

标准 U 形断面渠槽水面线的计算模型

滕 凯

(齐齐哈尔市水务局, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘 要: 用常规的分段求和法完成标准 U 形断面渠槽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,并通过积分获得了该种断面水面线的解析计算模型,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。利用该模型完成标准 U 形断面水面线计算可使求解过程大大简化,工作效率明显提高,具有实用推广意义。

关键词: 标准 U 形断面;水面线;优化拟合;计算模型

中图分类号:TV131.4

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)02-0071-04

标准 U 形断面具有曲线连续、水流条件好、力学性能优越等优点,因此该种断面是渡槽工程普遍采用的形式之一。同时,该种断面也以工程占地少而被越来越广泛地应用于水利水电灌排及城市供排水工程。在这类工程中,由于受进、出口水位条件的限制,在渠槽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渠槽内水面线计算成果。由于标准 U 形断面渠槽分别由下部的半圆形及上部的矩形断面构成,其水力要素不但涉及超越方程而且为分段函数,因此,采用常规的分段求和法^[1,2]、迭代法^[3,4]及图解法^[5]计算渠槽内的水面线不但过程繁复,而且求解成果精度不高,不便应用。因此,寻求一种更加简单实用的简化计算方法具有一定的实际意义,而将标准 U 形断面渠槽水面线计算公式中的分段积分函数进行优化拟合替代,并实现在工程适用参数范围内,用一个简化计算模型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在标准 U 形断面渠槽水面线计算时存在的问题,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的不可积函数,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 的简化解析计算模型,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 标准 U 形断面水面线基本方程

由连续方程和能量方程表示的明渠恒定渐变流水面线数学模型为:

$$\frac{dh}{dS} = \frac{i_0 - J_0}{1 - F_{r,0}^2} \quad (1)$$

$$\text{其中: } J_0 = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}} = \frac{n^2 Q^2 X^{4/3}}{A^{10/3}}, F_{r,0} = \frac{v}{\sqrt{gAB^{-1}}} = \frac{QB^{1/2}}{g^{1/2}A^{3/2}} \quad (2)$$

式中: dh/dS 为水深 h 关于渠长 S 的微分; i_0 为渠槽设计坡降; J_0 为断面水力坡降; $F_{r,0}$ 为断面弗氏数; A 为过水断面面积, m^2 ; B 为槽内水面宽度, m ; X 为过水断面湿周, m ; R 为断面水力半径, m ; n 为糙率系数; Q 为渠槽过流量, m^3/s ; v 为断面平均流速, m/s ; g 为重力加速度,一般取 $9.81 m/s^2$ 。

1.1 标准 U 形断面水力要素

对于标准 U 形断面(见图 1),由其几何关系可得:

$$A = \begin{cases} r^2 \left[\arccos \left(1 - \frac{h}{r} \right) - \left(1 - \frac{h}{r} \right) \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h}{r} \right)^2} \right] & 0 \leq h \leq r \\ r^2 \left[\frac{\pi}{2} - 2 \left(1 - \frac{h}{r} \right) \right] & r < h < \infty \end{cases} \quad (3)$$

$$X = \begin{cases} 2r \arccos \left(1 - \frac{h}{r} \right) & 0 \leq h \leq r \\ r \left[\pi - 2 \left(1 - \frac{h}{r} \right) \right] & r < h < \infty \end{cases} \quad (4)$$

收稿日期:2013-05-07

作者简介:滕凯(1957-),男,黑龙江齐齐哈尔人,高级工程师,学士学位,主要从事水利防灾减灾及工程优化设计研究。E-mail:tengkai007@163.com

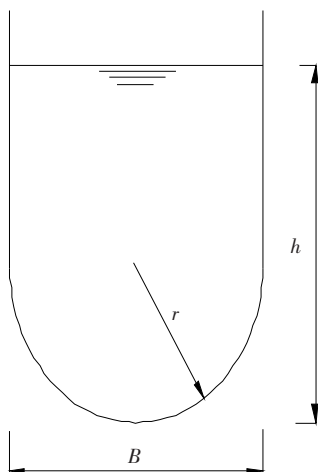


图1 标准U形断面

Fig.1 Standard U-shaped cross section

$$B = \begin{cases} 2r \left(1 - \left(1 - \frac{h}{r} \right)^2 \right)^{0.5} & 0 \leq h \leq r \\ 2r & r < h < \infty \end{cases} \quad (5)$$

