

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220679

基于无因次相对断面比能规律的 台阶式泄槽水面线计算

张宝军, 赵国卫, 刘 乐, 由国栋, 张惠萍

(滨州市引黄灌溉管理服务中心, 山东 滨州 256600)

摘要: 针对台阶式溢洪道泄槽段沿程断面比能规律复杂且目前水面线计算方法适用范围有限、精度不高等问题, 为简化断面比能的复杂规律并由此提出一种可靠的水面线计算方法, 在水工模型试验的基础上引入相对断面比能并对其进行因次分析, 进而对无因次相对断面比能开展了系统的定性和定量研究。结果表明, 无因次相对断面比能的大小与相对临界水深、坡度及无因次位置有关, 无因次相对断面比能沿程呈较好的线性相关性; 基于定量研究结果给出了无因次相对断面比能计算的公式, 对其进行整理, 进而得出水面线计算的新方法。算例分析表明, 所得水面线计算经验公式精度高、适用范围广, 可为台阶式泄槽设计提供理论参考和技术支持。

关键词: 台阶式泄槽; 无因次相对断面比能; 规律; 水面线计算

中图分类号: TV135.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)02-0112-05

1 引言

台阶式消能工是通过底部加糙、水流横向旋滚、剧烈的紊动等来增强消能效果^[1], 其消能率明显大于光滑溢洪道, 能有效减小溢洪道出口流速和挑距, 避免对下游岸坡的冲刷, 在许多工程中常用作光滑溢洪道的修正方案^[2]。断面比能是溢洪道下泄水流的重要水力学参数, 在一定程度上可代表下泄水流的冲击能量, 但不能反映增设台阶后对断面比能的变化情况; 此外, 溢洪道上台阶的作用使泄槽段沿程断面比能规律复杂, 不便总结经验公式。水面线作为确定溢洪道边墙高度的重要依据, 其计算是台阶式溢洪道设计的重要内容之一。已有研究^[3-5]采用传统的光滑泄槽水力计算方法计算台阶式溢洪道水面线, 计算值与实测值越靠近下游相差越大, 需建立计算值与试验值之间的关系修正结果, 但目前尚无系统的修正公式。并且台阶式溢洪道泄槽段水面线沿程变化较为复杂, 难以准确定量计算, 目前仅研究了台阶式溢洪道上特征点处的水深计算问题^[6,7], 难以了解台阶式溢洪道沿程水深变化情况, 无法准确计

算溢洪道边墙的高度, 从而使沿程水面线计算方法受到适用条件限制。因此, 亟需寻求一种适用性较好的台阶式泄槽水面线计算方法。鉴于传统的光滑面溢洪道断面比能可直接计算, 本文将其与台阶式溢洪道的断面比能进行对比, 将其差定义为相对断面比能进行系统的定性和定量研究, 并基于无因次相对断面比能规律提出水面线计算经验公式, 旨在为台阶式溢洪道设计提供理论和技术支持。

2 试验设计、测量及计算方法

2.1 试验设计

考虑到台阶式溢洪道实际泄洪运行时出现的通常为滑行水流, 因此参考 YASUDA Y 等^[8]提出的公式, 选择试验单宽流量 q 和台阶高度 d , 以使试验流况均为滑行流。

$$\frac{h_k}{d} = \frac{1}{1.16 \tan^{0.165} \theta} \quad (1)$$

式中, h_k 为临界水深, m; d 为台阶高度, m; θ 为溢洪道坡度。

设计的物理模型试验共包括 5 种坡度 ($\theta =$

收稿日期: 2022-04-07, **修回日期:** 2022-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809105)

作者简介: 张宝军(1970-), 男, 高级工程师, 研究方向为水利工程建设管理, E-mail: zhangbj0543@163.com

通讯作者: 刘乐(1977-), 男, 工程师, 研究方向为水利工程建设管理, E-mail: 1248971411@qq.com

18.4°、29.1°、38.7°、51.3°、59.0°)、3 种台阶高度 ($d=0.017, 0.033, 0.067$ m)、3 种单宽流量 ($q=0.134, 0.194, 0.283$ m³/(s·m)) 共 45 个组合工况。试验系统由上游水箱、引水槽、缓坡段、台阶式泄槽段、平底消力池、回水渠和量水堰等组成,模型试验布置见图 1。为了便于观察流态,台阶式泄槽段及消力池段采用有机玻璃制作。

