进行研究,说明现有的 2 个基本计算公式之间存在较大的计算误差,通过分析大量的实测资料和试验资料,提出高淹没度下的淹没系数计算公式,并将计算值与实测资料进行比较,得出该公式计算的流量平均计算精度比现有的 2 个基本计算公式计算精度提高了 8%~13% 的结论。

关键词 平底宽顶堰 高淹没度 淹没系数 流量计算

中图分类号 :TV132+.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)04-0022-03

Problems in discharge calculation of broad-crested weirs with flat bottom under high submerged flows//YUAN Xin-ming, DENG Ji-jun, QI Guo-jun (College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)
Abstract :The problems in discharge calculation of broad-crested weirs with flat bottom under high submerged flows were studied. The differences between the existing two basic formulae for the discharge calculation were discussed. A new formula for calculating the submergence coefficient under high submerged flows was proposed based on analyzing the model test data and the measured data. The calculated resulted were compared with the measured ones. A conclusion is drawn that the precision of the proposed formula for the discharge calculation of broad-crested weir with flat bottom under high submerged flows is 8%-13% higher than that of the exiting two basic formulae.
Key words :broad-crested weir with flat bottom ; high submerged flow ; submergence coefficient ; discharge calculation

宽顶堰是平原地区水闸常采用的泄水建筑物,它的泄水能力计算是水利工程设计和工程管理中的重要问题。平原地区上下游水位差比较小,宽顶堰的泄流常处于高淹没泄流状态,淹没度对泄流能力有重要的影响。在高淹没度条件下过堰流流态复杂,流量计算受淹没度、流量系数、上下游水位的影响,过堰流量不易准确计算。高淹没度条件下,平底宽顶堰流量有 2 个常用的计算公式^[1],一些研究和实测数据表明^[2-3],在相同条件,2 个公式计算出的过堰流量相差 10% 以上,与实测资料有较大的误差。因此,有必要对平底宽顶堰高淹没条件下的流量计算进行深入的研究,以提高过堰流量计算的精度,保证过流建筑物的安全。

1 高淹没度平底宽顶堰过堰流量计算公式分析

根据理论和试验研究,当宽顶堰下游堰顶水深与上游堰顶总水头之比 $h_s/H_0 \geq 0.80$ 时,出闸流量开始受到下游水位的影响,此时为淹没堰流;当 $h_s/H_0 \geq 0.90$ 时,出闸流量受到下游高水位的影响比较

大,淹没系数急剧变小,称为高淹没堰流,宽顶堰淹没流态见图 1。

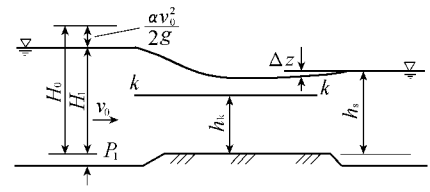


图 1 淹没堰流示意图

关于高淹没度宽顶堰流量计算,常用的计算公式有 2 个。第 1 个公式的形式为

$$Q = \sigma_s \epsilon m B \sqrt{2g} H_0^{3/2} \tag{1}$$

式中: σ_s 为淹没系数; ϵ 为侧收缩系数; m 为流量系数; B 为闸孔总净宽; H_0 上游堰顶总水头。对于多孔平底水闸,墩头系数为圆弧形时,侧收缩系数为

$$\epsilon = \frac{\epsilon_z (n - 1) + \epsilon_b}{n} \tag{2}$$

式中: ϵ_z, ϵ_b 分别为中孔和侧孔的侧收缩系数,其计算式见 SL265—2001《水闸设计规范》; n 为孔数。

对于堰顶为直角进口的有坎宽顶堰,其流量系

作者简介 袁新明(1958—),男,河南新野人,教授,博士,从事水工水力学研究。E-mail :xmyuan@yzu.edu.cn

数为^[4]

$$m = 0.32 + 0.01 \frac{3 - \frac{P_1}{H_1}}{0.46 + 0.75 \frac{P_1}{H_1}} \quad (3)$$

