

# 六圆弧蛋形断面无压隧洞水面线解析计算模型

滕凯<sup>1</sup>, 李新宇<sup>2</sup>

(1. 齐齐哈尔市水务局, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 2. 大连交通大学, 辽宁 大连 116021)

**摘要:** 六圆弧蛋形断面形式复杂, 水力要素为分4个区间给出的超越方程, 用常规方法完成水面线计算不但存在误差累积而且计算工作量大、效率低。依据优化拟合理论, 以标准剩余差最小为目标函数, 在工程适用参数范围内, 经拟合计算获得了由一个简化通用算式替代原积分中的分段且不可积函数(最大拟合误差仅为1.53%), 不但实现了由差分逐断面推算改为直接积分求解, 而且由于正、负拟合误差的相互抵消, 使最终计算成果的精度进一步提高。利用该近似公式完成六圆弧蛋形断面隧洞水面线计算, 可使求解过程简化, 工作效率明显提高, 具有实用推广意义。

**关键词:** 六圆弧蛋形过水隧洞; 水面线; 优化拟合; 解析计算模型

中图分类号: TV131

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)04-0174-06

## Calculation model of water surface line analysis in tunnel of six circular egg-shaped section without pressure

TENG Kai<sup>1</sup>, LI Xinyu<sup>2</sup>

(1. Qiqihar City Water Authority, Qiqihar 161006, China; 2. Dalian Jiaotong University, Dalian 116021, China)

**Abstract:** The form of six circular arc and egg-shaped cross-section is complex. The hydraulic element is divided into conventional transcendental equation given by four intervals. The surface line calculation by use of common method exists not only cumulative error but also heavy workload of calculation and low efficiency. Based on optimum and fit theory, took the minimum of standard remaining difference as the objective function, the paper got a simplified universal formula instead of the original integral and non-integral functions within the engineering application parameters obtained by the fitting calculation segmented (maximum fitting error only 1.53%). The method not only realized the solution conversion of differential-by-sectional into direct integration, but also further improved the accuracy of the projections because of the positive and negative fitting errors cancel each other. Using the approximate formula to calculate the water surface line of the six arc egg-shaped section tunnel makes the solved process more simple and the work efficiency higher, and has the practical significance of promotion.

**Key words:** six circular egg-shaped section water tunnel; water surface line; optimum and fit; approximate calculation model

隧洞是水利水电供排水工程中应用较广泛的建筑物形式之一, 在这类工程中, 由于受进、出口水位条件的限制, 在洞内常常产生属于恒定渐变流条件的降水或壅水水面线, 设计人员往往根据工程要求需提供洞内水面线计算成果。目前, 工程上通常采用的水面线计算方法主要有分段求和差分试算法<sup>[1-2]</sup>、迭代法<sup>[3-4]</sup>及图解法<sup>[5]</sup>。这些方法均是以能量方程为基础, 通过分段计算逐级推求下一个(或上一个)断面水位为基本思路来实现的, 因此这些方法均存在人们公认的误差累积和计算繁复问

题。而由于六圆弧蛋形断面隧洞的水力要素分4个区段给出<sup>[6]</sup>, 且为含三角函数的超越方程, 加之恒定渐变流水面线计算方程自身的隐含性, 使得该种断面隧洞内水面线的计算变得更加复杂。因此, 研究提出一种方便实际工程应用的简化近似计算方法具有重要意义, 而将六圆弧蛋形断面隧洞水面线计算公式中的积分函数进行优化拟合替代, 并实现在工程实用参数范围内, 用一个简化近似公式通过人工手算即可直接完成解算的计算方法, 到目前为止尚未见到相关研究成果。

为了解决目前常规算法完成六圆弧蛋形断面隧洞水面线存在的问题,本文依据优化拟合原理,取目标函数为标准剩余差最小,经逐次逼近拟合计算,获得了在工程实用范围内用一个近似可积分函数替代原积分中不可积函数,并通过简单积分得到了含有流程  $S$  及首、末端水深  $h_1, h_2$  的简化解析计算通式,使求解该种断面水面线的计算过程更加简捷、直观,便于实际应用。