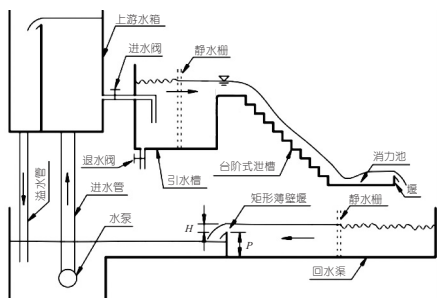


图 1 试验模型布置图

Fig. 1 Layout of the test model

2.2 测量方法

台阶式溢洪道的水深采用钢尺独立测量 3 次后取平均值,具体测量方法是在台阶凸角处沿垂直溢洪道底板方向量至自由水面。试验时在回水渠中安装矩形薄壁堰,在回水渠的外侧安装水位测针,采用雷伯克公式^[9]计算过堰流量。

由于试验中测量沿程水深时所选的断面间隔较大,无法据此判断准均匀流的形成位置,因此采用文献^[10]中公式估算下泄水流在台阶式溢洪道上形成准均匀流所需的垂直高度 $H_{\text{dam},u}$,再依据溢洪道坡度将其转化为所需的斜面距离 $L_{\text{dam},u}$:

$$L_{\text{dam},u} = H_{\text{dam},u} / h_k \approx 24 \sin^{2/3} \theta \quad (2)$$

2.3 计算方法

将相对断面比能 ΔE_s 定义为光滑溢洪道泄槽段某一位置的断面比能 $E_{s,g}$ 与台阶式溢洪道泄槽段同一位置的断面比能 $E_{s,t}$ 之差,即:

$$\Delta E_s = E_{s,g} - E_{s,t} \quad (3)$$

根据比能的定义,相对断面比能 ΔE_s 可进一步表示为:

$$\Delta E_s = h_g \cos \theta + \frac{\alpha v_g^2}{2g} - h_t \cos \theta - \frac{\alpha v_t^2}{2g} \quad (4)$$

式中, h_t 为计算断面处台阶式溢洪道上的水深, m; h_g 为对应的光滑溢洪道上的水深, m; v_t 为计

算断面处台阶式溢洪道上的流速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; v_g 为与台阶式溢洪道对应的光滑溢洪道上同一断面处的流速, m/s。

光滑溢洪道下泄一定单宽流量时的沿程水深采用分段求和法计算,具体计算方法参见《溢洪道设计规范》(SL 253-2018)^[11]。

3 台阶式溢洪道的无因次相对断面比能规律

3.1 断面比能规律的定性研究

台阶式溢洪道滑行流断面比能在非均匀流段内的沿程变化情况及各因素对其的影响见图 2。横坐标 L 表示台阶式泄槽段起点至某一断面的距离。由图 2 可知,断面比能在非均匀流段内沿程呈先增大后减小并趋于稳定的变化规律。在一定单宽流量及坡度下,若溢洪道长度足够且能使下泄水流在其中形成准均匀流,则准均匀流段水流的断面比能将保持不变。

不同因素对断面比能的影响规律为单宽流量和坡度两因素对断面比能的影响较大,这两个因素与断面比能之间均为正相关关系;台阶高度对断面比能也有一定的影响,但影响程度较单宽流量和坡度两因素有所减小,总体上与断面比能之间为负相关关系。

3.2 因次分析

台阶式溢洪道水流相对断面比能不仅受溢洪道水力要素及几何要素的影响,还与流体的物理性质等有关,函数关系为:

$$\Delta E_s = f(d, g, Q, B, b, \theta, L, \rho, \mu, \sigma) \quad (5)$$

式中, Q 为流量, m³/s; B 为溢洪道宽度, m; b 为台阶宽度, m; ρ 为流体密度, kg/m³; σ 为表面张力, N; μ 为动力粘度, N·s/m²。