式(3)适用于 $0 \leq \frac{P_1}{H_1} \leq 3$, 当 $\frac{P_1}{H_1} > 3$ 时, $m = 0.32$ 对于平底宽顶堰 $P_1 = 0$, m 可取 0.385, 淹没系数可按式计算^[1]:

$$\sigma_s = 2.31 \frac{h_s}{H_0} \left(1 - \frac{h_s}{H_0} \right)^{0.4} \quad (4)$$

对于高淹没度 ($h_s/H_0 \geq 0.90$) 平底宽顶堰, 流量也可按另一个公式计算^[1]:

$$Q = \mu_s h_s B \sqrt{2g(H_0 - h_s)} \quad (5)$$

式中: μ_s 为宽顶堰淹没堰流综合流量系数, 一般采用式(6)计算:

$$\mu_s = 0.877 + \left(\frac{h_s}{H_0} - 0.65 \right)^2 \quad (6)$$

在相同条件下, 采用式(1)和式(5)计算的流量应该是相同的, 将式(5)比式(1), 可得到流量比:

$$R = \frac{\mu_s \sqrt{1 - \frac{h_s}{H_0}}}{\sigma_s \varepsilon m} \frac{h_s}{H_0} \quad (7)$$

式中: R 为流量比(无量纲量), 是 h_s/H_0 , μ_s , σ_s , ε 和 m 的函数, 在正确的情况下其值应为 1。对平底宽顶堰取 $m = 0.385$, 分别取 $\varepsilon = 0.95$, $\varepsilon = 0.97$, $\varepsilon = 1.00$, 根据 h_s/H_0 的变化可求出流量比值的变化, 结果见图 2。

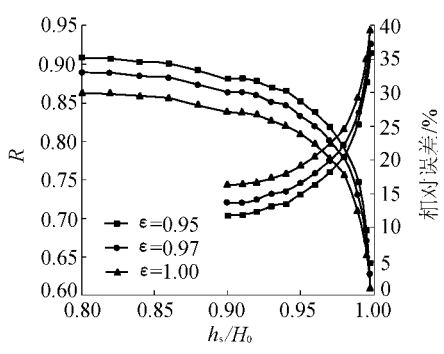


图2 式(5)与式(1)的流量比与误差变化

通过图 2 所示的流量比和相对误差变化可看出 对于流量计算, 式(1)和式(5)存在相当大的差异 当 $h_s/H_0 \geq 0.90$ 时, 泄流能力对淹没度非常敏感, 式(1)和式(5)计算流量的相对误差在 11% ~ 39% 之间, 随着淹没度的增加, 相对误差增大。从总体上看, 式(5)计算的流量比式(1)要小, 计算的闸室宽度比式(1)要大。那么影响流量计算准确性的因素是哪些呢? 从理论上讲, 式(1)和式(5)都是正确的, 只是形式上的不同。两者的主要区别是式(1)做

了堰上水头 $h = \xi H_0$ 的假定, 而式(5)认为堰上水深近似等于 h_s 。文献[5]认为: 宽顶堰流量系数变化小, 能满足工程设计的要求, 侧收缩系数变化也不大, 能准确计算。从式(7)看, 影响流量计算误差的主要因素是 σ_s 和 μ_s 。目前关于 σ_s 还没有准确的计算公式, 主要靠试验和实测资料归纳的经验公式。影响 σ_s 的因素除 h_s/H_0 值外, 还有过闸水头损失; 而 μ_s 除与 h_s/H_0 相关外, 主要还与 ε 和局部水头损失有关。式(1)的计算精度主要取决于 σ_s 的准确性 式(5)的精度主要受上下游水头差 ($H_0 - h_s$) 和 μ_s 的影响比较大, 在高淹没度条件下, 平底宽顶堰的上下游水位差很难确定。

为了说明 2 个流量公式的差别, 选取文献[6-11]中万福闸高淹没度下的实测流量资料, 分别按式(1)和式(5)进行计算, 结果见表 1。从表 1 看出, 在高淹没度条件下, 式(1)计算的流量偏大, 与实测值的最大误差接近 20%, 平均误差为 13.09%; 式(5)计算的流量偏小, 与实测值的最大误差为 16.51%, 平均误差为 8.44%。因此, 关于高淹没度条件下平底宽顶堰的流量计算需要进一步研究。