式中: r 为断面圆弧半径, m。

1.2 标准U形断面渠槽水面线基本计算模型

将式(2)~(5)代入式(1), 并设:

$$A_1 = \frac{r^{4/3}}{gn^2 2^{1/3}}, B_1 = \frac{gr^5}{2Q^2}, E = \frac{i_0 r^{16/3}}{2^{4/3} n^2 Q^2}, x = \frac{h}{r}$$

式中: A_1 、 B_1 、 E 均为已知综合参数; x 为无量纲水深。

经进一步整理即可获得计算标准U形断面渠槽水面线的基本公式为:

$$S = A_1 \int \frac{B_1 - F_r^2}{E - J} dx \quad (6)$$

其中:

$$J = \begin{cases} [\arccos(1-x)]^{4/3} [\arccos(1-x) - (1-x)\sqrt{1-(1-x)^2}]^{-10/3} & 0 \leq x \leq 1 \\ [\pi/2 - (1-x)]^{4/3} [\pi/2 - 2(1-x)]^{-10/3} & 1 < x \end{cases} \quad (7)$$

$$F_r^2 = \begin{cases} [1 - (1-x)^2]^{1/2} [\arccos(1-x) - (1-x)\sqrt{1-(1-x)^2}]^{-3} & 0 \leq x \leq 1 \\ [\pi/2 - 2(1-x)]^{-3} & 1 < x \end{cases} \quad (8)$$

式中: J 、 F_r^2 均为计算断面无量纲中间变量。

由文献[6]可知, 对于标准U形过水断面, 其水力最优参数为 $x=1.0$ (即为半圆形过水断面), 在实际工程中, 为了尽量降低渠槽主体工程造价, 设计断面一般均取较接近于最优断面的工程参数, 因此, x 的实际取值范围一般均在 $[0.5, 2.0]$ 之间, 本文取 $0.5 \leq x \leq 2.0$ 。

2 标准U形断面水面线解析计算模型的建立及精度分析

2.1 模型的建立

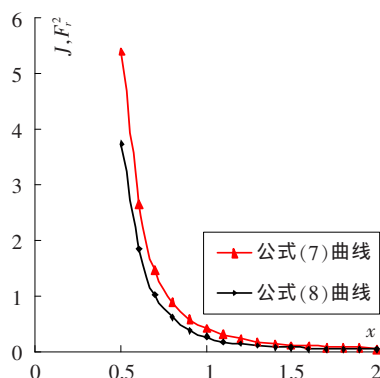
在式(6)中, 因 J 及 F_r^2 (即公式(7)、(8))均为以 x 为未知量的两个无量纲超越方程, 无法通过常规的数学方法直接获解。为解决这一复杂方程的积分求解问题, 在工程适用参数范围内 (即 $0.5 \leq x \leq 2.0$), 假定函数 $J' = f_1(x)$ 、 $F_r'^2 = f_2(x)$ 可以分别替代式(7)及(8), 并满足以下条件:

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拟合替代公式在工程适用范围内应为不分段的表达通式, 并且表达形式应为最简洁的常规函数, 以便使最终获得的计算模型达到最简化。

③将拟合式 $J' = f_1(x)$ 、 $F_r'^2 = f_2(x)$ 代入式(6)后, 应满足用常规的数学方法可直接完成积分。

依据式(7)、(8)即可通过设定不同的 x 分别求得 J 及 F_r^2 , 分别展绘 $J \sim x$ 及 $F_r^2 \sim x$ 关系曲线, 见图2所示。

图2 $J \sim x$ 及 $F_r^2 \sim x$ 关系曲线Fig.2 $J \sim x$ and $F_r^2 \sim x$ curve

由图2的曲线形式可见, $J \sim x$ 及 $F_r^2 \sim x$ 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^[7-10], 即

