文章编号:1672 - 3317(2018)12 - 0100 - 07

# 抛物线形复合渠道实用经济断面的计算方法

李 刚[1], 何武全[1,2*], 翟东汉[1], 彭成林[1], 郭奕浓[3]
(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;
2.旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.辽宁西北供水有限责任公司, 沈阳 110000)

**摘 要:**【目的】解决平方抛物线形渠坡和水平渠底的复合渠道水力最佳断面存在施工难度大、不经济等问题。【方法】在水力最佳断面的基础上,通过数据拟合的方式,得到了求解最佳$H/H_0$值所对应的抛物线水面宽和水深比$\eta$=1.666,推导出了抛物线形复合渠道实用经济断面的计算公式,并提出了详细的计算步骤。【结果】通过实例计算,当流量$Q$为26 m$^3$/s、$n$为0.015、$i$为0.000 52、$\alpha$为1.03时,抛物线形复合渠道实用经济断面情况下的水深$H$为2.054 m,渠底宽度$b$为4.447 m,过水断面面积$A$为13.818 m$^2$,湿周长度$\chi$为10.037 m。在相同流量、糙率与渠道底坡条件下与梯形、弧形坡脚梯形相比,抛物线形复合渠道实用经济断面面积最小,比梯形减小了1.65%,比弧形坡脚梯形减小了1.29%。【结论】抛物线形复合渠道实用经济断面更为优越。

**关 键 词:**抛物线复合渠道; 实用经济断面; 计算方法
**中图分类号:**S277; TV131.4 **文献标志码:**A doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180083
**李刚,何武全,翟东汉,等. 抛物线形复合渠道实用经济断面的计算方法[J]. 灌溉排水学报,**2018,37(12):100-106.

## 0 引 言

渠道按照水力最佳断面设计往往是窄深式的,虽然工程量最小,但是给施工和维护带来一定难度,达不到经济实用的目的。对实际工程而言,在设计渠道断面时应该综合考虑经济、技术和管理等因素,在水力最佳断面的基础上,适当增大宽深比,使渠道断面在不改变通过流量的前提下满足工程实际的需求[1]。渠道的实用经济断面是为了解决当采用水力最佳断面作为渠道设计断面不够理想而给出的一系列可供比选的替代断面[2]。国内外在渠道实用经济断面方面已有了很多的研究。何武全等[1]通过函数拟合的方式推导出了二次抛物线渠道实用经济断面的计算公式,提出了详细的计算步骤,给出了二次抛物线渠道实用经济断面水力计算表;荣丰涛等[3]通过公式推导得到了弧形底梯形渠道的弧底半径$r$和水深$H$比值$Kr$的一元二次方程,通过解一元二次方程的方式得到了弧形底梯形渠道的实用经济断面计算方法,并给出了实用经济断面水力计算表;周春霞[4]通过实用经济断面与水力最佳断面的比例关系确定了梯形渠道实用经济断面与水力最佳断面的水力要素关系式;雒望余[5]不仅推导出了圆弧底渠道的水力最佳断面,还在计算圆弧底渠道实用经济断面时,指出了规范中的错误,并重新计算了水深与弧底半径的比值;刘红英等[6]提出了上部分为矩形,下部分为梯形的复合断面渠道,并且推导了该渠道的水力最佳断面和实用经济断面计算公式,通过实例比较认为该渠道断面形式比梯形和矩形渠道更为优越;徐文秀[7]对弧形坡脚梯形渠道实用经济断面计算方法进行了改进,不用计算关于弧脚半径$r$与水深$H$比值$Kr$的二次方程,转而直接求解实用经济断面水深$H$与水力最佳断面水深$H_0$的比值,计算更加简便;苏东喜[8]从水力学一元流方程推导出了梯形、矩形断面求解低次方系数法,同时与实用经济断面查表图解法和迭代法进行了对比,分析各自的准确性和特点,认为低次方系数法可选择设计方案更多,具备推广应用条件;崔娜等[9]以边坡系数为设计变量,将常用渡槽槽身断面形状设计计算的显式方程用于渡槽断面的优化设计,采用差分进化法对实用经济断面进行分析。Han等[10]给出