## 1 六圆弧蛋形断面隧洞水面线基本方程

由连续方程和能量方程表示的无压六圆弧蛋形断面恒定渐变流水面线数学模型为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i_0 - J}{1 - Fr^2} \quad (1)$$

$$\text{其中: } J = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}} = \frac{n^2 Q^2 \chi^{4/3}}{A^{10/3}},$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gAB^{-1}}} = \frac{QB^{1/2}}{g^{1/2}A^{3/2}} \quad (2)$$

式中:  $dh/ds$  为水深  $h$  关于洞长  $s$  的微分;  $i_0$  为洞底坡降;  $J$  为断面水力坡降;  $Fr$  为断面弗氏数,  $m/s$ ;  $A$  为过水断面面积,  $m^2$ ;  $B$  为洞内水面宽度;  $\chi$  为过水断面湿周,  $m$ ;  $R$  为断面水力半径,  $m$ ;  $n$  为糙率系数;  $Q$  为隧洞过流量,  $m^3/s$ ;  $v$  为断面平均流速,  $m/s$ ;  $g$  为重力加速度, 一般取  $9.81 \text{ m/s}^2$ 。

### 1.1 断面水力要素

六圆弧蛋形过水断面(见图1)是由3种不同长度的半径分别在6个圆心位置通过弧线构成的闭合曲线,其半径分别为  $r_1, r_2$  及  $r_3$ 。各圆弧段所对应的圆心角分别为  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  及  $\alpha_4$ 。其数值关系为:  $r_2 = 0.426042r_1, r_3 = (17/56)r_1, \alpha_1 = 25.375^\circ, \alpha_2 = 121.1838^\circ, \alpha_3 = 29.4081^\circ, \alpha_4 = 40.1281^\circ$ 。

由图1的几何关系可以求得:

$$h_1 = 0.096478r_1, h_2 = 0.195651r_1$$

其水力要素为<sup>[6]</sup>:

$$A = \begin{cases} 0.5r_1^2(2\varphi - \sin 2\varphi) & 0 \leq \varphi \leq 25.375^\circ \\ r_1^2 \left\{ 0.055681 + \left(\frac{17}{56}\right)^2 [(\alpha_4 - \beta) - \sin(\alpha_4 - \beta)] + \right. \\ \left. \left(0.624969 + \frac{17}{56}\cos\beta\right) \left(0.195651 - \frac{17}{56}\sin\beta\right) \right\} & 0 \leq \beta \leq 40.1281^\circ \\ r_1^2(0.2425 + \beta_1 - \sin\beta_1 + \cos\beta_1 \sin\beta_1) & 0 \leq \beta_1 \leq 29.4081^\circ \\ r_1^2 \{ 0.614854 + 0.181512[\beta_2 + 0.5\sin(\alpha_2 - 2\beta_2)] \} & 0 \leq \beta_2 \leq 60.5919^\circ \end{cases} \quad (3)$$

$$B = \begin{cases} 2r_1 \sin\varphi & 0 \leq \varphi \leq 25.375^\circ \\ r_1 \left( \frac{11}{28} + \frac{17}{28}\cos\beta \right) & 0 \leq \beta \leq 40.1281^\circ \\ r_1(2\cos\beta_1 - 1) & 0 \leq \beta_1 \leq 29.4081^\circ \\ 0.852084r_1 \sin(0.5\alpha_2 - \beta_2) & 0 \leq \beta_2 \leq 60.5919^\circ \end{cases} \quad (4)$$

$$X = \begin{cases} r_1\varphi & 0 \leq \varphi \leq 25.375^\circ \\ r_1 \left[ \alpha_1 + \frac{17}{28}(\alpha_4 - \beta) \right] & 0 \leq \beta \leq 40.1281^\circ \\ r_1 \left( \alpha_1 + \frac{17}{28}\alpha_4 + 2\beta_1 \right) & 0 \leq \beta \leq 29.4081^\circ \\ r_1 \left( \alpha_1 + \frac{17}{28}\alpha_4 + 2\alpha_3 + 0.852084\beta_2 \right) & 0 \leq \beta_2 \leq 60.5919^\circ \end{cases} \quad (5)$$

