第34卷 第1期 西北农林科技大学学报(自然科学版) Vol.34 No.1
2006年1月 Jour. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For.(Nat. Sci. Ed.) Jan. 2006

明渠临界水深计算方法总论*

王正中[1,2], 陈 涛[1], 万 斌[3], 申永康[4]

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;
2 中国科学院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
3 山东省水利厅, 山东 济南 250013; 4 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098)

[摘 要] 总结了近30年来各种断面明渠临界水深的计算方法, 并经分析与比较, 通过最优迭代与拟合处理及误差分析, 优选出各种典型渠道断面临界水深计算的一系列解析计算公式, 该系列公式简捷、准确、通用。综合评价结果表明: 各方法的最大误差不超过2%, 多数最大误差小于1%, 能满足生产实践的需要。

[关键词] 明渠; 临界水深; 计算公式; 断面形式

[中图分类号] TV 131.4 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387(2006)01-0155-07

临界水深是明渠水力学计算中一个特别重要的参数, 在水力计算及水工设计中应用非常广泛。对各种断面渠道临界水深的求解, 实质是求解含多个未知参数的单变量超越方程或高次方程, 理论上多无解析解。常见的求解方法主要有试算法、迭代法、图表法和近似解法等, 这些方法均难以实现简捷、准确、通用的统一。国内外学者对各种渠道断面临界水深计算方法的研究, 可追溯到20世纪50年代甚至更早, 特别是自1980年《科学通报》发表了项兆法[1]关于梯形渠道临界水深近似计算公式以来, 有关各种渠道断面临界水深计算方法的研究已取得了大量的成果, 在水利类及相关学科核心刊物上发表论文50余篇, 均提出了不少简捷、准确、通用的好公式, 使该领域的研究取得了实质性进展, 解决了相关工程问题。但目前除矩形、三角形、梯形断面有解析解外[2-5], 仍有不少断面的临界水深计算并未达到集简捷、准确和通用于一体的目的。

同时, 不少科技人员对梯形渠道临界水深继续进行着大量重复研究, 多数似乎对研究现状了解不够。为使更多的工程技术人员了解临界水深计算的研究现状, 笔者对目前各种典型断面渠道的临界水深计算公式进行了分析与总结, 通过最优迭代与拟合分析, 提出简便、准确、通用的近似解析解, 使这些含未知参数的无解析解的超越方程及高次方程得以求解, 以期为工程设计提供参考。同时, 也期望本文的分析方法能为求含未知参数的无解析解的超越方程及高次方程的近似解析解提供参考。

1 临界水深计算的基本方程

由于断面形状的差异, 不同断面临界水深的计算方法亦各不相同, 其计算精度和难易程度也各有差异。一些简单断面的临界水深可以通过数学变化求出其精确解, 如矩形、三角形等断面形式; 而复杂的断面, 如马蹄形、城门洞形等则无法得到解析解, 只有通过迭代计算、经验公式及图表查算法计算。根据最优化迭代理论, 迭代计算的优劣与迭代格式及初值的选取密切相关, 而经验公式法又存在计算复杂和计算结果不准确的缺点。

断面单位能量最小值的水深称为临界水深, 满足条件[1]为:

$$\alpha\frac{Q^2}{g}=\frac{A_k^3}{B_k} \tag{1}$$

式(1)即为临界流的基本方程。式中, α为断面动能修正系数; Q 为流量; g 为重力加速度; A_k 为相应于临界水深时的过水面积; B_k 为相应于临界水深时的水面宽度。

2 有精确解的断面形式及其临界水深的计算

可以通过对临界水深基本方程的恒等变形而获

* [收稿日期] 2004-11-25
[基金项目] 国家"863"高技术研究与发展计划项目(2002AA62Z3191); 国家冻土工程重点实验室项目(9901)
[作者简介] 王正中(1963-), 男, 陕西彬县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水力学及水工结构研究。
[通讯作者] 陈 涛(1969-), 男, 内蒙古清水河人, 副教授, 在读博士, 主要从事水工及岩土工程研究。

得临界水深精确解析解的断面形式有矩形断面、三角形断面、准梯形断面、U 形断面及抛物形断面等。由于矩形渠道临界水深计算公式非常简单，三角形断面在渠道工程中很少采用，故本研究对其不作论述。