**收稿日期:**2018-01-31
**基金项目:**国家"十三五"重点研发课题(2016YFC0400203)
**作者简介:**李刚(1993-),男,四川成都人。硕士研究生,研究方向为水工结构设计理论与材料。E-mail: 1539461198@qq.com
**通信作者:**何武全(1967-),男,陕西合阳人。副教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: hewq@nwafu.edu.cn

了3种类似于梯形断面渠道的水力最佳断面算法，并且指出当梯形边坡坡率$m$为$\sqrt{3}/3$时，梯形渠道水力性能最好；Han等[11]利用拉格朗日乘子优化方法推导出渠道实用经济断面的微分方程，并且将优化模型转化为求解任意渠道断面形状实用经济断面的一般方程；李刚等[12]提出了适用于大中型渠道的平方抛物线形渠坡和水平渠底的复合断面渠道，并且利用拉格朗日乘子法推导出了抛物线形复合断面渠道水力要素计算公式。但是，根据计算结果可知，抛物线形复合断面渠道水力最佳断面为窄深式，不利于实际施工，在实际应用中有很大的局限性，而对抛物线形复合断面渠道实用经济断面尚未见到相关研究。为此，在平方抛物线形渠坡和水平渠底的复合渠道水力最佳断面计算方法的基础上，适当增加过水断面面积的条件下增加断面宽深比，利用拟合方式解决含有2个未知参数的抛物线形复合渠道实用经济断面计算公式的推导问题，使其既能基本满足水力最佳断面的要求，又能达到经济实用的目的。

## 1 抛物线形复合渠道实用经济断面的计算公式

抛物线形渠道断面和抛物线形复合渠道断面见图1和图2，根据文献[12]可知，抛物线形复合断面渠道的基本参数公式为：

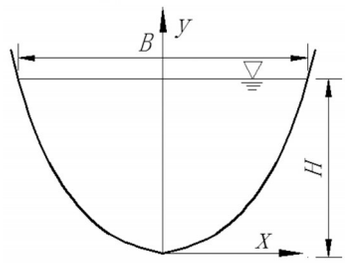


图1 抛物线形渠道断面图

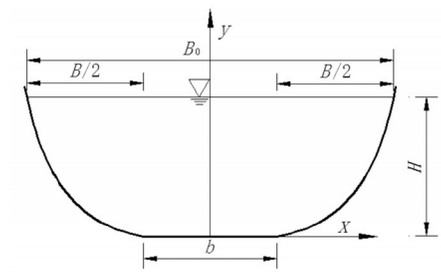


图2 抛物线形复合渠道断面图

$$Q=\frac{1}{n}AR^{2/3}i^{1/2}=\frac{1}{n}\frac{A^{5/3}i^{1/2}}{\chi^{2/3}}, \tag{1}$$

$$A=\frac{2}{3}\eta H^2+\beta H^2, \tag{2}$$

$$\chi=\frac{\eta H}{2}\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}+\frac{\eta^2 H}{8}\ln\left(\frac{4}{\eta}+\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}\right)+\beta H, \tag{3}$$

$$K=\frac{4H}{B^2}, \tag{4}$$

式中：$A$为过水断面面积（m²）；$\chi$为湿周（m）；$H$为渠道水深（m）；抛物线部分水面宽度与水深比值，即$\eta=B/H$；$\beta$为底宽与水深的比值，即$\beta=b/H$；$K$为抛物线系数，通过改变$K$可以改变渠道水深与过水断面面积。

从式（2）、式（3）可知，抛物线复合渠道的过水断面面积和湿周周长都是由$H$、$\eta$、$\beta$这3部分定义，抛物线形复合渠道的水力最佳断面按照在一定的湿周长度$\chi=C$的条件下，应满足过水面积最小的要求，可以采用条件极值拉格朗日乘数法求解。因此可以构造函数，即：

$$F(H,\ \eta,\ \beta)=\frac{2}{3}\eta H^2+\beta H^2+\lambda\left(\frac{\eta H}{2}\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}+\frac{\eta^2 H}{8}\ln\left(\frac{4}{\eta}+\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}\right)+\beta H-C\right)。 \tag{5}$$