试验水流为紊流,表面张力 σ 及动力粘度 μ 可忽略不计;此外,由于水流不可压缩、台阶宽度 b 可由台阶高度 d 和溢洪道坡度 θ 表示、单宽流量 q 可由流量 Q 和溢洪道宽度 B 表示,可将相对断面比能的函数关系式简化为:

$$f = f_1(\Delta E_s, d, g, q, \theta, L) \quad (6)$$

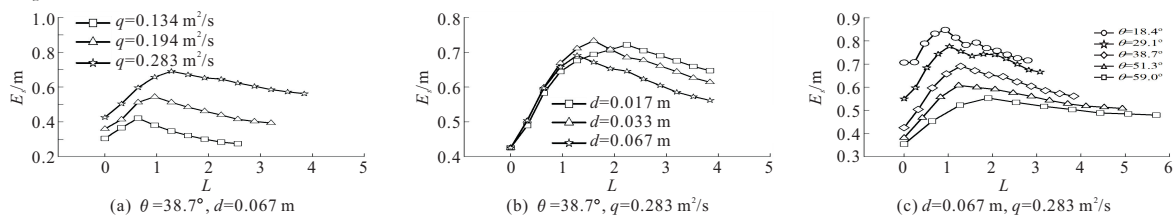


图 2 断面比能沿程变化情况及各因素对其的影响

Fig. 2 Change of specific energy along the spillway and the influence of various factors on it

选择 d 、 g 为基本物理量,则有 4 个无因次数,无因次数方程为:

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0 \quad (7)$$

其中 $\pi_1 = \Delta E_s / (d^{a_1} g^{b_1})$; $\pi_2 = q / (d^{a_2} g^{b_2})$

$\pi_3 = \theta / (d^{a_3} g^{b_3})$; $\pi_4 = L / (d^{a_4} g^{b_4})$

根据因次和谐原理,可得:

$$F\left(\frac{\Delta E_s}{d}, \frac{q}{d^{3/2} g^{1/2}}, \theta, \frac{L}{d}\right) = 0 \quad (8)$$

则相对断面比能公式可进一步表示为:

$$\Delta E_s / d = F_1(h_k / d, \theta, L / d) \quad (9)$$

其中 $h_k = \sqrt[3]{q^2 / g}$

3.3 无因次相对断面比能规律的定性研究

台阶式溢洪道滑行流无因次相对断面比能在非均匀流段内的沿程变化情况及各无因次因素对其影响见图 3。

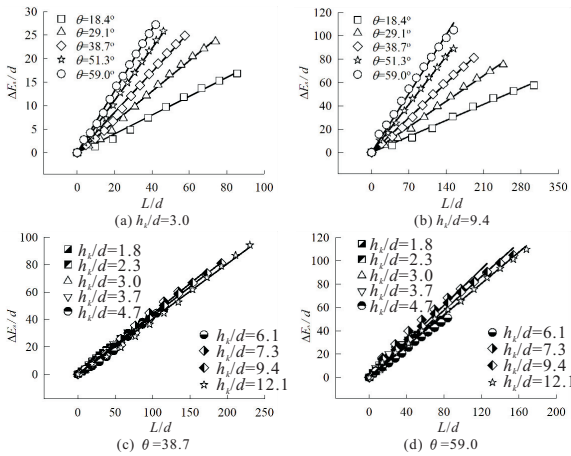


图 3 无因次相对断面比能沿程规律及各因素对其影响

Fig. 3 The law of dimensionless relative specific energy and the influence of various factors on it

由图 3 可知,在不同工况下,非均匀流段内的无因次相对断面比能与无因次位置之间均呈正线性相关关系,线性关系的决定系数最大值和最小值分别为 0.999 2、0.988 6,线性相关关系较强。

结合图 3 进一步分析,无因次相对断面比能与无因次位置之间线性关系的斜率与泄槽坡度 θ 之间亦呈正相关关系,当相对临界水深 h_k/d 分

表 1 不同 h_k/d 与 θ 组合下无因次相对断面比能与无因次位置之间线性关系的决定系数和斜率 k

Tab. 1 Determination coefficient and slope of linear relationship between dimensionless relative specific energy and dimensionless position under different h_k/d and θ combinations