2.1　准梯形断面

根据文献[3]，在水深 $h\geq(B-b)/2m$ 时(否则为梯形断面)，准梯形断面临界水深计算公式为:

$$h_k = h_k' + \frac{(1-\beta)^2}{4m}B \tag{2}$$

式中，h_k 为临界水深；$h_k'=\sqrt[3]{\frac{\alpha\cdot q^2}{g}}$，其中 q 为单宽流量，$q=\frac{Q}{B}$；$\beta=\frac{b}{B}$；m 为梯形断面的边坡比；B 为渠道顶宽；其他符号意义同前。

式(2)经数学变化所得，为精确解析解。

2.2　U 形断面

根据文献[3]，在 $h/D\geq 1/2$ 时(否则按圆形断面计算)，U 形断面临界水深计算公式为:

$$h_k = h_k' + \left(\frac{4-\pi}{8}\right)\cdot D \tag{3}$$

式中，D 为U 形渠圆弧段直径，其他符号意义同前。

式(3)也是经数学变化得来，其解为精确解析解。

2.3　抛物线形断面

根据文献[4]，抛物线形断面方程为: $y=ax^2$，其临界水深计算公式为

$$h_k = \left(\frac{27\alpha\cdot aQ^2}{32g}\right)^{0.2} \tag{4}$$

式中，a 为抛物线方程二次项系数，其他符号意义同前。

式(4)亦经过数学变化所得，为精确解析解。

3　有近似解析解的断面形式及其临界水深计算公式

由于断面形式的复杂性，对临界水深的基本方程无论通过怎样的数学变换，也无法得到某些断面形式临界水深的显函数精确解析解，这些断面形式包括梯形、圆形、弧底梯形、马蹄形、城门洞形等，其临界水深只有借助迭代理论、最优逼近拟合理论及先进的数学工具进行求解。为了便于计算和比较，在以下的计算中引入临界水深的无量纲参数 x。下面仅列举成果及精度评价。

3.1　梯形明渠

根据参考文献[5-6]知，梯形明渠临界水深计算方法最多，其实质为含参数的一元六次方程，理论上无解析解。为此，国内外学者应用各种原理得到的各种近似计算方法达30多种，但从简捷、准确、通用三方面考察，有以下4套公式较好。

3.1.1　计算公式　引入临界水深的无量纲参数 x，令 $x=\frac{mh_k}{b}$

①王正中等[5-6]的公式:

$$x = \frac{\sqrt{1+k(1+k)^{0.2}}-1}{2} \tag{5}$$

②廖云凤[7]的公式:

$$x = \frac{k}{4}\cdot\left(1+\frac{k}{4}\right)^{-0.372} \tag{6}$$

③Prabhata K S 等[8]的公式:

$$x = \left(\left(\frac{k}{4}\right)^{-2.1} + \left(2\cdot\left(\frac{k}{4}\right)^3\right)^{-0.42}\right)^{-0.476} \tag{7}$$

④Prabhata K S 等[8]的公式:

$$x = 0.55k^{0.59} - 0.11\mathrm{A\,sinh}(9.75k) \tag{8}$$

式中，$k=\frac{4m}{b}\sqrt[3]{\frac{\alpha\cdot q^2}{g}}$；$q=\frac{Q}{b}$；A sinh 为反双曲正弦函数；其他符号意义同前。

3.1.2　误差分析　为便于比较，笔者由 k 的定义以及公式(1)求得 k，再给定一系列 x 值，分别代入公式(5)、(6)、(7)、(8)得 x_1，以 k 为横轴，以相对误差 $e=(x_1-x)/x$ 为纵轴，式(5)、(6)、(7)、(8)的误差分析见图1。