令$\frac{\partial F}{\partial H}=0$，则

$$\frac{4}{3}\eta H+2\beta H+\lambda\left[\frac{\eta}{2}\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}+\frac{\eta^2}{8}\ln\left(\frac{4}{\eta}+\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}\right)+\beta\right]=0。 \tag{6}$$

令$\frac{\partial F}{\partial \eta}=0$，则

$$\frac{2}{3}H^2+\lambda\left(\frac{H}{2}\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}-\frac{8H}{\eta^2\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}}+\frac{\eta H}{4}\ln\left(\frac{4}{\eta}+\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}\right)-\frac{H}{2\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}}\right)=0。 \tag{7}$$

令 $\frac{\partial F}{\partial \beta}=0$，则

$$H^2+\lambda H=0 。 \tag{8}$$

令 $\chi=C$，则

$$\frac{\eta H}{2}\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}+\frac{\eta^2 H}{8}\ln\left(\frac{4}{\eta}+\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}\right)+\beta H-C=0 。 \tag{9}$$

利用式(6)—式(9)联立，采用迭代算法[13]，运用MathCAD软件可以解得抛物线形复合渠道水力最佳断面的条件是：

$$\eta=\frac{B}{H}=1.644 , \tag{10}$$

$$\beta=\frac{b}{H}=0.362 。 \tag{11}$$

根据 $\eta=B/H$，$\beta=b/H$ 之间的关系，可以得到下面的各组关系：

$$\frac{B}{b}=4.541,\quad \frac{B_0}{b}=5.541,\quad \frac{B_0}{H}=2.006 。 \tag{12}$$

将式(12)代入式(1)—式(4)，抛物线形复合断面渠道水力最佳断面满足的条件有：

$$H_0=1.046\left(\frac{nQ}{\sqrt{i}}\right)^{3/8} , \tag{13}$$

$$b_0=0.379\left(\frac{nQ}{\sqrt{i}}\right)^{3/8} , \tag{14}$$

$$k_0=\frac{1.48}{H_0} , \tag{15}$$

$$A_0=1.458{H_0}^2 , \tag{16}$$

$$\chi_0=3.073H_0 , \tag{17}$$

式中：$Q$ 为渠道流量($m^3/s$)；$i$ 为渠道底坡；$n$ 为渠道糙率；$b_0$ 为水力最佳断面条件下的渠道底宽(m)；$A_0$ 为水力最佳断面条件下的过水断面面积($m^2$)；$\chi_0$ 为水力最佳断面条件下的湿周(m)；$k_0$ 为 $\eta$ 取1.644时抛物线的形状系数。

推求抛物线形复合渠道实用经济断面时，假定其过水断面面积 $A$ 和水力最佳断面面积 $A_0$ 之间的关系是 $A=\alpha\cdot A_0$，$\alpha$ 取稍大于1的数值，一般采用1.01~1.04[10]，那么根据实用经济断面与水力最佳断面通过流量相等的条件，采用明渠均匀流及曼宁公式可得：

$$\alpha=\frac{A}{A_0}=\left(\frac{\chi}{\chi_0}\right)^{2/5} 。 \tag{18}$$

将式(2)、式(16)、式(3)、式(17)分别带入式(18)中可得：

$$\alpha=\left(\frac{\frac{2}{3}\eta+\beta}{1.458}\right)\left(\frac{H}{H_0}\right)^2 , \tag{19}$$

$$\alpha^{5/2}=\frac{\frac{\eta}{2}\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}+\frac{\eta^2}{8}\ln\left(\frac{4}{\eta}+\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}\right)+\beta}{3.073}\left(\frac{H}{H_0}\right) 。 \tag{20}$$

