

网络出版时间:2014-07-30 16:13

DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.09.016

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.09.016.html>

梯形明渠临界水深直接计算公式研究

徐海嵩, 把多铎, 张国辉, 袁 璞

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 【目的】寻求梯形明渠临界水深的直接计算公式。【方法】针对梯形明渠临界水深传统计算方法计算过程复杂、误差大、适用范围小的缺点,以迭代法为基础,引入无量纲参数单位水面宽度,利用数值计算方法对梯形明渠临界水深的基本计算公式进行恒等变形,得到快速收敛的迭代公式,并对合适的迭代初值进行选取。【结果】提出了新的梯形明渠临界水深的直接计算公式,对其进行的误差分析结果表明,该公式计算临界水深的最大相对误差仅为 0.010%。【结论】与现有公式相比,新建立的梯形明渠临界水深直接计算公式计算精度高、适用范围广,可供工程实际参考应用。

【关键词】 梯形明渠; 临界水深; 计算公式; 单位水面宽度; 迭代方法

【中图分类号】 TV133

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2014)09-0206-05

Direct calculation formula for critical depth of trapezoidal open channel

XU Hai-song, BA Duo-duo, ZHANG Guo-hui, YUAN Pu

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to find a direct calculation formula for critical depth of trapezoidal open channel. 【Method】 Traditional method for calculating the critical depth of trapezoidal channel is complex, with large error and small application scope. Based on iterative methods, this article introduced dimensionless parameter unit surface width to conduct identical deformation to the basic formula of trapezoidal critical depth using numerical methods. The iterative formula with rapid convergence was obtained and the appropriate initial iterative values were selected. 【Result】 This study obtained a new formula to calculate critical depth of trapezoidal open channel directly. The maximum relative error of the proposed formula was 0.01%. 【Conclusion】 The obtained new formula for direct calculation of critical depth of trapezoidal open channel had high accuracy, wide application scope, and could be used in practical engineering application.

Key words: trapezoidal channel; critical depth; calculation formula; unit surface width; iterative method

梯形明渠是水利工程中一种常见的断面形式,主要用于农田灌排和城市供水等渠道的设计,较其他断面形式应用更为广泛^[1]。梯形明渠临界水深是水力计算中的重要参数之一^[1-6],通过临界水深和正常水深的计算设计渠道的断面尺寸,从而确定工程量,这将直接影响工程的经济效益。所谓临界水深

是指相应于断面单位能量最小值的水深^[7],该参数无法直接求解,而需求解一元高次方程^[4-6]。常见的求解方法有试算法、图解法、迭代法^[8]和近似求解法^[9]等,其中试算法和图解法费时费力,而且误差较大^[5,10]。

近年来,一些水利专家致力于梯形明渠临界水

【收稿日期】 2013-06-30

【基金项目】 国家科技支撑计划项目(2012BAD08B01)

【作者简介】 徐海嵩(1986—),男,陕西杨凌人,在读硕士,主要从事水工水力学研究。E-mail: xuhaison2007@126.com

【通信作者】 把多铎(1956—),男,甘肃永登人,教授,硕士生导师,主要从事水利水电工程研究。E-mail: baduoduo59@tom.com

深的研究,相继提出了几种直接计算临界水深的公式,如刘善综公式^[11],王正中等公式^[3,12]等。这些计算公式,往往引入无量纲参数即单位水面宽度^[13-16],并根据迭代原理,选取合适的迭代方程和迭代初值,从而可方便、快捷地计算出梯形明渠的临界水深。但是,这些计算公式从简捷性、计算精度等方面均存在不足^[5]。本研究在前人研究的基础上,对迭代公式和迭代初值进行细致地分析和推导,提出新的直接计算梯形明渠临界水深的公式,并对前人的公式进行了精度和误差分析,以期为梯形明渠临界水深的计算提供更为精确的计算方法。

1 临界水深的计算公式及迭代式

在推求临界水深时,大都引入无量纲参数“单位水面宽度”^[10],即临界水深(h_k)所对应的水面宽度与梯形渠道底宽的比值,用 λ 表示。其中, λ 等于1时,过水断面为矩形断面; λ 等于 $+\infty$ 时,过水断面为三角形断面^[6]。故梯形断面单位水面宽度取值范围为 $1 < \lambda < +\infty$,其值反映了梯形明渠断面过流时过水断面的相对形状^[5]。