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

式中: L_{\min} 为最小标准剩余差; y_i' 、 y_i 分别为拟合近似计算值及理论计算值; n 为拟合计算的数组数。

经逐次逼近拟合^[11-12]即可获得如下替代函数, 即

$$J' = 0.3067x^{-4} + 0.096x^{-2} + 0.0084 \quad (9)$$

$$F_r'^2 = 0.2274x^{-4} + 0.0306x^{-2} + 0.0002 \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入式(6)经整理并取积分可得:

$$S=V\left[(x_2-x_1)-\int_{x_1}^{x_2}\frac{mx_2+w}{ax^4+bx^2+c}dx\right]$$
 (11)

其中: $V=\frac{A_1(B_1-0.0002)}{a}$, $m=\frac{0.0306a}{B_1-0.0002}+b$
 $w=\frac{0.2274a}{B_1-0.0002}+c$, $a=E-0.0084$, $b=-0.096$, $c=-0.3067$

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

在工程适用范围内,因 $a=E-0.0084>0$, 则: $b^2-4ac>0$, 完成式(11)中的积分可得:

$$S=V(x_2-x_1)-V_1\left(\arctan\frac{x_2}{f_1}-\arctan\frac{x_1}{f_1}\right)-V_2\left[\ln\frac{(x_2-f_2)(x_1+f_2)}{(x_2+f_2)(x_1-f_2)}\right]$$
 (12)

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(12)即可根据已知参数 Q 、 n 、 i_0 、 r 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 , 较目前通常采用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(12)进行水面线计算的精度问题, 先对式(9)及(10)分别拟合式(7)及(8)的替代精度进行分析。在工程适用参数范围内(即 $0.5\leq x\leq 2.0$), 可选取不同的 x_i 分别代入式(7)~(10)即可分别求得 J 、 F_r^2 及 J' 、 $F_r'^2$, 并用式(13)完成拟合相对误差计算, 计算结果见表1及表2所示。

$$z_i=\frac{y_i'-y_i}{y_i}\times 100\%$$
 (13)

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 个数据比较点。

由精度比较表1及表2可见, 在工程适用参数范围内, 用本文式(9)、(10)分别替代式(7)及(8)的最大拟合替代相对正、负误差分别是: 式(9)为1.901%和-1.855%; 式(10)为0.617%和-0.518%; 且最大拟合相对误差均出现在工程不常用区域的边缘, 在工程适用参数区域内, 其最大拟合相对误差分别为: 式(9)小于1.783%; 式(10)小于0.518%, 平均拟合相对误差分别是: 式(9)为0.043%, 式(10)为-0.043%。可见, 本文式(9)、(10)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。另一方面, 由于本文水面线计算模型为拟合替代函数的积分求和所得, 而在求和后, 因正、负拟合误差的相互抵消, 可使最终水面线计算成果的精度进一步提高。

表 1 式(9)拟合精度比较
Table1 Comparison of fitting accuracy by formula (9)

x_i	J_i	J'_i	z_i	x_i	J_i	J'_i	z_i
0.50	5.39976	5.29960	-1.855	1.30	0.17404	0.17259	-0.831
0.55	3.70827	3.67744	-0.831	1.35	0.15513	0.15341	-1.111
0.60	2.64202	2.64158	-0.017	1.40	0.13906	0.13722	-1.327
0.65	1.94171	1.95376	0.621	1.45	0.12529	0.12344	-1.473
0.70	1.46551	1.48170	1.105	1.50	0.11340	0.11165	-1.546
0.75	1.13194	1.14839	1.453	1.55	0.10308	0.10149	-1.543
0.80	0.89222	0.90718	1.677	1.60	0.09407	0.09270	-1.463
0.85	0.71604	0.72881	1.783	1.65	0.08616	0.08504	-1.306
0.90	0.58399	0.59437	1.778	1.70	0.07919	0.07834	-1.072
0.95	0.48329	0.49131	1.662	1.75	0.07300	0.07245	-0.761
1.00	0.40528	0.41110	1.435	1.80	0.06750	0.06725	-0.375
1.05	0.34400	0.34780	1.104	1.85	0.06258	0.06263	0.086
1.10	0.29512	0.29722	0.710	1.90	0.05817	0.05852	0.619
1.15	0.25559	0.25634	0.294	1.95	0.05419	0.05485	1.225
1.20	0.22323	0.22297	-0.115	2.00	0.05061	0.05157	1.901
1.25	0.19644	0.19546	-0.495				