由式(19)可以把 $\beta$ 表达出来：

$$\beta=1.458\alpha\left(\frac{H_0}{H}\right)^2-\frac{2}{3}\eta 。 \tag{21}$$

将式(21)代入到式(20)中可得：

$$\alpha^{5/2}=\frac{\frac{\eta}{2}\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}+\frac{\eta^2}{8}\ln\left(\frac{4}{\eta}+\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}\right)+1.458\alpha\left(\frac{H_0}{H}\right)^2-\frac{2}{3}\eta}{3.073}\left(\frac{H}{H_0}\right) 。 \tag{22}$$

将式(22)化简，并合并同类项可得：

$$\frac{\frac{\eta}{2}\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}+\frac{\eta^2}{8}\ln\left(\frac{4}{\eta}+\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}\right)-\frac{2}{3}\eta}{3.073}\left(\frac{H}{H_0}\right)^2-\alpha^{\frac{5}{2}}\left(\frac{H}{H_0}\right)+0.474\alpha=0 。 \tag{23}$$

式(23)为关于$H/H_0$的一元二次方程，由一元二次方程求根公式可得：

$$\frac{H}{H_0}=\frac{\alpha^{5/2}-\sqrt{\alpha^5-0.617\alpha\left[\frac{\eta}{2}\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}+\frac{\eta^2}{8}\ln\left(\frac{4}{\eta}+\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}\right)-\frac{2}{3}\eta\right]}}{0.651\left(\frac{\eta}{2}\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}+\frac{\eta^2}{8}\ln\left(\frac{4}{\eta}+\sqrt{1+\frac{16}{\eta^2}}\right)-\frac{2}{3}\eta\right)} 。 \tag{24}$$

即在已知$\alpha$和参数$\eta=B/H$的条件下可以求得实用经济断面情况下水深与水力最佳断面下正常水深的比值，该值必定是小于1的数，因此上式分子中应取负号。考虑到式(24)求解十分麻烦，现给出部分求解结果见表1，在实际工程设计中可根据具体情况选用。

表1 抛物线形复合断面渠道实用经济断面$H/H_0$

| $\alpha$ | $\eta$ | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 2.0 | 2.1 |
| 1.01 | 0.856 | 0.824 | 0.805 | 0.793 | 0.785 | 0.779 | 0.775 | 0.774 | 0.774 | 0.776 | 0.779 | 0.784 | 0.790 |
| 1.02 | 0.757 | 0.744 | 0.735 | 0.729 | 0.724 | 0.721 | 0.718 | 0.717 | 0.718 | 0.719 | 0.720 | 0.723 | 0.727 |
| 1.03 | 0.704 | 0.696 | 0.690 | 0.685 | 0.682 | 0.679 | 0.678 | 0.677 | 0.678 | 0.678 | 0.679 | 0.681 | 0.684 |
| 1.04 | 0.665 | 0.659 | 0.655 | 0.651 | 0.649 | 0.647 | 0.646 | 0.645 | 0.645 | 0.646 | 0.647 | 0.648 | 0.650 |

由表1可知，无论$\alpha$取什么值，随着$\eta$增大，$H/H_0$都存在着左右对称关系，将表1数据进行拟合，二者之间的关系如图3所示($\alpha$取1.02)。

由图3可知，$\eta$与$H/H_0$之间存在着开口向上的抛物线关系，所以在抛物线顶点处存在着$H/H_0$取最小值时对应的$\eta$值。$H/H_0$取最小值表示实用经济断面与水力最佳断面水深的比值最小，而此时所对应的$\eta$值就是实用经济断面计算时$\eta$的最佳取值。