于是有下面的等式:

$$\lambda = \frac{B_k}{b} = 1 + \frac{2m}{b} h_k. \quad (1)$$

由上式可得:

$$h_k = \frac{b}{2m} (\lambda - 1). \quad (2)$$

式中: λ 为单位水面宽度; B_k 为临界水深时对应的水面宽度; m ; b 为梯形渠道底宽; m ; m 为梯形渠道的边坡系数,非等腰梯形断面时 $m = (m_1 + m_2)/2$,其中 m_1 、 m_2 为梯形断面两侧边坡系数^[11]; h_k 为梯形渠道的临界水深, m 。

而明渠均匀流临界水深的计算公式^[7]为:

$$\frac{\alpha Q}{g} = \frac{A_k^3}{B_k}. \quad (3)$$

式中: α 为动能修正系数,取1.0; Q 为过流流量, m^3/s ; g 为重力加速度,取 $9.81 m/s^2$; A_k 为相应于临界水深时的过水断面面积, m^2 。

对于等腰梯形过水断面^[5-6],有

$$A_k = (b + mh_k) h_k, \quad (4)$$

$$B_k = b + 2mh_k. \quad (5)$$

将式(1)、(2)、(4)、(5)代入式(3)并整理得:

$$\frac{64m^3 \alpha q^2}{g b^3} = \frac{(\lambda^2 - 1)^3}{\lambda}. \quad (6)$$

式中: q 为单宽流量, $m^3/(s \cdot m)$, $q = \frac{Q}{b}$ 。

同流量、同底宽的矩形明渠临界水深 h'_k ^[10]为:

$$h'_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}. \quad (7)$$

为了与式(7)的形式相似,式(6)变为:

$$64k^3 = \frac{(\lambda^2 - 1)^3}{\lambda}. \quad (8)$$

式中: k 为与矩形明渠临界水深及梯形渠道坡度和底宽有关变量, $k = \frac{m}{b} \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}$ 。

将式(8)恒等变形并整理,得:

$$\lambda = \sqrt{4k\lambda^{1/3} + 1}. \quad (9)$$

然后,根据迭代原理,式(9)变为:

$$\lambda_{n+1} = \sqrt{4k\lambda_n^{1/3} + 1}. \quad (10)$$

式中: λ_n 为第 n 次求得的单位水面宽度值, λ_{n+1} 为第 $n+1$ 次求得的单位水面宽度值。

2 迭代公式的收敛性证明

采用迭代法计算时无法直接求解方程,一般需要进行试算才能求出迭代方程的解。但使用迭代法是有条件的,必须使推求的迭代公式收敛,这样才能保证计算值逼近所要求解的真值。因此,需首先对式(9)或式(10)进行敛散性判别,而本研究则需要证明式(9)或式(10)在区间 $1 < \lambda < +\infty$ 是收敛的,证明如下:

对于式(9),设 $\lambda = \varphi(\lambda)$,则

$$\varphi(\lambda) = \sqrt{4k\lambda^{1/3} + 1}, \quad (11)$$

$$\varphi^2(\lambda) = 4k\lambda^{1/3} + 1. \quad (12)$$

根据迭代理论,如果方程 $x = \varphi(x)$ 的1个根为 a ,则迭代公式 $x_{n+1} = \varphi(x_n)$ 收敛于 a 的条件是:在 a 的某一邻域 $|x - a| < \delta$ 内,使 $|\varphi'(x)| < 1$,那么该值域内任一点为初值的迭代都收敛于 a ,因此只要证明上式中的迭代函数 $\varphi(\lambda)$ 的一阶导数的绝对值小于1,就可以证明该迭代函数是收敛的^[5]。

因此,对式(11)两边求导,得:

$$\varphi'(\lambda) = \frac{1}{6\sqrt{4k\lambda^{1/3} + 1}} \cdot \frac{4k\lambda^{1/3}}{\lambda}. \quad (13)$$

将式(11)、(12)代入式(13)中得:

$$\varphi'(\lambda) = \frac{1}{6} \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \right). \quad (14)$$