参数	坡度 / (°)	h_k/d								
		1.8	2.3	3.0	3.7	4.7	6.1	7.3	9.4	12.1
决定系数	18.4	0.996 8	0.996 5	0.998 0	0.997 8	0.997 1	0.996 9	0.996 7	0.997 7	0.997 9
	29.1	0.998 1	0.997 8	0.998 2	0.999 1	0.997 9	0.997 4	0.996 8	0.998 3	0.998 2
	38.7	0.997 9	0.997 7	0.996 7	0.998 0	0.998 2	0.995 8	0.998 1	0.999 0	0.998 4
	51.3	0.995 1	0.997 8	0.998 3	0.994 5	0.997 5	0.999 4	0.996 7	0.999 2	0.999 0
	59.0	0.989 6	0.998 1	0.998 9	0.988 6	0.997 8	0.999 2	0.990 5	0.996 4	0.998 3
斜率 k	18.4	0.221 1	0.211 2	0.200 3	0.221 3	0.205 7	0.194 1	0.210 2	0.197 2	0.186 9
	29.1	0.352 9	0.346 8	0.326 1	0.344 7	0.325 2	0.314 8	0.316 7	0.313 8	0.307 4
	38.7	0.467 8	0.448 3	0.427 9	0.445 1	0.425 4	0.411 2	0.441 2	0.425 5	0.402 7
	51.3	0.622 1	0.593 9	0.554 6	0.617 2	0.577 8	0.501 1	0.620 3	0.589 3	0.541 1
	59.0	0.810 8	0.733 6	0.658 2	0.804 8	0.667 3	0.600 7	0.774 9	0.722 1	0.672 3

别为 3.0、9.4, θ 由 18.4° 增大至 59.0° 时,线性关系的斜率分别从 0.200 3、0.197 2 增大至 0.658 2、0.722 1,增大的百分比分别为 228.61%、266.18% (图 3(a)、(b))。无因次相对断面比能与无因次位置之间线性关系的斜率随 h_k/d 的增大整体呈现出一定的波动趋势,当泄槽坡度 θ 分别为 38.7° 、 59.0° , h_k/d 由 1.8 增大至 12.1 时,线性关系的斜率分别在 0.402 7~0.467 8、0.600 7~0.810 8 之间波动,但整体波动幅度不大 (图 3(c)、(d))。在其他相对临界水深及泄槽坡度情况下,无因次相对断面比能沿程规律及各因素对其影响与该结论类似。

3.4 无因次相对断面比能规律的定量研究

基于无因次相对断面比能与无因次位置之间较好的线性相关关系,无因次相对断面比能可表示为:

$$\Delta E_s / d = kL / d \quad (10)$$

$$k = f(h_k / d, \theta) \quad (11)$$

式中, k 为无因次相对断面比能沿程线性关系的斜率。

无因次相对断面比能沿程线性关系的决定系数在不同 h_k/d 与 θ 组合下的值见表 1。由表 1 可知,在所有试验工况下,无因次相对断面比能与无因次位置之间线性关系的决定系数最大值为 0.999 4,最小值为 0.988 6,平均值为 0.997 2,决定系数较高。

无因次相对断面比能沿程线性关系的斜率 k 在不同 h_k/d 与 θ 组合下的值见表 1。以表 1 中的 k 值为依据进行多元非线性回归分析,得出的斜率计算经验公式为:

$$k = -0.003 8 h_k / d + 0.761 3 \sin^2 \theta + 0.158 5 \quad (12)$$

式(12)的决定系数为 0.981 2。以式(12)算出的无因次相对断面比能沿程线性关系的斜率为纵坐标,以相应工况下通过试验得出的斜率为横坐标,对比 45 种工况下斜率计算值与试验值及斜

率计算值的相对误差情况,见图 4。

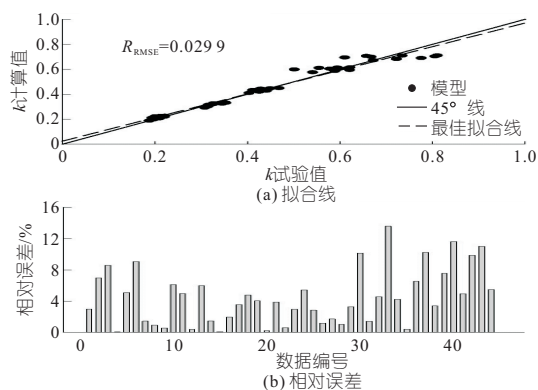


图 4 斜率计算值的误差

Fig. 4 Deviation of slope calculation value

由图 4 可知,分别以斜率 k 计算值及试验值为纵横坐标绘出的数据点的最佳拟合线与 45° 线几乎重合(图 4(a));与试验值相比,斜率 k 计算值相对误差的平均值、最大值、最小值分别为 4.51%、13.65%、0.09%,相对误差大于 10% 的工况比例仅为 11.08%。误差产生的原因是由于当台阶式泄槽坡度一定时,斜率随相对临界水深的增大呈现一定的波动,且波动幅度随泄槽坡度的增大略有增大,但整体上波动幅度较小;此外,采用基于试验数据回归分析经验公式得出的计算值与试验值本身亦不可避免地会产生一定误差。