从图3可知，拟合所得的抛物线方程为：

$$y=0.064\,4x^2-0.214\,6x+0.895\,2 。 \tag{25}$$

由一元二次方程顶点公式可以求得顶点处的$\eta$为1.666。

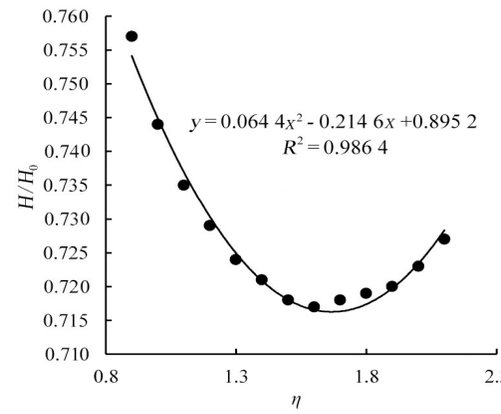


图3 $\eta$与$H/H_0$关系

将$\eta$=1.666代入式(24)中可得：

$$\frac{H}{H_0}=\frac{\alpha^{5/2}-\sqrt{\alpha^5-0.996\alpha}}{1.051} 。 \tag{26}$$

式(26)即是抛物线形复合渠道实用经济断面水深与水力最佳断面水深之比的计算公式，其比值只与参数$\alpha$有关。将$\eta=B/H$=1.666和式(26)代入式(21)，得到抛物线形复合渠道实用经济断面渠底宽度的计算公式：

$$b=\left[1.458\alpha\left(\frac{1.051}{\alpha^{5/2}-\sqrt{\alpha^5-0.996\alpha}}\right)^2-1.096\right]H 。 \tag{27}$$

将$B=\eta H$代入式(4)中可以得到抛物线形复合断面渠道实用经济断面的抛物线形状系数计算公式：

$$K=\frac{4H}{B^2}=\frac{4}{1.666^2H}=1.441\frac{1}{H} 。 \tag{28}$$

将式(16)、式(17)代入式(18)得抛物线形复合断面渠道实用经济断面的过水断面面积以及湿周计算公式：

$$A=\alpha A_0\text{，} \tag{29}$$

$$\chi=\alpha^{5/2}\chi_0\text{。} \tag{30}$$

## 2 抛物线形复合断面渠道实用经济断面计算步骤

1）在渠道流量$Q$、渠道糙率$n$、渠道比降$i$一定的条件下，首先选定抛物线形复合断面渠道两侧抛物线部分的宽深比$\eta$=1.666。

2）利用式（13）—式（17）计算水力最佳断面条件下的水深$H_0$、底宽$b_0$、抛物线系数$k_0$、过水断面面积$A_0$、湿周$\chi_0$。

3）当认为水力最佳断面的渠道宽深比不够理想，需要调整时，可以先假定不同的$\alpha$。利用$\alpha$和$\eta$可得相应的$H/H_0$。

4）利用已知的$\alpha$、$H_0$代入式（26）之中，可以得到实用经济断面的水深$H$；将$\alpha$、$H$代入式（27）可以得到渠道底宽$b$；将求得的$H$代入式（28）中可以得到抛物线形状系数$K$；将$\alpha$、$A_0$、$\chi_0$代入式（29）、式（30）得到实用经济断面的过水断面面积和湿周。

5）校核各种$\alpha$条件下的渠道流速$v$是否满足不冲不淤的要求，通过比较选定渠道的断面尺寸。

为了简化计算，利用以上推导出的公式解出了不同的$\alpha$对应的实用经济断面与水力最佳断面的水深比值$H/H_0$、渠底宽度比值$b/b_0$、抛物线形状系数比值$k/k_0$、湿周比值$\chi/\chi_0$。并且绘制了相应的表格（表2），供计算实用经济断面时采用。

表2 水力最佳断面与实用经济断面参数

| $\alpha$ | 1.01 | 1.02 | 1.03 | 1.04 |
|---|---|---|---|---|
| $H/H_0$ | 0.773 5 | 0.717 3 | 0.676 9 | 0.644 9 |
| $b/b_0$ | 2.917 3 | 3.556 1 | 4.078 7 | 4.542 5 |
| $k/k_0$ | 1.258 8 | 1.357 5 | 1.438 3 | 1.509 7 |
| $\chi/\chi_0$ | 1.025 2 | 1.050 8 | 1.076 7 | 1.103 0 |