继续对 $\varphi'(\lambda)$ 求二阶导数,可得:

$$\varphi''(\lambda) = \frac{1}{3\lambda^3}.$$

由二阶导数可知,当 $\lambda \in (1, +\infty)$ 时, $\varphi''(\lambda) \in (0, 0.33)$,即二阶导数大于零,迭代函数在其定义域

内单调。当 $\lambda = 1$ 时, $\varphi'(\lambda) = 0$; 当 $\lambda = +\infty$ 时, $\varphi'(\lambda) = 0.17$ 。因此, 根据夹逼定理, 当 $\lambda \in (1, +\infty)$ 时, $\varphi'(\lambda) \in (0, 0.17)$, 故 $|\varphi'(\lambda)| < 1$ 。

综上所述, 对于任意的 $\lambda \in (1, +\infty)$, 迭代公式(9)是收敛的。同理, 可以证明式(10)也是收敛的。

3 迭代初值的合理选取和临界水深的直接计算

对于迭代计算, 其收敛速度不仅与迭代公式有关, 而且与迭代初值的选取也有关^[5], 且迭代初值的选取更为重要, 选取合理的迭代初值会加速迭代计算的收敛速度。对式(8)作恒等变形, 即可得出迭代初值。

由式(8)得:

$$\lambda^5 = \frac{64k^3}{\left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right)^3}.$$

$$\text{即 } \lambda = \frac{(4k)^{0.6}}{\left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right)^{0.6}}. \quad (15)$$

由于 $\lambda \in (1, +\infty)$, 当 λ 趋近于正的无穷大时, $\lambda = (4k)^{0.6}$, 并以此作为迭代函数的初值, 即 $\lambda_0 = (4k)^{0.6}$ 。将 λ_0 代入式(9), 可得

$$\lambda = \sqrt{4k[(4k)^{0.6}]^{1/3} + 1} = \sqrt{(4k)^{1.2} + 1}. \quad (16)$$

将式(16)代入式(9)并整理, 得:

$$\lambda = \sqrt{4k[(4k)^{1.2} + 1]^{1/6} + 1} = \sqrt{[(4k)^{7.2} + (4k)^6]^{1/6} + 1}. \quad (17)$$

为提高计算精度, 可将式(17)代入式(9)并整理, 得:

$$\lambda = \sqrt{4k\{[(4k)^{7.2} + (4k)^6]^{1/6} + 1\}^{1/6} + 1}. \quad (18)$$

将式(17)或式(18)代入式(2), 得:

$$h_k = \frac{b}{2m} \left(\sqrt{[(4k)^{7.2} + (4k)^6]^{1/6} + 1} - 1 \right), \quad (19)$$

或 $h_k =$

$$\frac{b}{2m} \left(\sqrt{4k\{[(4k)^{7.2} + (4k)^6]^{1/6} + 1\}^{1/6} + 1} - 1 \right). \quad (20)$$

通过式(19)或式(20)可直接计算梯形明渠的临界水深, 其中式(20)较式(19)计算的结果更加精确, 然而在一般的工程实际中, 式(19)的计算精度已经可以满足工程实际的要求。

4 临界水深直接计算公式的精度分析

4.1 几种常见的临界水深直接计算公式描述

国内外计算梯形明渠临界水深的的方法和公式很

多, 但从准确性和间接性等方面考虑, 有 4 套公式相对较好, 分别如下所示。

①王正中等^[3,12]公式:

$$y = \frac{\sqrt{1 + k_w(1 + k_w)^{0.2} - 1}}{2}. \quad (21)$$

式中: $k_w = \frac{4m}{b} \sqrt{\frac{\alpha q^2}{g}}$, $h_k = \frac{b}{m} y$, 其中 m, b, q, g, α, h_k

符号意义同前, x, y 均为无量纲参数。

②廖云凤^[16]公式:

$$y = k_l(1 + k_l)^{-0.372}. \quad (22)$$

式中: $k_l = \frac{m}{b} \sqrt{\frac{\alpha q^2}{g}}$, $h_k = \frac{b}{m} y$ 。

③刘善综^[11]公式:

$$x^3 = \sqrt{k_s[k_s + (k_s + 1)^{-0.2}]^{0.2} + 1}, \quad (23)$$

$$\text{或 } x^3 = \sqrt{k_s\{k_s[k_s + (k_s + 1)^{-0.2}]^{0.2} + 1\}^{1/6} + 1}. \quad (24)$$