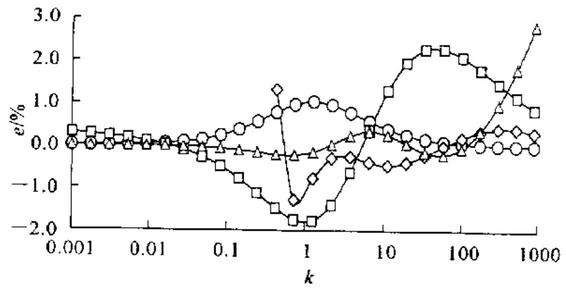

图1　不同计算公式误差比较
-○-. 王正中公式; -△-. 廖云凤公式;
-□-. Prabhata K Swamee 公式; -◇-. Wu S 公式
Fig. 1　Error comparison of different formulas
-○-. WANG Zheng-zhong formula; -△-. LIAO Yun-feng formula; -□-. Prabhata K Swamee formula; -◇-. Wu S formula

3.1.3　公式评价　由以上分析可以看出: ①比较公式的简捷程度，则公式(5)、(6)要优于公式(7)、(8)。②适用范围必须覆盖 $0.001\leq k\leq 1\,000$，否则就不能很好地满足工程实践要求；但当 $k>300$ 时，公式(6)计算误差大于1.0%，且当 $k>900$ 时，其误差急剧

增大, 属于发散性误差; 对于公式(8), 当 $k<1$ 时, 随 k 值减小误差急剧增大, 属发散性误差; 对于公式(5) 和(7), 在 $0<k<\infty$的范围内都适用, 且属于收敛性误差。③比较公式的精度, 根据文献[9]可知, 1% 的误差控制是较为合理的, 当 $k>1\ 000$ 时, 公式(6) 误差大于 3.5%; 当 $k<1$ 时, 公式(8) 误差大于 1.8%; 当 $k\approx 1$ 和 $k\approx 50$ 时, 公式(7) 的误差高达 2.4%; 只有公式(5) 在 $0<k<\infty$范围内, 误差小于 1%。④从公式的理论依据来看, 只有公式(5) 是根据迭代公式严格分析提出的, 理论依据严密充分, 而其他公式属于回归经验公式。从以上 5 个方面分析, 公式(5) 相对最好。

3.2　圆形断面

3.2.1　水力要素　由文献[2]可知, 圆形断面的水力要素为:

$$\begin{cases} h_k = r\cdot(1-\cos(\varphi_k/2)) \\ A_k = r^2\cdot\dfrac{\varphi_k-\sin\varphi_k}{2} \\ B_k = 2r\cdot\sin(\varphi_k/2) \end{cases}\tag{9}$$

式中, r 为半径; φ_k 为临界水深对应圆心角的 1/2; 其他符号意义同前。

由临界流基本方程, 即式(1) 可得:

$$\frac{(\varphi_k-\sin\varphi_k)^3}{16\sin(\varphi_k/2)}=\alpha\cdot\frac{Q^2}{g r^5}\tag{10}$$

此方程实质为含参数的高阶三角方程, 无解析解。

3.2.2　计算公式　引入临界水深的无量纲参数 x, 令 $x=\dfrac{h_k}{2r}$, 目前较为常用的公式有:

①经验公式[9]

$$h_k=\frac{0.573Q^{0.522}}{(2r)^{0.3}}\tag{11}$$

代入式(11) 整理后, 近似等价于:

$$x=0.420\ 6k^{0.26}\tag{12}$$

②孙建等[10]的公式

设
$$\gamma=\frac{\varphi_k-\sin\varphi_k}{\sin(\varphi_k/2)^{1/3}}\tag{13}$$

为比较方便, 对孙建公式整理如下:

令 $k=\gamma^3$, 得: $k=\dfrac{(\varphi_k-\sin\varphi_k)^3}{\sin(\varphi_k/2)}$, $\eta=\sqrt{\dfrac{k}{32}}$　　(14)

$$\begin{cases} x=0.102\ 541\eta+0.957\ 14\eta^{1/2} & 0<k\le 1.938 \\ x=-0.415\ 81\eta+1.573\ 51\eta^{1/2}-0.182\ 354 & 1.938<k<16.141 \end{cases}\tag{15}$$

③王正中等[11]的公式

应用迭代理论及优化拟合原理, 对基本方程作数学变换, 提出一种简捷、准确的直接计算公式:

$$x=\left(\frac{k}{29}\right)^{1/3.9}\tag{16}$$

式中, $k=(\alpha\cdot Q^2)/(g\cdot r^5)$。

3.2.3　误差分析　给定一系列无量纲参数 x 值, 由公式(9)、(10) 及 x 和 k 的定义求得 φ_k 和 k, 代入公式(12)、(15) 及(16) 得 x_1, 以 x 为横轴, 以相对误差 $e(\%)=[(x_1-x)/x]\times 100\%$ 为纵轴, 绘出公式(12), (15) 和(16) 的误差分布图, 结果见图 2。