## 3 实例计算与对比分析

### 3.1 实例计算

当流量$Q$=26 m³/s、糙率$n$=0.015、渠道底坡$i$=0.52×10⁻³、$V$=1.5~2.3 m/s时，按实用经济断面设计抛物线复合断面渠道。

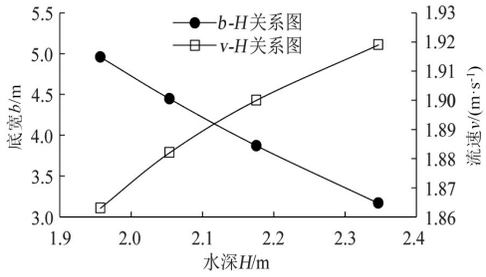


图4 $v$-$H$与$b$-$H$关系图

1）利用式（13）—式（17）计算出水力最佳断面的水力要素，$H_0=1.046\left(nQ/\sqrt{i}\right)^{3/8}$ =3.033 m，$A_0=1.458H_0^2$ = 13.416 m²，$\chi_0$=3.073、$H_0$=9.322 m，$b_0$=1.099 m，$K_0$=0.488。

2）$\alpha$取1.01~1.04，将$\alpha$和$H_0$=3.033 m代入式（26）中，可得实用经济断面水深$H$，再代入式（27）—式（30）可得实用经济断面的其他水力要素（或直接利用表2计算），抛物线复合渠道实用经济断面水力要素计算结果列入表3，$v$-$H$曲线、$b$-$H$曲线见图4。

由表3可知，流速均满足不冲不淤要求，实用经济断面水深$H$介于1.957~2.347 m之间，底宽$b$介于3.167~4.958 m之间，抛物线形复合渠道实用经济断面应在此计算范围内。由图4可知，在$H$=1.957~2.054 m区段时曲线的斜率最大，表明此段的宽深比最大。可将$\alpha$=1.03时的断面作为实用经济断面，此时，面积比水力最佳断面面积增加3%，对应的流速$v$满足不冲不淤条件，$H$=2.054 m，$b$=4.447 m，$A$=13.818 m²，$\chi$=10.037 m，$K$=0.702。

表3 实用经济断面水力要素计算结果

| $\alpha$ | $H/H_0$ | $H$/m | $b$/m | $A$/m² | $\chi$/m | $K$ | $v$/(m·s⁻¹) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.01 | 0.774 | 2.347 | 3.167 | 13.550 | 9.556 | 0.614 | 1.919 |
| 1.02 | 0.717 | 2.176 | 3.871 | 13.684 | 9.795 | 0.662 | 1.900 |
| 1.03 | 0.677 | 2.054 | 4.447 | 13.818 | 10.037 | 0.702 | 1.882 |
| 1.04 | 0.645 | 1.957 | 4.958 | 13.952 | 10.282 | 0.736 | 1.863 |

### 3.2 对比分析

将抛物线形复合渠道实用经济断面与梯形[14]、弧形坡脚梯形[7]的实用经济断面进行对比。其中，渠道流量$Q$、糙率$n$、渠道底坡$i$三者都相同，文献[10]指出梯形断面边坡坡比$m$的最佳取值为$m=\sqrt{3}/3$；文献[15]指出弧形坡脚梯形边坡坡比$m$=1.1、圆弧半径与水深比$k_r$=0.3时，渠道的水力性能和抗冻胀性都最优。现将3种渠道断面形式的各参数列于表4。

表4 3种渠道断面的水力参数

| 渠道类型 | 流量$Q$/(m³·s⁻¹) | 糙率$n$ | 底坡$i$ | 边坡$m$ | $k_r$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 梯形 | 26 | 0.015 | $0.52\times10^{-3}$ | $\sqrt{3}/3$ | — |
| 弧形坡脚梯形 | 26 | 0.015 | $0.52\times10^{-3}$ | 1.1 | 0.3 |
| 复合抛物线形 | 26 | 0.015 | $0.52\times10^{-3}$ | — | — |