式中: x 为无量纲参数, $k_s = \frac{4m}{b} \sqrt{\frac{\alpha q^2}{g}}$, $h_k = \frac{b}{2m}(x^3 - 1)$ 。

④赵延风等^[5]公式:

$$x = \sqrt{(k_z + k_z^{1.2})^{1/6} + 1}, \quad (25)$$

$$\text{或 } x = \sqrt{[k_z + k_z(k_z + k_z^{1.2})^{1/6}]^{1/6} + 1}. \quad (26)$$

式中: $k_z = \left(\frac{64\alpha m^3 q^2}{g b^3}\right)^2$, $h_k = \frac{b}{2m}(x - 1)$ 。

⑤本研究公式:

$$\lambda = \sqrt{[(4k)^{7.2} + (4k)^6]^{1/6} + 1}, \quad (27)$$

$$\text{或 } \lambda = \sqrt{4k\{[(4k)^{7.2} + (4k)^6]^{1/6} + 1\}^{1/6} + 1}. \quad (28)$$

式中: $k = \frac{m}{b} \sqrt{\frac{\alpha q^2}{g}}$, $h_k = \frac{b}{2m}(\lambda - 1)$ 。

4.2 临界水深直接计算公式的误差分析

由以上的 5 个公式中的 k 值可以看出 $k_w = k_s = 4k$, $k_l = k$, $k_z = (64k^3)^2$, 给出单位水面宽度 $\lambda = 0.001 \sim 100$ 的值, 由式(9)求出 λ 值, 进而求出 λ_w 、 k_l 、 k_s 、 k_z , 再根据上述 5 个公式计算各自的临界水深及其相对误差, 计算结果如图 1 所示。其中, 图 1-a、b 为 $1 < \lambda \leq 10$ 和 $10 \leq \lambda \leq 100$ 时, 梯形明渠临界水深 5 种不同计算公式的相对误差分析结果。由于图 1-b 中廖云凤公式计算的相对误差随单位水面宽度 λ 的增加而增大, 为了进一步直观分析, 图 1-c 为 $10 \leq \lambda \leq 100$ 时除去廖云凤^[16]公式后所对应的分析结果, 图 1-d 为 $1 < \lambda \leq 10$ 时刘善综^[11]公式、赵延风等^[5]公式和本研究公式所对应的分析结果。