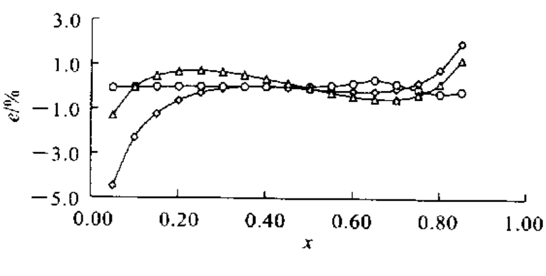

图 2　圆形断面误差评价图

-◇-. 经验公式; -○-. 孙建公式; -△-. 本文公式

Fig. 2　Error comparison of round section

-◇-. Experience formula; -○-. SUN Jian formula; -△-. The formula in this text

经验证, 在工程实用范围($0<x<0.9$) 内, 由计算精度比较, 公式(16) 的误差小于 1.31%, 公式(15) 小于 0.5%, 公式(12) 小于 4.6%; 从简捷程度比较, 公式(16) 的形式最简单。综合简单、精确及工程实用范围各方面的要求, 显然公式(16) 最实用。

3.3　弧底梯形

弧底梯形明渠的水力要素为[12]:

过水断面:

$$A_k=\frac{b^2}{4m}-\frac{r^2}{m}+r^2\arcsin\frac{1}{\sqrt{m^2+1}}\tag{17}$$

水面宽度:

$$b=2m(h-r)+2r\sqrt{m^2+1}\tag{18}$$

代入临界流基本方程式(1), 得到一个多参数非线性非齐次一元六次方程, 理论上也无解析解。经数学变换并应用迭代理论及优化拟合原理, 可提出一种新的简捷、准确的直接计算公式[13]。

引入临界水深的无量纲参数 x, 令 $x=\dfrac{h_k}{r}$

$$x=1-\sqrt{\frac{m^2+1}{m}}+\frac{\lambda}{2m}\tag{19}$$

式中, $\lambda=\dfrac{b}{r}$,

$$\begin{cases} \lambda = 2\sqrt{\beta + \sqrt[3]{k\lambda_0}}, \beta = 1 - m \cdot \arcsin\dfrac{1}{\sqrt{1+m^2}} \\ \lambda_0 = 2.35k^{0.2}, k = \alpha \cdot \dfrac{Q^2 \cdot m^3}{g r^5} \end{cases} \tag{20}$$

在工程实用范围内,无量纲参数 k 介于 0.001 和 1 000,弧底梯形的边坡系数 m 介于 1～4,其误差小于 2.24%,见图 3。

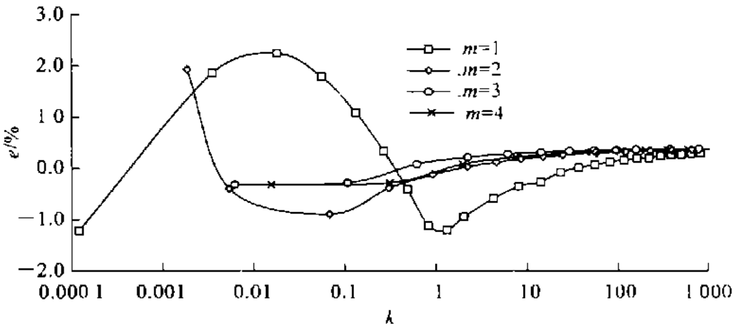

图 3 弧底梯形断面精度评价

Fig. 3 Error comparison of arc-bottom trapezoid section

3.4 标准Ⅰ型和Ⅱ型马蹄形断面临界水深的直接计算

马蹄形断面临界水深方程实质为含多个未知参数的高阶非齐次三角方程,也无解析解。由于文献[14]提出的迭代公式非常复杂,如果初值选取不当,往往很难收敛,且精度较难保证。文献[15]根据迭代理论及优化拟合原理提出了近似计算方法,精度可以满足工程实践要求。因此,本文推荐文献[15]的直接计算方法。