利用式(12)计算的斜率精度较高,故将其代入式(10)可得无因次相对断面比能计算的经验公式:

$$\Delta E_s/d = (-0.0038h_k/d + 0.7613\sin^2\theta + 0.1585)L/d \quad (13)$$

3.5 基于无因次相对断面比能规律的水面线计算方法

根据相对断面比能的定义,对式(13)进行变形整理,可得台阶式溢洪道滑行流非均匀流段水面线的计算公式:

$$h_t \cos\theta + \alpha q^2 / (2gh_t^2) = h_g \cos\theta + \alpha q^2 / (2gh_g^2) + (0.0038h_k/d - 0.7613\sin^2\theta - 0.1585)L \quad (14)$$

采用式(14)计算台阶式溢洪道水面线时,先采用能量方程,根据分段求和法计算对应的光滑溢洪道水深;再采用试算法即可确定台阶式溢洪道上的水深。

4 算例

(1)算例 1。新疆某水电站台阶式溢洪道泄槽段宽 $B=9.0$ m,台阶高度 $d=1.0$ m,泄槽坡度 $\theta=38.7^\circ$,泄槽长度 $L=120$ m。试算该溢洪道在下泄流量 $Q=419.2$ m³/s 时泄槽非均匀流段的水面线。针对该算例中台阶式溢洪道按重力相似准则设计模型,模型比尺 $L_r=30$,模型的泄槽宽度 0.30 m,台阶高度 0.033 m,泄槽长度 4.0 m,试验流量 0.085 m³/s,相对临界水深为 6.05,泄槽段沿程实测水深依次为 0.110、0.091、0.082、0.076、0.081、0.082、0.085 m。

(2)算例 2。云南某水电站台阶式溢流坝陡槽段宽 $B=21.5$ m,台阶高度 $d=0.6$ m,泄槽坡度 $\theta=32.0^\circ$,泄槽长度 $L=103$ m。试算该台阶式泄槽在下泄流量 $Q=518.0$ m³/s 时非均匀流段的水面线。针对该算例中台阶式溢流坝按重力相似准则设计模型,模型比尺 $L_r=40$,陡槽段宽 0.54 m,台阶高度 0.015 m,泄槽坡度 32.0° ,泄槽长度 2.575 m,试验流量 0.051 m³/s,相对临界水深为 6.49,泄槽段沿程实测水深依次为 0.069、0.063、0.049、0.040、0.037、0.036、0.037 m。

将两个算例由水工模型试验实测所得水深值转换为原型水深,并将断面比能、相对断面比能及基于无因次相对断面比能规律的水面线方法计算出的水深值列于表 2。

由表 2 可知,算例 1、2 水深计算值与实测值的相对误差平均值分别为 3.72%、3.78%,最大相对误差分别为 6.44%、5.75%,均不超过 10%。因此,基于无因次相对断面比能规律得出的经验公式可较准确地算出台阶式溢洪道滑行流非均匀流段水面线。

表 2 算例计算结果

Tab. 2 Example calculation results

算例 1							算例 2						
流程长度/m	断面水深 实测值/m	对应的光滑泄槽水深/m	台阶式泄槽 断面比能/m	相对断面 比能/m	断面水深 计算值/m	相对误差/%	流程长度/m	断面水深 实测值/m	对应的光滑泄槽水深/m	台阶式泄槽 断面比能/m	相对断面 比能/m	断面水深 计算值/m	相对误差/%
0	3.291	3.29	12.78	0.00	3.291	0.00	0	2.740	2.74	6.26	0.00	2.740	0.00
19.2	2.715	2.24	16.36	7.52	2.792	2.84	3.4	2.522	2.17	7.05	1.05	2.435	3.44
38.4	2.462	1.84	19.06	15.07	2.545	3.37	17.0	1.956	1.45	9.98	5.34	1.879	3.96
57.6	2.286	1.61	21.08	22.62	2.399	4.94	39.6	1.609	1.08	13.86	12.48	1.535	4.62
76.8	2.416	1.47	22.00	30.18	2.341	3.10	61.1	1.461	0.92	16.15	19.27	1.407	3.73
96.0	2.462	1.37	22.17	37.73	2.331	5.32	83.8	1.436	0.83	17.04	26.44	1.365	4.96
115.2	2.545	1.30	21.36	45.28	2.381	6.44	103.0	1.468	0.78	16.63	32.50	1.384	5.75