2 高淹没度平底宽顶堰淹没系数的推求

无论采用哪种公式计算过堰流量, 关键取决于流量参数的计算。式(5)计算值偏小, 对闸堰设计来说偏于保守和安全, 其计算难点在于确定上下游水头差 ($H_0 - h_s$) 和 μ_s 。式(1)计算形式简单, 其准确度取决于 σ_s 的变化。式(4)是 A P 别列辛斯基根据试验资料推求的计算公式, 在高淹没度情况下计算的 σ_s 偏大。周名德^[12] 根据治淮工程试验和一些资料推求了淹没系数公式:

$$\sigma_s = 2.28 \frac{h_s}{H_0} \left(1 - \frac{h_s}{H_0} \right)^{0.4} \quad (8)$$

式(8)的流量计算精度有所提高, 但在高淹没度情况下改进不大。

采用式(1)作为流量计算式, 将收集的 238 组实测资料^[6-11]和 17 组试验资料以及文献[12]治淮工程中的试验资料(共计 363 组数据)建立 σ_s 和 h_s/H_0 之间的关系, 并根据此关系确定 σ_s 的计算公式, 其关系曲线见图 3。从图 3 中看出, 在高淹没度条件下, σ_s 的试验值大于实测值; 式(4)和式(8)比较接近 A P 别列辛斯基和文献[12]的试验资料, 在 $h_s/H_0 \geq 0.9$ 后, 其值普遍大于实测值。在 $h_s/H_0 \geq 0.9$ 后曲线斜率较陡, 淹没系数随 h_s/H_0 急剧变化。 h_s/H_0 微弱的变化将引起 σ_s 较大的变化, 因而对流量计算产生较大的影响。鉴于此, 为弥补式(4)和式(8)在高淹没度情况下的不足, 根据资料拟合的淹没

表 1 万福闸实测流量资料与公式计算值对比表

上游 水位/m	下游 水位/m	上游 水深/m	淹没度 h_s/H_0	实测流量 $Q_{\text{计}}/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	式(1)和式(4)		式(5)和式(6)		式(1)和式(9)	
					$Q_{\text{计}}/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	相对误差	$Q_{\text{计}}/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	相对误差	$Q_{\text{计}}/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	相对误差
4.96	4.76	6.96	0.913	9660	10335.38	-6.99	8874.90	8.13	9592.96	0.69
4.83	4.67	6.83	0.935	7860	8910.86	-13.37	7537.97	4.10	8151.09	-3.70
4.68	4.51	6.68	0.932	7720	8764.14	-13.53	7438.05	3.65	8034.98	-4.08
5.74	5.71	7.74	0.97	7420	7981.69	-7.57	6417.86	13.51	7024.28	5.33
5.71	5.7	7.71	0.974	7170	7508.85	-4.73	5986.45	16.51	6561.04	8.49
5.62	5.60	7.62	0.972	7060	7584.61	-7.43	6012.28	14.84	6651.84	5.78
5.54	5.45	7.54	0.962	7040	8356.88	-18.71	6765.24	3.90	7441.90	-5.71
5.57	5.55	7.57	0.972	7020	7511.97	-7.01	5972.73	14.92	6588.13	6.15
3.72	3.53	5.72	0.914	6850	7607.58	-11.06	6528.64	4.69	7057.03	-3.02
5.38	5.30	7.38	0.965	6580	7833.50	-19.05	6314.21	4.04	6947.20	-5.58
5.51	5.44	7.51	0.969	6420	7666.30	-19.41	6150.59	4.20	6757.78	-5.26
5.01	4.95	7.01	0.968	6050	7015.58	-15.96	5657.06	6.49	6194.01	-2.38
4.86	4.80	6.86	0.968	5810	6788.25	-16.84	5462.93	5.97	5993.30	-3.15
4.68	4.65	6.68	0.972	5640	6213.69	-10.17	4975.50	11.78	5449.52	3.38
4.95	4.89	6.95	0.970	5610	6733.92	-20.03	5342.66	4.77	5926.18	-5.64
3.82	3.75	5.82	0.955	5400	6086.05	-12.70	4997.99	7.44	5465.71	-1.22
3.89	3.85	5.89	0.965	5080	5621.33	-10.66	4542.99	10.57	4985.31	1.86
4.10	4.05	6.10	0.967	5050	5770.93	-14.28	4659.80	7.73	5102.96	-1.05
4.03	4.00	6.03	0.970	4980	5477.73	-9.99	4390.36	11.84	4820.67	3.20
4.02	3.98	6.02	0.969	4920	5526.86	-12.33	4453.97	9.47	4871.89	0.98
3.64	3.58	5.64	0.963	4580	5356.86	-16.96	4327.74	5.51	4763.99	-4.02
4.22	4.20	6.22	0.977	4560	5150.99	-12.96	3999.49	12.29	4473.30	1.90
3.64	3.60	5.64	0.967	4540	5135.82	-13.12	4122.35	9.20	4541.36	-0.03
3.80	3.78	5.80	0.976	4200	4719.40	-12.37	3687.07	12.21	4107.22	2.21
3.05	3.00	5.05	0.969	3520	4225.28	-20.04	3403.08	3.32	3724.55	-5.81