表5 3种渠道断面对比结果（$\alpha$取1.03）

| 渠道类型 | $H/H_0$ | $H$/m | $b$/m | $A$/m² | $b/H$ | $v$/(m·s⁻¹) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 梯形 | 0.717 | 2.012 | 5.822 | 14.050 | 2.894 | 1.851 |
| 弧形坡脚梯形 | 0.717 | 2.024 | 5.082 | 13.999 | 2.511 | 1.857 |
| 复合抛物线形 | 0.677 | 2.054 | 4.447 | 13.818 | 2.165 | 1.882 |

将表4数据代入梯形[14]、弧形坡脚梯形[7]的实用经济断面计算公式中进行计算，结果见表5（$\alpha$取1.03）。由表5可知，3种断面形式的渠道当中，抛物线形复合渠道实用经济断面面积最小为13.818 m²，故抛物线形复合渠道实用经济断面相比梯形实用经济断面、弧形坡脚梯形实用经济断面面积更小，表明抛物线形复合渠道是更为优越的渠道断面形式。同时，实用经济断面情况下宽深比能够满足方便施工、维护的要求。

## 4 讨 论

在建立平方抛物线形渠坡和水平渠底的复合渠道实用经济断面计算公式时，由于多1个未知参数，不能像梯形、抛物线形渠道一样直接利用与水力最佳断面面积、湿周的关系进行求解；而抛物线形复合断面渠道湿周公式较复杂，又不能像弧形坡脚梯形一样建立未知参数的一元二次方程进行求解。因此，直接从实用经济断面与水力最佳断面水深的比值关系入手，建立$H/H_0$的计算公式；同时，为了简化式（15），利用表格数据进行拟合，找到了获得最佳$H/H_0$所对应的未知参数$\eta$取1.666。

抛物线形复合断面渠道实用经济断面具有更好的水力性能。在相同流量、糙率和渠底坡降的条件下，与梯形、弧形坡脚梯形实用经济断面相比，抛物线形复合断面渠道实用经济断面的过水断面最小，为13.818 m²，比梯形减小了1.65%，比弧形坡脚梯形减小了1.29%；从宽深比来看，梯形渠道实用经济断面的宽深比最大，其次是弧形坡脚梯形，抛物线形复合断面渠道的最小。

抛物线形复合断面渠道的结构为抛物线形渠坡和水平渠底，在施工方面与梯形和弧形坡脚梯形断面渠道相比施工技术要求高，采用以人工为主的传统方法施工时，施工难度大。但是，我国渠道衬砌防渗工程施工目前正向半机械化及机械化施工方向发展[16]，采用机械化施工，抛物线形由于方程的连续性在施工、制模中更容易计算和控制[1]，抛物线形复合断面渠道将会得到迅速推广应用。

## 5 结 论

1）针对抛物线形复合断面渠道水力最佳断面渠口宽、深度大、施工时比较困难的问题，提出了抛物线形复合渠道实用经济断面，适当增加过水断面面积而增大宽深比，使抛物线形复合渠道从窄深式转变为宽浅式，便于实际施工与维护。

2）利用明渠均匀流和曼宁公式推导出了抛物线形复合断面渠道实用经济断面与水力最佳断面过水断面面积、湿周的关系；通过求解得到了抛物线形复合断面渠道实用经济断面与水力最佳断面水深比$H/H_0$的计算公式，在求得水力最佳断面水深的情况下，利用求得的公式可以得到实用经济断面的水深$H$、底宽$b$和抛物线形状系数$K$。

3）通过实例比较了抛物线复合断面渠道、梯形渠道、弧形坡脚梯形渠道的实用经济断面参数，认为在相同流量、相同糙率、相同坡降的条件下抛物线复合渠道实用经济断面的过水断面面积最小为13.818 m²，比梯形减小了1.65%，比弧形坡脚梯形减小了1.29%，使渠道开挖量和衬砌量都会减少，对于实际工程而言更加经济实用。