图 1-a、b、c 和 d 能够清晰地反映出临界水深的

相对误差变化,但要确切的分析,还需通过具体的数据加以说明。因此,表 1 给出了梯形明渠临界水深相对误差的计算结果。对表 1 进行统计和分析,得

到梯形明渠临界水深计算最大和最小相对误差,结果如表 2 所示。

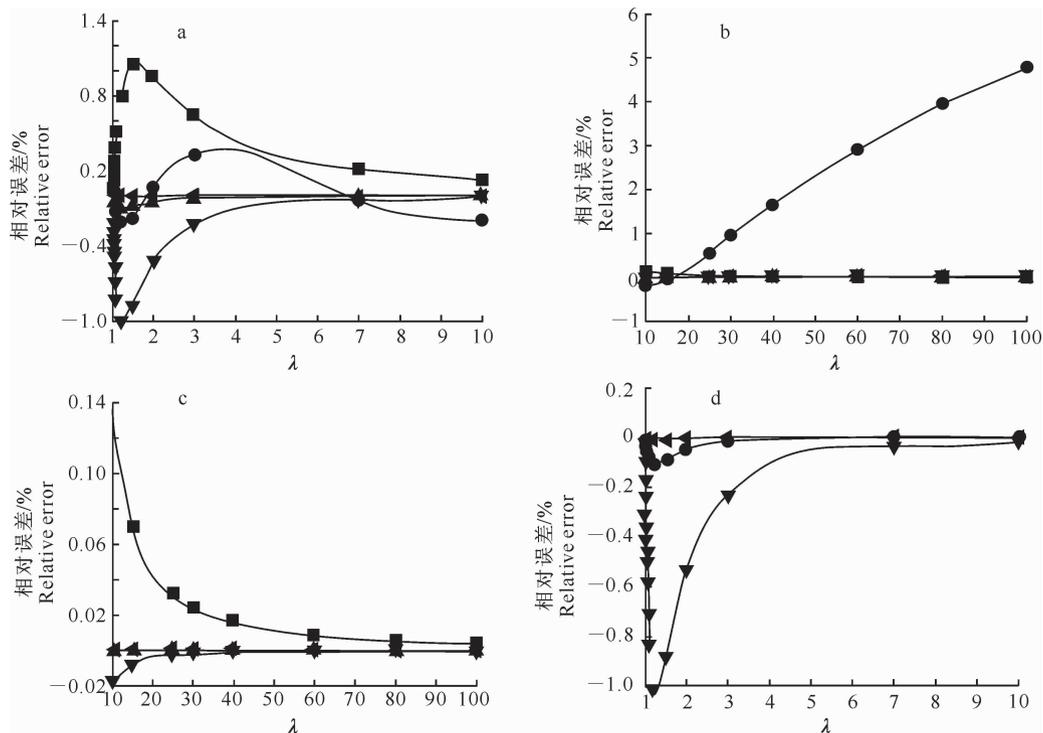


图 1 梯形明渠临界水深不同计算公式相对误差的变化

—■—, 王正中等公式; —●—, 廖云凤公式; —▲—, 刘善综公式; —▼—, 赵延凤等公式; —◄—, 本研究公式

Fig. 1 Relative errors of different formulas to calculate critical depth of trapezoidal open channel

—■—, Wang Z Z, et al formula; —●—, Liao Y F formula; —▲—, Liu S Z formula; —▼—, Zhao Y F, et al formula; —◄—, This study

表 1 利用不同公式计算梯形明渠临界水深的相对误差比较

Table 1 Relative errors of different formulas to calculate critical depth of trapezoidal channel

单位水面宽度(λ) Unit surface width	中间变量(k) Middle variable	相对误差/% Relative error				
		王正中等公式 (式(21)) Wang Z Z, et al formula	廖云凤公式 (式(22)) Liao Y F formula	刘善综公式 (式(23)) Liu S Z formula	赵延凤等公式 (式(25)) Zhao Y F, et al formula	本研究公式 (式(27)) This study
1.001	0.001	0.007	0.002	0.001	0.024	0.000
1.005	0.003	0.033	0.010	0.007	0.100	0.001
1.010	0.005	0.065	0.019	0.013	0.179	0.002
1.020	0.010	0.126	0.036	0.024	0.309	0.003
1.035	0.018	0.211	0.061	0.039	0.461	0.005
1.050	0.025	0.289	0.083	0.052	0.581	0.006
1.100	0.051	0.504	0.143	0.083	0.834	0.008
1.200	0.104	0.784	0.210	0.108	1.014	0.010
1.500	0.273	1.044	0.180	0.092	0.880	0.009
3.000	1.387	0.641	0.334	0.014	0.232	0.002
7.000	6.273	0.211	0.046	0.001	0.038	0.000
10.000	11.488	0.126	0.199	0.000	0.018	0.000
15.000	22.707	0.069	0.091	0.000	0.008	0.000
25.000	53.351	0.032	0.569	0.000	0.003	0.000
40.000	116.888	0.015	1.659	0.000	0.001	0.000
60.000	229.829	0.008	2.906	0.000	0.000	0.000
100.000	538.555	0.004	4.787	0.000	0.000	0.000

由表 2 并结合各种临界水深的直接计算公式和

相对误差分析结果(图 1),从公式的简捷性、各自适

用范围内的误差大小等方面进行比较,表明王正中
等^[3,12]公式和廖云凤^[16]公式形式简单,相对误差较
大;刘善综^[11]公式和赵延风等^[5]公式形式比较复

杂,但相对误差较小;而本研究公式形式复杂,但相
对误差最小。由于本研究公式精度较高,因此可用
于精度要求较高的临界水深的计算。

表 2 梯形明渠临界水深 5 种公式计算误差分析结果($1 < \lambda \leq 100$)

Table 2 Relative errors of 5 formulas to calculate critical depth of trapezoidal open channel($1 < \lambda \leq 100$)