注 相对误差 = $\frac{Q-Q_{\text{计}}}{Q} \times 100\%$,其中式(1)和式(4)的误差和为 -327.268,误差平均值为 -13.091 式(5)和式(6)的误差和为 211.08,误差平均值为 8.44 式(1)和式(9)的误差和为 -10.67,误差平均值为 -0.43。

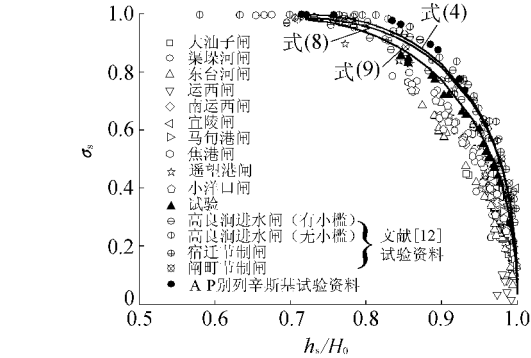


图 3 σ_s 和 h_s/H_0 之间的关系

系数为

$$\sigma_s = 2.42 \frac{h_s}{H_0} \left(1 - \frac{h_s}{H_0}\right)^{0.45} \tag{9}$$

式(9)与实测资料和试验资料拟合比较好,拟合的相关系数为 0.86。采用式(1)和式(9)计算的流量与实测值见表 1。从表 1 可以看出,在高淹没度条件下,用式(9)计算的流量与实测流量误差比较小,式(9)在 $0.9 \leq h_s/H_0 < 1.0$ 范围精度比较高。从表 1 中还可看出,在高淹没度情况下式(1)和式(4)计算的流量偏大,而式(5)和式(6)计算的流量偏小。

3 结 语

目前,宽顶堰流量计算大多采用室内的试验成果,与实际工程的泄流能力存在差异,特别是在高淹没度条件下,这种差异较大,影响到工程的安全和经济。本文分析了高淹没度平底宽顶堰主要流量计算公式的差异和误差,并根据试验和实测资料提出了高淹没度平底宽顶堰淹没系数的计算公式,所得成果与实测资料对比,其计算精度比现有的 2 个基本计算公式的计算精度提高了 8% ~ 13%。本文主要讨论高淹没度平底宽顶堰淹没系数的计算,式(9)的适用范围在 $0.9 \leq h_s/H_0 < 1.0$ 之间。

参考文献：

[1] SL265—2001 水闸设计规范[S].
[2] 陆德超,陆秋荣,刘效成,等.太浦闸泄流能力及初步验证分析[J].江苏水利,2004(1):13-15.
[3] 华子平.对淹没宽顶堰泄流能力计算公式的探讨[J].河海大学学报:自然科学版,1998,23(3):97-102.
[4] 吴持恭.水力学[M].3版.北京:高等教育出版社,2003.
[5] 张绍芳.堰闸水力设计几个问题综述[J].水利水电技术,1997,28(8):58-63.