3.4.1 马蹄形断面要素[13] 标准Ⅰ型 $\theta = 16.87°$, $C_Ⅰ = 18[\theta - 0.5\sin(2\theta) + \sin 2\theta]$; 标准Ⅱ型 $\theta = 24.30°$, $C_Ⅱ = 2\theta - \sin(2\theta) + 2\sin 2\theta$。

当 $r \le h_k \le 2r$, $0 < \varphi \le \pi$ 时,有:

$$Ⅰ型\begin{cases} h_k = r \cdot (1 + \cos(\varphi_k/2)) \\ A_k = r^2 \cdot [C_Ⅰ + 0.5(\pi - \varphi_k + \sin\varphi_k)] \\ B_k = 2r \cdot \sin(\varphi_k/2) \end{cases} \tag{21}$$

$$Ⅱ型\begin{cases} h_k = r \cdot (1 + \cos(\varphi_k/2)) \\ A_k = r^2 \cdot [4C_Ⅱ + 0.5(\pi - \varphi_k + \sin\varphi_k)] \\ B_k = 2r \cdot \sin(\varphi_k/2) \end{cases} \tag{22}$$

当 $e \le h_k \le r$, $0 < \alpha \le \theta$ 时,有

$$Ⅰ型\begin{cases} h_h = r \cdot (1 - 3\sin\alpha) \\ A_k = r^2 \cdot [C_Ⅰ - 9(\alpha + 0.5\sin(2\alpha) - \dfrac{4}{3}\sin\alpha)] \\ B_k = 2r \cdot (3\cos\alpha - 2) \end{cases} \tag{23}$$

$$Ⅱ型\begin{cases} h_h = r \cdot (1 - 2\sin\alpha) \\ A_k = 4r^2 \cdot [C_Ⅱ - \alpha - 0.5\sin(2\alpha) + \sin\alpha] \\ B_k = 2r \cdot (2\cos\alpha - 2) \end{cases} \tag{24}$$

当 $0 \le h_k \le e$, $0 < \beta \le \theta$ 时,有

$$Ⅰ型\begin{cases} h_h = 3r \cdot (1 - \cos\beta) \\ A_k = 9r^2 \cdot [\beta - 0.5\sin(2\beta)] \\ B_k = 6r \cdot \sin\beta \end{cases} \tag{25}$$

$$Ⅱ型\begin{cases} h_h = 2r \cdot (1 - \cos\beta) \\ A_k = 4r^2 \cdot [\beta - 0.5\sin(2\beta)] \\ B_k = 4r \cdot \sin\beta \end{cases} \tag{26}$$

令 $$x = h_k/r, k = \alpha \cdot Q^2/g \cdot r^5 \tag{27}$$

3.4.2 标准Ⅰ型马蹄形断面临界水深的直接计算[15] 引入临界水深的无量纲参数 x,令 $x = \dfrac{h_k}{r}$

当 $k \ge 3$, $r \le h_k \le 2r$ 时,临界水深:

$$x = 0.78k^{1/3.07} - \frac{k}{63} - 0.07 \tag{28}$$

当 $0.002 \le k \le 3$, $e \le h_k \le r$ 时,临界水深:

$$x = 0.68k^{1/3.08} - \frac{k}{200} + 0.04 \tag{29}$$

当 $0 < k \le 0.002$, $0 \le h_k \le e$ 时,临界水深:

$$x = 0.6k^{1/4.04} - 0.7k - 0.0004 \tag{30}$$

3.4.3 标准Ⅱ型马蹄形断面临界水深的直接计算公式[15] 当 $k \ge 2.664$, $r \le h_k \le 2r$ 时,临界水深:

$$x = 0.85k^{1/3.26} - \frac{k}{66} - 0.11 \tag{31}$$

当 $0.004 \le k \le 2.664$, $e \le h_k \le r$ 时,临界水深:

$$x = 0.75k^{1/2.7} - 0.6k + 0.075 \tag{32}$$

当 $0 \le k \le 0.004$, $0 \le h_k \le e$ 时,临界水深:

$$x = 0.68k^{1/4} - 0.03k \tag{33}$$

3.4.4 精度评价 经验证,标准Ⅰ型马蹄形断面的误差小于 0.50% (图 4),标准Ⅱ型马蹄形断面的误

差小于 1.59% (图 5)。

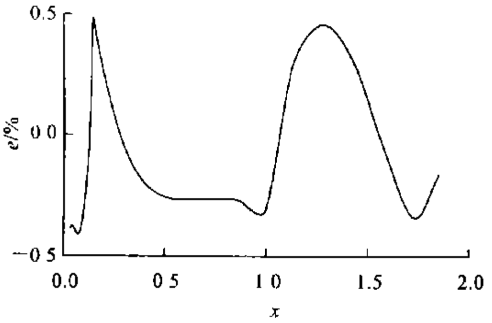

图 4　标准 Ⅰ 型马蹄形断面误差分析

Fig. 4　Error analysis of normal Ⅰ type horse-shoe section

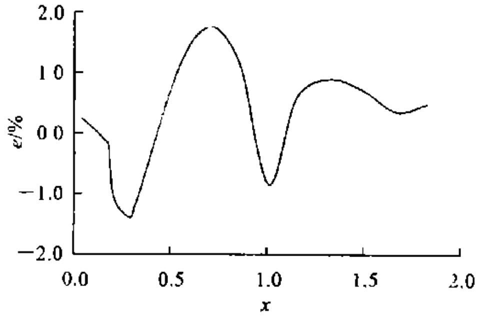

图 5　标准 Ⅱ 型马蹄形断面误差分析

Fig. 5　Error analysis of normal Ⅱ type horse-shoe section

3.5　普通城门洞形断面明渠临界水深的计算

普通城门洞形断面的临界水深方程实质上也是含多个未知参数的高阶非齐次反三角方程, 理论上无解析解。

3.5.1　**水力要素**　普通城门洞形断面的水力要素为[16]:

$$\begin{cases} h_h = r \cdot (1 + \cos\theta) \\ A_k = 3.570\,8r^2 - \theta \cdot r^2 + r(h_k - r)\sin\theta \\ B_k = 2[r^2 - (h_k - r)^2]^{0.5} \end{cases} \tag{34}$$

当 $0 \le \frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot r^5} \le 4$, 即 $0 \le h_k \le r$ 时, 普通城门洞形断面明渠临界水深可按矩形断面的计算公式进行计算。

3.5.2　**计算公式**　引入临界水深的无量纲参数 x, 令 $x = \frac{h_k}{r} - 1$, 将式(34)代入临界流基本方程式(1), 经数学变换并应用优化拟合原理, 可提出一种新的简捷、准确的直接计算公式:

$$x = 0.58k^{0.4} - \frac{k}{54} - 0.936 \tag{35}$$

式中, $k = \frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot r^5}$, 其他符号意义同前。

3.5.3　**精度评价**　为检验直接计算法的计算精度, 通过给定不同的无量纲参数 x 值, 由公式(34)求得 θ 和 k 值, 再由式(35)求得 x_1, 验证求解精度 e, $e = [(x_1 - x)/x] \times 100\%$。计算结果见图 6。经验证, 在工程实用范围内误差小于 1.22%。

以上分析比较及精度分析表明, 直接计算法形式直观、简捷、准确, 克服了查图法、查表法、试算法的繁琐、复杂和误差大的缺点。因此, 公式(35)是一个实用的计算公式。

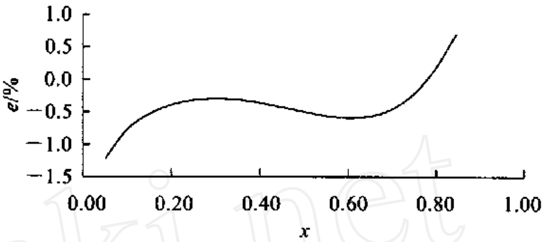

图 6　普通城门洞形断面误差分析

Fig. 6　Error analysis of common city-gate section

3.6　标准城门洞形断面明渠临界水深的计算

3.6.1　**水力要素**　标准城门洞形断面的水力要素为[16]:

当 $0.25r \le h \le r$ 时

$$\begin{cases} A_k = 2(h - 0.25r) \cdot r + 0.473\,2r^2 \\ B_k = 2r \end{cases} \tag{36}$$