$$h = \begin{cases} r_1(1 - \cos\varphi) & 0 \leq \varphi \leq 25.375^\circ \\ r_1(0.292129 - 0.303571\sin\beta) & 0 \leq \beta \leq 40.1281^\circ \\ r_1(0.292129 + \sin\beta_1) & 0 \leq \beta_1 \leq 29.4081^\circ \\ r_1 \{ 0.29213 + \sin\alpha_3 + 0.42604[\cos(0.5\alpha_2 - \beta_2) - \cos(0.5\alpha_2)] \} & 0 \leq \beta_2 \leq 60.5919^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式中： $h$ 为洞内水深， $m$ ； $\varphi$ 、 $\beta$ 、 $\beta_1$ 及 $\beta_2$ 分别为与 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 及 $\alpha_2$ 同圆心的不同区段水深所对应的圆心角rad(见图2所示)。

式(2)、(3)、(4)、(5)及(6)分别代入式(1)，并设：

$$A_1 = \frac{r^{4/3}}{gn^2}, B_1 = \frac{gr_1^5}{Q^2}, E = \frac{i_0 r_1^{16/3}}{n^2 Q^2}, x = \frac{h}{r_1}$$

经进一步整理即可获得求解六圆弧蛋形断面隧洞水面线的基本公式为：

$$S = A_1 \int \frac{B_1 - Fr^2}{E - J} dx \tag{7}$$

式中： $A_1$ 、 $B_1$ 、 $E$ 均为已知综合参数； $J'$ 、 $R'^2$ 均为计算断面无量纲中间变量； $x$ 为计算断面无量纲水深。

由式(8)、(9)可见， $x$ 的取值范围为四个连续区间，值域为 $[0,1]$ ，而在实际工程中， $x < 0.12$ 情况极为少见；同时，考虑为避免洞内产生不稳定的半有压流现象，《水工隧洞设计规范》<sup>[7]</sup>规定，洞内水面线以上的富余空间面积不宜小于隧洞断面积的15%，且净空高度不应小于0.4 m，由此可以求得 $x < 0.775$ ，因此，本文将 $x$ 的取值范围确定为 $[0.12, 0.80]$ 。

## 2 六圆弧蛋形断面隧洞水面线解析计算模型的建立及精度分析

### 2.1 解析计算模型的建立

因式(7)为分别含有 $J'$ 及 $Fr^2$ (即公式(8)、(9))两个未知量为 $x$ 的不连续分段无量纲超越方程的积分函数，无法通过常规的积分形式直接获解。为解决这一复杂方程的积分求解问题，在工程实用参数范围内(即 $0.12 \leq x \leq 0.8$ )，假定函数 $J' = f(x)$ 、 $Fr'^2 = f(x)$ 可以分别替代式(8)及(9)，并满足以下条件：

### 1.2 水面线基本方程

将六圆弧蛋形断面四个区间所对应的水力要素

$$J' = \begin{cases} 0.5^{-10/3} [2\arccos(1-x) - \sin(2\arccos(1-x))]^{-10/3} \cdot [\arccos(1-x)]^{4/3} & 0 \leq x \leq 0.096478 \\ \left\{ 0.05568 + \left(\frac{17}{56}\right)^2 \left[ \alpha_4 - \arcsin\left(0.96231 - \frac{56x}{17}\right) - \sin\left(\alpha_4 - \arcsin\left(0.96231 - \frac{56x}{17}\right)\right) \right] \right\} + \\ \left[ 0.624969 + \frac{17}{56} \cos\left(\arcsin\left(0.962307 - \frac{56x}{17}\right)\right) \right] \left[ 0.195651 - \frac{17}{56} \left(0.962307 - \frac{56x}{17}\right) \right]^{-10/3} \times \\ \left\{ \alpha_1 + \frac{17}{28} \left[ \alpha_4 - \arcsin\left(0.962307 - \frac{56x}{17}\right) \right] \right\}^{4/3} & 0.096478 \leq x \leq 0.292129 \\ \left\{ 0.534629 + \arcsin(x - 0.292129) - x + \frac{1}{2} \sin[2\arcsin(x - 0.292129)] \right\}^{-10/3} \times & \\ \left\{ \alpha_1 + \frac{17}{28} \alpha_4 + 2\arcsin(x - 0.292129) \right\}^{4/3} & 0.292129 \leq x \leq 0.783 \\ \left\{ 0.614854 + 0.181512 \left[ \frac{\alpha_2}{2} - \arccos(2.347186x - 1.347186) \right] + \frac{1}{2} \times \right. \\ \left. \sin\left(\alpha_2 - 2\left(\frac{\alpha_2}{2} - \arccos(2.347186x - 1.347186)\right)\right) \right\}^{-10/3} \times & \\ \left\{ \alpha_1 + \frac{17}{28} \alpha_4 + 2\alpha_3 + 0.8521 \left[ \frac{\alpha_2}{2} - \arccos(2.347186x - 1.347186) \right] \right\}^{4/3} & 0.783 \leq x \leq 1.0 \end{cases} \tag{8}$$