(下转第 66 页)

具→完成操作。然后将合并后的曲面实体化,执行操作 选择合并后的曲面体→编辑中选择实体化→完成操作。

7 叶片的切割修型

由于叶片在造型中采用了虚拟上冠的方法,所以叶片上冠形状与原始模型有较大差别。将木模图中叶片工作面(或背面)中真实上冠的型线导入 Pro/E 中,并将其旋转,利用旋转面切割叶片上冠,切割后的叶片与木模图给出的原始叶片形状完全一致,执行操作 过转轮轴线和叶片下缘尖点做草绘面→导入叶片原始上冠型线,并沿轴线作中心线→退出草绘→点选右侧工具栏旋转工具→特征控制栏中点选作为实体旋转和去除材料→选择所要切割部分→完成操作。切割后的叶片如图 6 所示。

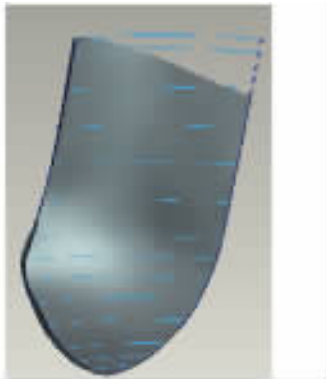


图 6 切割后的叶片

8 叶片进口边倒圆

对叶片进口边进行倒圆,具体操作如下:从工具栏中选择倒圆角工具,选取叶片进口边,在圆角类型中选择完全倒圆角,完成操作。如图 7 所示。这样,整个叶片的造型即已完成。



图 7 完整的叶片

9 结 论

a. 采用 AutoCAD 所提供的混流式水轮机叶片二维截面木模图,将其导入 Pro/E 生成三维立体图

形,数据之间传递较为方便,表达准确直观。

b. 针对叶片进口边和上冠交点不能直接导入的问题,采用叶片延展和虚拟上冠的方法,将叶片上部截面曲线延长,用木模图提供的原始上冠型线切割延展后的叶片,使切割后得到的叶片与原始模型相符。通过修改各截面曲线的形状,调整叶片表面的光滑性,可以较方便地得到平顺、光滑的叶片表面,有很强的可操作性和工程实用性。

c. 基于 Pro/E 的叶片三维准确造型,可为转轮内部流场的 CFD 计算和性能预测提供可靠的基础。

参考文献:

[1] 齐学义. 流体机械设计理论与方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
[2] 刘大恺. 水轮机[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
[3] 梁武科, 罗兴, 吴广宽. 混流式水轮机叶片自由曲面的延展[J]. 水利学报, 2003(5): 69-73.
[4] 齐学义, 江良荣, 张新杰, 等. 基于 PRO/E 的混流式水轮机叶片的三维造型[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(2): 41-44.
[5] 曹璧, 姚志民. 水轮机原理及水力设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
[6] 侯 华, 齐学义, 常一乐, 等. 基于 PRO/E 的水轮机转轮三维造型[J]. 排灌机械, 2006, 24(1): 14-16.

(收稿日期 2009-12-09 编辑 方宇彤)

(上接第 24 页)

[6] 江苏省水利厅. 淮河流域水文资料(1968 年第 5 卷第 4 册)[G]. 南京: 江苏省水利厅, 1969.
[7] 江苏省水利厅. 淮河流域水文资料(1974 年第 5 卷第 4 册)[G]. 南京: 江苏省水利厅, 1975.
[8] 江苏省水利厅. 淮河流域水文资料(1981 年第 5 卷第 4 册)[G]. 南京: 江苏省水利厅, 1983.
[9] 江苏省水利厅. 淮河流域水文资料(1975 年第 5 卷第 4 册)[G]. 南京: 江苏省水利厅, 1977.
[10] 江苏省水利厅. 淮河流域水文资料(1985 年第 5 卷第 4 册)[G]. 南京: 江苏省水利厅, 1986.
[11] 江苏省水利厅. 淮河流域水文资料(1986 年第 5 卷第 4 册)[G]. 南京: 江苏省水利厅, 1989.
[12] 周名德. 治淮闸坝工程水力学论文集[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.

(收稿日期 2009-03-01 编辑 方宇彤)