参考文献：

[ 1 ] 何武全, 宋清林, 宋江涛, 等. 抛物线形混凝土衬砌渠道标准化结构形式研究[J]. 灌溉排水学报, 2016,35(5):10-14.
[ 2 ] 荣丰涛. 弧形坡脚梯形渠道实用经济断面的计算[J]. 山西水利科技, 2004(1):4-6.
[ 3 ] 荣丰涛, 荣榕. 弧形底梯形渠道的实用经济断面计算[J]. 山西水利科技, 2003(3):7-9.
[ 4 ] 周春霞. 梯形灌溉渠道横断面设计分析[J]. 黑龙江水利科技, 2013, 41(4):85-88.
[ 5 ] 雒望余. 圆弧底渠道水力最佳断面及其实用经济断面[J]. 人民黄河, 2014, 36(6):116-118.
[ 6 ] 刘红英, 张新燕, 孙德华, 等. 复合断面渠道水力最佳断面及实用经济断面设计[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(4):89-91.
[ 7 ] 徐文秀. 弧形坡脚梯形渠道实用经济断面计算方法的改进[J]. 水利水运工程学报, 2007(1):70-73.
[ 8 ] 苏东喜. 梯形、矩形渠道实用经济断面低次方系数法应用分析[J]. 水利水电工程设计, 2012, 31(4):21-22.
[ 9 ] 崔娜, 辛全才, 王艳, 等. 输水渡槽的优化设计研究[J]. 人民黄河, 2010(1):134-135.
[10] HAN Y C. Horizontal bottomed semi-cubic parabolic channel and best hydraulic section[J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2015, 45:56-61.
[11] HAN Y C, EASA S, GAO X P. General Explicit Solutions of Most Economic Sections and Applications for Trapezoidal and Parabolic Channels[J]. Journal of Hydrodynamics, 2017,6:45-52.
[12] 李刚, 何武全, 翟东汉. 基于拉格朗日法的抛物线形复合渠道的水力最佳断面[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(11):51-55.
[13] 黄学莲. 梯形渠道经济断面设计[J]. 农业科技与信息, 2009(18):36-37.
[14] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 北京:中国农业出版社, 2002.
[15] 芦琴, 王正中, 刘计良, 等. 弧脚梯形衬砌渠道抗冻胀及水力合理断面的分析[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版）, 2010, 38(1):231-234.
[16] 何武全, 孔东. 渠道衬砌与防渗工程技术[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2011.

# Method to Calculate Economic Cross-section of Parabolic Composite Channel

LI Gang[1], HE Wuquan[1,2*], ZHAI Donghan[1], PENG Chenglin[1], GUO Yinong[3]

(1.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A &F University, Yangling 712100, China:
2.The Ministry of Education Key Laboratory of Agricultural Water and Soil Engineering, Yangling 712100, China;
3.Liaoning Northwest Water Supply Co., Ltd, Shenyang 110000, China)

**Abstract:**【Objective】Cross section is a parameter in channel design and this paper presents a method to calculate economic cross section of composite channel with parabolic cross section and flatten bottom.【Method】From the optimal hydraulic cross section and using curve-fitting against experimental data, we obtained the optimal $H/H_0$ ratio the parabolic water surface width to water depth be $\eta$=1.666. We then derived a formula to calculate the economic cross section of the composite channel.【Result】When flow rate in the channel was $Q$=26 m$^3$/s and other parameters were $n$=0.015, $i$=0.000 52 and $\alpha$=1.03, the water depth was $H$=2.054 m, the bottom width of the channel was $b$=4.447 m, the cross-section the water was $A$=13.818 m$^2$ and the wet length was $\chi$=10.037 m. Under the same flow rate, roughness and slope ratio, the parabolic-shape composite channel had the smallest economic cross section, reduced 1.65% compared to the trapezoid and 1.29% compared to the arc-shaped foot trapezoid.【Conclusion】Parabolic composite channel is most economical.

**Key words:** parabolic composite channel; practical economic section; calculation method

责任编辑：白芳芳