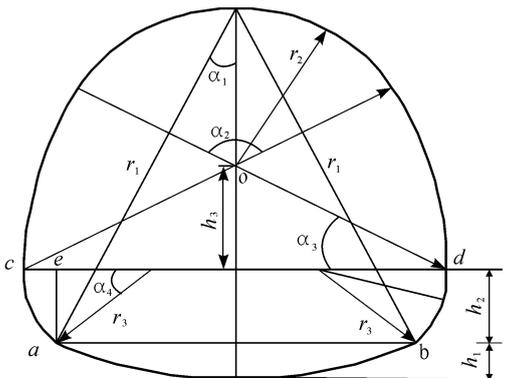


图1 六圆弧蛋形断面

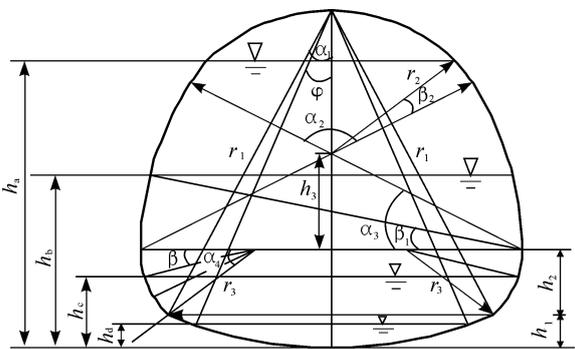


图2 六圆弧蛋形断面计算图

$$Fr^2 = \begin{cases} 0.5^{-3} [2\arccos(1-x) - \sin(2\arccos(1-x))]^{-3} \cdot [2\sin(\arccos(1-x))] & 0 \leq x \leq 0.096478 \\ \left\{ 0.05568 + \left(\frac{17}{56}\right)^2 \left[ \alpha_4 - \arcsin\left(0.962307 - \frac{56x}{17}\right) - \sin\left(\alpha_4 - \arcsin\left(0.962307 - \frac{56x}{17}\right)\right) \right] + \right. \\ \left. \left[ 0.624969 + \frac{17}{56} \cos\left(\arcsin\left(0.962307 - \frac{56x}{17}\right)\right) \right] \left[ 0.195651 - \frac{17}{56} \left(0.962307 - \frac{56x}{17}\right) \right] \right\}^{-3} \times \\ \left[ \frac{11}{28} + \frac{17}{28} \cos\left(\arcsin\left(0.962307 - \frac{56x}{17}\right)\right) \right] & 0.096478 \leq x \leq 0.292129 \\ \left\{ 0.534629 + \arcsin(x - 0.292129) - x + \frac{1}{2} \sin[2\arcsin(x - 0.292129)] \right\}^{-3} \times \\ \{ 2\cos[\arcsin(x - 0.292129)] - 1 \} & 0.292129 \leq x \leq 0.783156 \\ \left\{ 0.614854 + 0.181512 \left[ \frac{\alpha_2}{2} - \arccos(2.347186x - 1.347186) + \frac{1}{2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \sin\left(\alpha_2 - 2\left(\frac{\alpha_2}{2} - \arccos(2.347186x - 1.347186)\right)\right) \right] \right\}^{-3} \times \\ \{ 0.852084 \sin[\arccos(2.347186x - 1.347186)] \} & 0.783156 \leq x \leq 1.0 \end{cases} \quad (9)$$

由式(8) - (9)可见:①要有较好的拟合替代精度,以确保水面线的最终成果满足工程设计要求。②拟合替代公式的表达形式应比较简洁,并且将其代入式(7)后可以满足可积分要求。依据式(8)、(9)即可通过设定不同的  $x$  分别求得  $J'$  及  $Fr^2$ , 分别展绘  $J' - x$  及  $Fr^2 - x$  关系曲线,见图 3 所示。