项目 Items	王正中等公式 (式(21)) Wang Z Z, et al formula	廖云凤公式 (式(22)) Liao Y F formula	刘善综公式 (式(23)) Liu S Z formula	赵延风等公式 (式(25)) Zhao Y F, et al formula	本研究公式 (式(27)) This study
最大相对误差/% The maximal relative error	1.044	4.787	0.108	1.014	0.010
最小相对误差/% The minimal relative error	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000
最小相对误差对应的 λ The minimum relative error correspond λ	100.000	1.001	10.000	60.000	7.000

5 结 论

在前人研究基础之上,本研究提出了新的梯形
明渠临界水深直接计算公式,并对公式计算结果的
相对误差进行了分析,发现在相同单位水面宽度值
下,用本研究新建立的公式求得临界水深的相对误
差均小于其他几个公式,最大相对误差仅为
0.010%,不但适用范围广,而且还能够应用于精度
要求较高的梯形明渠临界水深的计算。本研究新建
立的公式虽然较其他几个公式复杂,但是借助计算
器还是比较易于计算的,可用于工程实际设计中。

[参考文献]

- [1] 李兴印,卢军启,杨玲霞. 梯形断面明渠临界水深计算方法新探 [J]. 科技创新导报, 2009, 29(3): 130-131.
Li X Y, Lu J Q, Yang L X. New study on the calculation method of critical depth of open channel with trapezoidal section [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009, 29(3): 130-131. (in Chinese)
- [2] 苏鲁平. 梯形明渠临界水深解法述评 [J]. 人民长江, 1995, 26(5): 39-41.
Su L P. Commentary on solutions for critical depth in a trapezoidal channel [J]. Yangtze River, 1995, 26(5): 39-41. (in Chinese)
- [3] 王正中,袁 驹,武成烈. 再论梯形明渠临界水深计算方法 [J]. 水利学报, 1999(4): 14-17.
Wang Z Z, Yuan S, Wu C L. Again discussion on calculation method of critical depth for trapezoidal open channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(4): 14-17. (in Chinese)
- [4] 王正中,陈 涛,万 斌,等. 明渠临界水深计算方法总论 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2006, 34(1): 155-161.
Wang Z Z, Chen T, Wan B, et al. Calculation method on critical depth of open channel with trapezoidal cross section [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2006, 34(1): 155-161. (in Chinese)
- [5] 赵延风,王正中,张宽地. 梯形明渠临界水深的直接计算方法 [J]. 山东大学学报:工学版, 2007, 37(6): 99-105.

- Zhao Y F, Wang Z Z, Zhang K D. Direct calculation method for the critical depth of an open trapezoidal channel [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2007, 37(6): 99-105. (in Chinese)
- [6] 赵延风,祝晗英,宋松柏,等. 论梯形明渠临界水深的精确计算公式 [J]. 长江科学院学报, 2009, 26(4): 18-21.
Zhao Y F, Zhu H Y, Song S B, et al. Discussion on the precise calculation formula of critical depth for trapezoidal [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(4): 18-21. (in Chinese)
- [7] 吴持恭. 水力学上册 [M]. 4 版. 北京:高等教育出版社, 2008: 221-224.
Wu C G. Hydraulics part 1 [M]. 4th edition. Beijing: Higher Education Press, 2008: 221-224. (in Chinese)
- [8] 葛节忠,陈雪峰,黄建平. 用迭代法计算明渠均匀流水深和临界水深 [J]. 水利水电技术, 2006, 37(1): 75-78.
Ge J Z, Chen X F, Huang J P. Calculation on uniform flow depth and critical depth of open channel with iterative method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(1): 75-78. (in Chinese)
- [9] 袁镒吾. 明渠梯形断面临界水深的近似计算公式 [J]. 应用力学学报, 1992, 9(2): 149-152.
Yuan Y W. An approximate formula for calculation critical depth of open channel flow in trapezoidal cross-section [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1992, 9(2): 149-152. (in Chinese)
- [10] 王正中,冯家涛,胡彦华. 梯形明渠临界水深计算公式的改进 [J]. 水利学报, 1996(1): 85-87.
Wang Z Z, Feng J T, Hu Y H. A method for calculating critical water depth of open channel with trapezoid section [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(1): 85-87. (in Chinese)
- [11] 刘善综. 梯形渠道临界水深的计算及讨论 [J]. 水利学报, 1995(6): 83-85.
Lu S Z. Calculation and discussion of critical depth of trapezoidal channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(6): 83-85. (in Chinese)

(3):58-61. (in Chinese)

- [16] 雷晓燕, G Swoboda, 杜庆华. 接触摩擦单元的理论及其应用 [J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3):23-32.
Lei X Y, Swoboda G, Du Q H. Theory and application of contact-friction interface element [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3):23-32. (in Chinese)
- [17] 国家电力公司西北勘测设计研究院. 黄河公伯峡水电站工程

混凝土面板堆石坝设计说明 [R]. 西安: 国家电力公司西北勘测设计研究院, 2001.