当 $r < h \le 2r$ 时

$$\begin{cases} h_h = r \cdot (1 + \cos\theta) \\ A_k = 3.544r^2 - \theta \cdot r^2 + r(h_k - r)\sin\theta \\ B_k = 2[r^2 - (h_k - r)^2]^{0.5} \end{cases} \tag{37}$$

将临界水深 $h_k = e = 0.25r$ 和 $h_k = r$ 分别代入临界流基本方程(1)得:

$$\frac{Q_e^2}{r^5} = 0.519\,6, \quad \frac{Q_r^2}{r^5} = 37.683\,6$$

即: 当 $0.519\,6 \le \frac{Q_r^2}{r^5} \le 37.683\,6$ 时, $e \le h_k \le r$; 当 $\frac{Q_r^2}{r^5} > 37.683\,6$ 时, $h_k > r$。

3.6.2　**临界水深计算公式**　引入临界水深的无量纲参数 x, 令 $x = \frac{h_k}{r} - 1$, 将式(36), (37)代入临界流基本方程式(1), 经数学变换并应用优化拟合原理, 可提出一种新的简捷、准确的直接计算公式:

当 $0.5196 \le \frac{Q_r^2}{r^5} \le 37.6836$, $h_k \le r$ 时, 将式(36)代入临界流基本方程(1), 经整理得:

$$h_k = r \cdot (0.0135 + \sqrt[3]{k/4}) \tag{38}$$

此式为解析式;

当 $\frac{Q_r^2}{r^5} > 37.6836$, $h_k > r$ 时, 将式(37)代入临界流基本方程式(1), 经整理得:

$$\frac{Q^2}{g \cdot r^5} = [3.544 - \arccos(h_k/r - 1) + (h_k/r - 1) \cdot \sqrt{1 - (h_k/r - 1)^2}]^3 / 2\sqrt{1 - (h_k/r - 1)^2} \tag{39}$$

将式(39)代入临界流基本方程式(1), 采用优化拟合法可得下式:

$$x = 0.551k^{0.418} - 2.05 \times 10^{-2}k - 0.888 \tag{40}$$

式中, $k = \frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot r^5}$, 其他符号意义同前。

3.6.3 精度评价 为检验直接计算法的计算精度, 通过给定不同的无量纲参数 x 值, 由公式(37)求得 θ 和 k 值, 再由式(40)求得 x_1, 验证求解精度 e, $e = [(x_1 - x)/x] \times 100\%$, 计算结果见图7。经验证, 在工程实用范围内误差小于1.22%。

由以上分析比较及精度分析可知, 直接计算法形式直观、简捷、准确, 克服了查图法、查表法、试算法的繁琐、复杂和误差大的缺点。因此, 公式(40)是一个实用的计算公式。以下是临界水深计算公式(40)的误差分布情况(图7)。