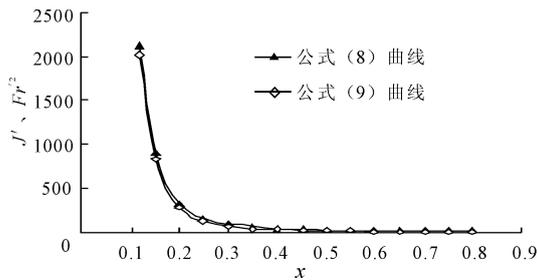


图 3  $J' - x$  及  $Fr^2 - x$  关系曲线

由曲线图形关系可见,  $J' - x$  及  $Fr^2 - x$  具有较好的高次反比例函数关系,据此,经多组备选函数的数值拟合分析及回归计算,以标准剩余差最小为最终希望目标函数<sup>[8-11]</sup>,即:

$$S = \min \sqrt{\sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2 / (n - 1)} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

式中:  $y'_i, y_i$  分别为拟合近似值及理论值;  $n$  为拟合计算的数组数。

经逐次逼近拟合<sup>[12-13]</sup>即可获得如下替代函数,即:

$$J'' = 0.391x^{-4} + 3.107x^{-2} + 1.804 \quad (10)$$

$$Fr'^2 = 0.396x^{-4} + 1.364x^{-2} - 1.058 \quad (11)$$

将式(10)、(11)代入式(7),并取积分可得:

$$S = V \left[ (x_2 - x_1) - \int_{x_1}^{x_2} \frac{mx^2 + w}{ax^4 + bx^2 + c} dx \right] \quad (12)$$

其中:  $V = \frac{A_1(B_1 + 1.058)}{a}$ ,  $m = \frac{1.364a}{B_1 + 1.058}$  -

$3.107$ ,  $w = \frac{0.396a}{B_1 + 1.058} - 0.391$ ,  $a = 10^{-1.804}$ ,

$b = -3.107$ ,  $c = -0.391$

式中:  $V, m, w$  及  $a$  均为中间已知参数;  $J'', Fr'^2$  分别为  $J'$  及  $Fr^2$  的拟合替代值;  $b, c$  均为已知常数。

在工程适用范围内,因  $a = 10^{-1.804} > 0$ , 则:  $b^2 - 4ac > 0$ , 完成式(12)中的积分可得:

$$S = V(x_2 - x_1) - V_1 \left( \arctan \frac{x_2}{f_1} - \arctan \frac{x_1}{f_1} \right) - V_2 \ln \frac{(x_2 - f_2)(x_1 + f_2)}{(x_2 + f_2)(x_1 - f_2)} \quad (13)$$

其中:  $f_1 = \sqrt{\frac{b+D}{2a}}$ ,  $f_2 = \sqrt{\frac{D-b}{2a}}$ ,  $D = \sqrt{b^2 - 4ac}$ ,

$$V_1 = \frac{V[(D+b)m - 2aw]}{D\sqrt{2a(D+b)}}$$

$$V_2 = \frac{V[(D-b)m + 2aw]}{2D\sqrt{2a(D-b)}}$$

式中:  $f_1, f_2, V_1$  及  $V_2$  均为中间参数;  $x_1, x_2$  分别为已知和待求无量纲水深。

利用本文式(13)即可根据已知参数  $Q, n, i_0, r_1$  及  $h_1$  (或  $h_2$ ) 求解出水深为  $h_2$  (或  $h_1$ ) 情况下所对应的流程  $S$ , 较《水工隧洞规范》推荐的分段求和法更加简单和直接,同时也避免了因分段求和法所产生的误差累积。

### 2.2 拟合误差分析

为分析利用式(13)进行水面线计算的精度问

题,先对式(10)及(11)分别拟合式(8)及(9)的替代精度进行分析。在工程实用参数范围内(即  $0.12 \leq x \leq 0.8$ ),可选取不同的  $x_i$  分别代入式(8)~(11)即可分别求得  $J'$ 、 $Fr'^2$  及  $J''$ 、 $Fr''^2$ ,并用式(14)完成拟合相对误差计算,计算结果见表1及表2示。

$$z_i = \frac{y_i' - y_i}{y_i} \times 100\% \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