Northwest Institute of Survey and Design of Hydropower Engineering. Design notes of Yellow River Gongboxia hydropower project CFRD [R]. Xi'an: Northwest Institute of Survey and Design of Hydropower Engineering, 2001. (in Chinese)

(上接第 205 页)

- [10] 水利部长江水利委员会. SL44-93 水利水电工程设计洪水计算规范 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1993:7.
Yangtze River Water Resources Commission, Ministry of Water Resources. SL44-93 Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects [S]. Beijing: China Water & Power Press, 1993:7. (in Chinese)
- [11] 费永法. 历史特大洪水对设计洪水频率曲线参数及设计值的影响 [J]. 水力发电学报, 1999(4):1-7.
Fei Y F. The effect of historical flood events on design flood [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1999(4):1-7. (in Chinese)
- [12] 周 芬. 设计洪水估算方法的比较研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004:12-15.
Zhou F. Comparative study on design flood estimating methods [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004:12-15. (in Chinese)
- [13] William L L, Timothy A C. Expected moment algorithm for flood frequency analysis [C]//Chenchayya B. The north American water environment congress & destructive water. USA: ASCE, 1996:2185-2190.

- [14] Timothy A C, William L L. An algorithm for computing moments-based flood quantile estimates when historical flood information is available [J]. Water Resources Research, 1997, 33(9):2089-2096.
- [15] John F, England J, Jose' D. Comparisons of two moments-based estimators that utilize historical and paleoflood data for the log Pearson type III distribution [J]. Water Resources Research, 2003, 39(9):1243-1259.
- [16] 王俊珍, 宋松柏. 具有历史洪水资料的期望矩法参数估计研究 [J]. 水力发电学报, 2014(2):8-18.
Wang J Z, Song S B. Expected Moments Algorithm Method for parameters estimation with consideration of historical flood [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014(2):8-18. (in Chinese)
- [17] 邢大韦. 提高水患意识加强陕西防洪工作 [J]. 西北水资源与水工程, 2000, 11(3):32-38.
Xing D W. Enhance flood disaster consciousness afforded flood-controlling working [J]. Water Resources & Water Engineering, 2000, 11(3):32-38. (in Chinese)

(上接第 210 页)

- [12] 王正中. 梯形明渠临界水深计算公式探讨 [J]. 长江科学院院报, 1995, 12(2):78-80.
Wang Z Z. Study on the formula of calculating critical water depth of trapezoidal channel [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1995, 12(2):78-80. (in Chinese)
- [13] 徐焕文, 孙慕群. 梯形明渠临界水深的计算解法 [J]. 中国农村水利水电, 2002(12):57-58.
Xu H W, Sun M Q. Calculation method of critical depth of open trapezoidal channel [J]. China Rural Water and Hydropower, 2002(12):57-58. (in Chinese)
- [14] 刘计良, 王正中, 苏德慧, 等. 典型断面渠道临界水深计算 [J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2):181-187.
Liu J L, Wang Z Z, Su D H, et al. Calculation of water critical depth in channels with common shapes [J]. Journal of Drain-

age Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2):181-187. (in Chinese)

- [15] 王正中, 芦 琴, 冷畅俭, 等. 复式梯形断面临界水深计算公式 [J]. 长江科学院院报, 2003, 23(5):58-60.
Wang Z Z, Lu Q, Leng C J, et al. Formula for calculating critical depth of duplex trapezoidal open channel [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 23(5):58-60. (in Chinese)
- [16] 廖云凤. 梯形渠道断面临界水深显示计算 [J]. 陕西水力发电, 2001, 17(4):22-23.
Liao Y F. Calculation of critical water depth for trapezoid channel cross section display [J]. Shaanxi Hydroelectric Power, 2001, 17(4):22-23. (in Chinese)