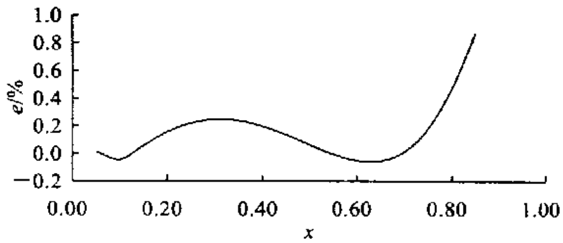

图7 标准城门洞形断面误差分析

Fig.7 Error analysis of normal city-gate section

4 结 论

通过对前人研究成果的分析与总结, 并结合作者的部分研究, 表1给出了目前工程上较常用的各种典型断面临界水深的一系列简捷、准确、适用范围广的直接计算公式。

表1 不同断面形式的临界水深计算公式汇总

Table 1 Critical depth calculating formula's sum-up of different type sections

断面形式 Section form	推荐公式 Commend formula	公式特点 Characteristic of formula	计算误差 Calculation error	公式来源 Source of formula
准梯形断面 Vice trapezoid section	(2)	解析公式 Parsing formula	=0	文献[3] Literature [3]
U形断面 U shape section	(3)	解析公式 Parsing formula	=0	文献[3] Literature [3]
抛物线形断面 Parabola section	(4)	解析公式 Parsing formula	=0	文献[4] Literature [4]
梯形断面 Trapezoid section	(5)	经验公式 Experimental formula	<1.00%	文献[5] Literature [5]
圆形断面 Round section	(16)	经验公式 Experimental formula	<1.31%	文献[11] Literature [11]
弧底梯形断面 Arc-bottom trapezoid section	(19)	经验公式 Experimental formula	<2.24%	文献[13] Literature[13]
马蹄形断面 Horse-shoe section	(28)～(33)	经验公式 Experimental formula	<1.59%	文献[15] Literature [15]
普通城门洞形断面 Common city-gate section	(35)	经验公式 Experimental formula	<1.22%	文献[16] Literature [16]
标准城门洞形断面 Normal city-gate section	(38)/(40)	解析公式/经验公式 Parsing formula/Experimental formula	<1.22%	文献[16] Literature [16]

由于本文的研究实质是求解不同形式、含未知参数的超越方程和高次方程的近似解析解, 这些方程在数学上无理论解。因此, 以上的研究方法及思路可为类似方程的求解提供一种新的思路。

[参考文献]

[1] 项兆法. 论计算梯形渠道临界水深近似公式[J]. 科学通报, 1980, 25(16): 749-753.

[2] 清华大学. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979.

[3] 王正中. 准梯形及U形渠道临界水深计算公式[J]. 河海水利, 1999(3): 13-14.

[4] 卫　勇. 抛物线型渠道的设计与特征水深的计算[J]. 甘肃水利水电技术, 1993(1): 44-47.
[5] 王正中, 袁　驷, 武成烈. 再论梯形明渠临界水深计算方法[J]. 水利学报, 1999(4): 14-16.
[6] WANG Zheng-zhong. Formula for calculating critical depth of trapezoidal open channel[J]. J Hydr Engrg, 1998, 124(1): 90-92.
[7] 廖云凤. 梯形渠道断面临界水深显示计算[J]. 陕西省水力发电, 2001, 17(4): 22-23.
[8] Prabhata K S, Wu S, Katopodis C. Formula for calculating critical depth of trapezoidal open channel[J]. J Hydr Engrg, 1999, 125(7): 785-786.
[9] 华东水利学院. 水工设计手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
[10] 孙　建, 李　宇. 圆形和U形断面明渠临界水深直接计算公式[J]. 陕西水力发电, 1996, 12(3): 38-41.
[11] 王正中, 陈　涛, 万　斌, 等. 圆形断面管道临界水深直接计算方法[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(2): 1-2.
[12] 王正中. 弧底梯形明渠正常水深的直接计算法[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 31-34.
[13] 王正中, 申永康, 彭元平, 等. 弧底梯形渠道临界水深的直接计算[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(3): 6-8.
[14] 吕宏兴. 马蹄形过水断面临界水深的迭代计算[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(3): 10-12.
[15] 王正中, 陈　涛, 芦　琴, 等. 马蹄形断面隧洞临界水深的直接计算[J]. 水力发电学报, 2005, 24(5): 95-98.
[16] 王正中, 陈　涛, 张新民, 等. 城门洞形断面隧洞临界水深的近似算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(6): 812-814.

Pandect for the calculating methods of the critical depth of opening channel in different typical cross sections

WANG Zheng-Zhong[1,2], **CHEN Tao**[1], **WAN Bin**[3], **SHEN Yong-kang**[4]

(1 *College of Water Conservancy & Construction Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2 *State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAS, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*;
3 *Water Conservancy Government Department of Shandong Province, Jinan, Shandong* 250013, *China*;
4 *College of Civil Engineering, Hehai University, Nanjing, Jiangsu* 210098, *China*)

Abstract: The paper summarized the calculating methods of the critical depth of opening channel in different typical cross sections in the past three decades. After comparing the forms and the errors of all, the authors selected an optimum iterative method to deal with the items, and gave a series proper equation to meet the demands of engineering practice. These equations are simple, accurate and commonly used. The errors of these equations are within 2%, most of them are less than 1%. The new method of the paper will give enlightenment in solving problems of transcendental equation with several unknown parameters.

Key words: irrigation channel; critical water depth; calculating equation; section form