5 结 论

a. 通过引入相对断面比能并对其进行因次分析,对无因次相对断面比能进行了系统的定性和定量研究,与断面比能规律相比,无因次相对断面比能规律明显较优。

b. 无因次相对断面比能与无因次位置之间呈正线性相关关系,线性关系决定系数的平均值为 0.997 2,决定系数较高;通过对无因次相对断面比能与无因次位置之间线性关系斜率值的多元非线性回归分析,给出了斜率计算的经验公式,决定系数为 0.981 2。

c. 在定量研究的基础上给出了无因次相对断面比能计算的经验公式,并基于此提出了水面线计算的新方法,两算例的水深计算值与实测值相对误差的平均值分别为 6.44%、5.75%,计算精度较高。

d. 所提出的基于无因次相对断面比能规律的台阶式泄槽水面线计算方法可为台阶式溢洪道泄槽段设计提供理论参考和技术支持,具有重要的理论意义与实用价值。

参 考 文 献:

- [1] 赵信峰,徐鹏. 某阶梯溢洪道与光滑溢洪道水力特性对比[J]. 水电能源科学,2017,35(9):77-80.
 [2] 余飞,张建民,聂境,等. V形阶梯溢洪道水力学特性

试验研究[J]. 水电能源科学,2012,30(5):69-72.

- [3] 张志昌,曾东洋,刘亚菲. 台阶式溢洪道滑行水流水面线和消能效果的试验研究[J]. 应用力学学报,2005,22(1):30-35.
 [4] 付奎,刘韩生,杨顺玉. 台阶式溢洪道滑掠水流水面线计算公式初探[J]. 人民黄河,2009,31(6):117-118.
 [5] 徐啸,张志昌. 台阶式溢洪道水力特性计算方法分析[J]. 西安理工大学学报,2011,27(2):239-243.
 [6] HUNT S L, KADAVY K C, HANSON G J. Simplistic design methods for moderate-sloped stepped chutes[J]. Journal of hydraulic engineering,2014,140(12): 04014062-1-04014062-15.
 [7] MEIRELES I, MATOS J. Skimming flow in the nonaerated region of stepped spillways over embankment dams[J]. Journal of hydraulic engineering,2009,135(8):685-689.
 [8] YASUDA Y, OHTSU I. Flow resistance of skimming flow in stepped channels[C]//Proceeding of the 28th biennial congress. Spillways and chute structures,1999:50-60.
 [9] 中华人民共和国水利部. 水工(常规)模型试验规程:SL 155-2012 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
 [10] BOES R M, HAGER W H. Hydraulic design of stepped spillways[J]. Journal of hydraulic engineering,2003,129(9): 671-679.
 [11] 中华人民共和国水利部. 溢洪道设计规范:SL 253-2018 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2018.

Calculation of Water Surface Profile of Stepped Chute Based on Dimensionless Relative Specific Energy Law

ZHANG Bao-jun,ZHAO Guo-wei,LIU Le,YOU Guo-dong,ZHANG Hui-ping

(Binzhou Yellow River Irrigation Service Center, Binzhou 256600, China)

Abstract: Aiming at the complicated law of specific energy along stepped chute and the low accuracy and limited application scope of current calculation method of water surface profile, a reliable method of calculating water surface profile was proposed. Based on hydraulic model test, this paper introduced the relative specific energy and made dimensional analysis. Then the dimensionless relative specific energy was systematically studied qualitatively and quantitatively. The results show that the dimensionless relative specific energy is related to the relative critical water depth, spillway slope and dimensionless position. The dimensionless relative specific energy has a good linear correlation along the stepped spillway. Based on the quantitative research results, the empirical formula of dimensionless relative specific energy calculation was given, and a new method of water surface profile calculation was obtained. The analysis of numerical example shows that the calculation method of water surface profile has high accuracy and wide application range, which can provide theoretical reference and technical support for the design of stepped chute.

Key words: stepped chute; dimensionless relative specific energy; law; water surface profile calculation