式中:  $z_i$  为拟合相对误差,%;  $i$  为在拟合计算中所选取的第  $i$  个数据。

由精度比较表1及表2可见,在工程实用参数范围内,用本文式(10)、(11)分别替代由四个区段函数组成的式(8)及(9)的最大拟合替代相对正、负误差分别是:式(10)为 1.413% 和 -1.530%;式(11)为 1.221% 和 -1.199%;且最大拟合误差出现在常用区域边缘,在工程常用区域内,最大拟合误差

表1 式(10)拟合精度比较

$x_i$	$J_i'$	$J_r''^2$	$z_i$
0.12	2120.16246	2103.17746	-0.801
0.15	908.72087	912.23857	0.387
0.18	469.95029	470.16515	0.046
0.20	324.96508	323.85400	-0.342
0.23	201.95266	200.25966	-0.838
0.25	153.23953	151.61200	-1.062
0.28	106.38429	105.04692	-1.257
0.30	85.74658	84.59783	-1.340
0.33	64.19912	63.30492	-1.393
0.35	53.95777	53.22308	-1.361
0.38	42.58824	42.07239	-1.211
0.40	36.88234	36.49619	-1.047
0.43	30.26304	30.04444	-0.722
0.45	26.80801	26.68234	-0.468
0.48	22.66818	22.65491	-0.058
0.50	20.44295	20.48800	0.220
0.53	17.71018	17.82021	0.621
0.55	16.20835	16.34800	0.861
0.58	14.32902	14.49516	1.159
0.60	13.27851	13.45153	1.303
0.63	11.94541	12.11424	1.413
0.65	11.19087	11.34824	1.406
0.68	10.22390	10.35198	1.253
0.70	9.67212	9.77330	1.046
0.73	8.96105	9.01121	0.560
0.75	8.55399	8.56331	0.109
0.78	8.02929	7.96716	-0.773
0.80	7.73159	7.61328	-1.530

表2 式(11)拟合精度比较

$x_i$	$F_i'$	$Fr''^2$	$z_i$
0.12	2012.11008	2003.38644	-0.434
0.15	834.90818	841.78644	0.824
0.18	416.56949	418.26985	0.408
0.20	280.76721	280.54200	-0.080
0.23	167.47566	166.23543	-0.741
0.25	123.41786	122.14200	-1.034
0.28	81.74623	80.76624	-1.199
0.30	63.71210	62.98644	-1.139
0.33	45.31707	44.85902	-1.011
0.35	36.79991	36.46570	-0.908
0.38	27.57503	27.37955	-0.709
0.40	23.06092	22.93575	-0.543
0.43	17.94766	17.90197	-0.255
0.45	15.34160	15.33487	-0.044
0.48	12.28764	12.32199	0.279
0.50	10.68162	10.73400	0.490
0.53	8.74835	8.81653	0.779
0.55	7.70602	7.77866	0.943
0.58	6.42361	6.49601	1.127
0.60	5.71783	5.78644	1.200
0.63	4.83342	4.89244	1.221
0.65	4.33810	4.38881	1.169
0.68	3.70753	3.74391	0.981
0.70	3.34890	3.37499	0.779
0.73	2.88576	2.89603	0.356
0.75	2.61859	2.61844	-0.006
0.78	2.26889	2.25378	-0.666
0.80	2.06270	2.04005	-1.098

小于 1.413%,平均拟合相对误差分别是:式(10)为 -0.053%,式(11)为 0.024%。拟合相对误差小于 1.0% 的点占总计算点数的 60%。可见,本文式(10)、(11)具有较高的拟合替代精度,完全可以满足实际工程的设计精度要求。

由于本文水面线计算公式为拟合替代函数的积分求和所得,而在求和后因正、负误差的相互抵消,可使最终水面线的计算成果精度进一步提高。因此,本文方法获得的水面线成果将更接近理论值。

### 3 应用举例

已知某输水隧洞为六圆弧蛋形断面,最大半径  $r_1 = 3$  m,洞底设计坡降  $i = 0.015$ ,洞内壁糙率系数  $n = 0.014$ ,设计流量  $Q = 24$  m<sup>3</sup>/s,起始水深  $h_1 = 1.9$  m,试计算沿程水面线(洞长为 1.6 km)。

根据明渠均匀流计算方法可求得洞内的临界水深  $h_k = 1.97$  m, 正常水深  $h_0 = 1.099$  m, 因  $h_0 < h < h_k$ , 洞内属降水水面线。取末端计算水深  $h_2 = h_0 (1 + 1\%) = 1.11$  m, 利用本文公式可分别求得:  $f_1 = 0.2549$ ,  $f_2 = 0.3666$ ,  $V = 261.26$ ,  $V_1 = -282.27$ ,  $V_2 = 166.93$ ,  $x_1 = 0.6333$ ,  $x_2 = 0.370$ , 将其分别代入公式(13)即可求得流程  $S$  为:

$$S = V(x_2 - x_1) - V_1 \left( \arctan \frac{x_2}{f_1} - \arctan \frac{x_1}{f_1} \right) - V_2 \ln \frac{(x_2 - f_2) - (x_1 + f_2)}{(x_2 + f_2)(x_1 - f_2)} = 546.13 \text{ m}$$

为比较本文公式计算成果的精度, 采用分段求和法完成水面线计算, 通过取 6 个分段、11 个分段和 15 个分段分别求得对应末端水深  $h_2 = 1.11$  m 时的流程  $S$  分别为 466.84、537.21 和 544.98 m。由于分段求和法存在同号误差, 因此随着分段数的增加, 其水面线的计算成果越接近理论水面线。可见, 本文公式所求成果与常规的取 15 个分段求和成果基本一致(相对误差仅为 0.21%), 本文公式具有较好的计算精度。

## 4 结 语

六圆弧蛋形过水横断面几何图形复杂, 采用常规的分段求和法计算洞内水面线十分繁琐。本文依据优化拟合理论, 将积分内不可积分函数用可积分函数进行替代, 获得了可直接完成该种断面隧洞内水面线求解的近似计算通式, 其主要优点是:

(1) 所建立的简化公式在工程实用参数范围内不分段, 可使水面线计算由一个表达通式完成, 且公式的表达形式简单明了, 避免了分段公式在求解计算中所带来的诸多不便。

(2) 公式中的系数均为常数, 当由已知参数完成系数计算后, 即可非常简捷地由已知水深  $h_1$  计算出对应水深  $h_2$  情况下的流程  $S$ , 进而完成水面线计算, 实现了计算简单、快捷(仅借助计算器即可), 有效提高了工作效率, 具有实际应用推广价值。

(3) 由于分段求和法无论壅水还是降水水面线均存在同号误差, 最终造成误差累积, 影响成果精度。因此, 只能通过增加分段数量实现提高计算精度, 而增加分段数量又使计算工作量增大。本文计算公式是通过对原函数的高精度替代并积分所得, 因此, 由于正、负替代误差的相互抵消, 较好地解决了误差累积问题, 使水面线计算成果的精度进一步提高。

## 参考文献:

- [1] 武汉大学水利水电学院. 水力计算手册[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 60-80.
- [2] 水电水利规划设计总院. 水工设计手册[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [3] 张建民, 王玉蓉, 许唯临. 恒定渐变流水面线计算的一种迭代方法[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 501-504.
- [4] 万五一, 江春波, 李玉柱. 变步长法在天然河道水面线计算中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(4): 648-650.
- [5] 张志昌. 水力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [6] 李若冰, 张志昌. 明渠六圆弧蛋形断面临界水深和收缩断面水深的计算[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(4): 463-467.
- [7] 国家电力公司成都勘测设计研究院. 水工隧洞设计规范 DL/T5195-2004[M]. 北京: 水利水电出版社, 2003.
- [8] 刘刚, 滕凯. 梯形断面均匀流水深的近似计算公式[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1): 39-42.
- [9] 谢成玉, 滕凯. 三次抛物线形渠道断面收缩水深的简化计算公式[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 136-138.
- [10] 谢成玉, 滕凯. 抛物线形断面渠道均匀流水深的近似计算公式[J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 94-95.
- [11] 滕凯. 消力池深的简化算法[J]. 人民长江, 2012, 43(15): 73-75+87.
- [12] 王慧文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [13] 阎凤文. 测量数据处理方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1988.