表 2 式(10)拟合精度比较
Table2 Comparison of fitting accuracy by formula (10)

x_i	F_r^2	$F_r'^2$	z_i	x_i	F_r^2	$F_r'^2$	z_i
0.50	3.73795	3.76100	0.617	1.30	0.09776	0.09792	0.173
0.55	2.57954	2.58643	0.267	1.35	0.08540	0.08545	0.060
0.60	1.84016	1.83983	-0.018	1.40	0.07504	0.07501	-0.050
0.65	1.34977	1.34653	-0.240	1.45	0.06630	0.06620	-0.151
0.70	1.01379	1.00976	-0.398	1.50	0.05885	0.05872	-0.235
0.75	0.77711	0.77330	-0.491	1.55	0.05249	0.05233	-0.298
0.80	0.60633	0.60319	-0.518	1.60	0.04701	0.04686	-0.336
0.85	0.48047	0.47818	-0.478	1.65	0.04227	0.04212	-0.346
0.90	0.38599	0.38457	-0.369	1.70	0.03814	0.03801	-0.328
0.95	0.31388	0.31329	-0.187	1.75	0.03453	0.03444	-0.279
1.00	0.25801	0.25820	0.073	1.80	0.03137	0.03131	-0.198
1.05	0.21440	0.21503	0.296	1.85	0.02858	0.02855	-0.085
1.10	0.18009	0.18080	0.396	1.90	0.02611	0.02612	0.061
1.15	0.15273	0.15335	0.410	1.95	0.02392	0.02397	0.239
1.20	0.13064	0.13111	0.363	2.00	0.02196	0.02206	0.450
1.25	0.11261	0.11292	0.279				

3 应用举例

已知某输水渡槽为标准 U 形断面, 底圆半径 $r=3.0\text{m}$, 槽底设计坡降 $i=0.001$, 槽内壁糙率系数 $n=0.015$, 设计流量 $Q=22.0\text{m}^3/\text{s}$, 在渡槽末端设节制闸壅高水位, 已知末端水深 $h_2=5.1\text{m}$, 试计算沿程水面线(渡槽长为 11.0km)。

根据明渠均匀流计算方法可求得渡槽的临界水深 $h_k=1.667\text{m}$, 正常水深 $h_0=2.182\text{m}$, 因 $h_k < h_0 < h$, 槽内属壅水水面线。取首端计算水深 $h_1=h_0(1+1\%)=2.204\text{m}$, 利用本文公式可分别求得: $f_1=0.67475, f_2=0.72866, V=3\ 019.62, V_1=547.21, V_2=-348.39, x_1=0.7347, x_2=1.7$, 将其分别代入公式(12)即可求得流程 S 为:

$$S=V(x_2-x_1)-V_1\left(\arctan\frac{x_2}{f_1}-\arctan\frac{x_1}{f_1}\right)-V_2\left[\ln\frac{(x_2-f_2)(x_1+f_2)}{(x_2+f_2)(x_1-f_2)}\right]=4\ 475.13\text{m}$$

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 7 个分段、14 个分段和 21 个分段分别求得对应首端水深 $h_1=2.204\text{m}$ 时的流程 S 分别为 $4\ 058.68\text{m}$ 、 $4\ 273.92\text{m}$ 和 $4\ 397.19\text{m}$ 。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 21 个分段求和成果基本一致(相对误差仅为 1.74%), 本文公式具有较好的计算精度。

4 结语

采用常规的分段求和法计算标准 U 形渠槽水面线十分繁琐。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水面线计算的解析通式, 其主要优点是:

(1) 所建立的简化公式在工程适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在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]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006:60-80. (School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University. Handbook of Hydraulic Calculation

[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2006:60-80. (in Chinese))

[2] 水利部水利水电规划总院. 水工设计手册(2版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011. (Water Resources & Hydropower Planning and Design General Institute, MWR. Hydraulic Design Manual (2 edition) [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2011. (in Chinese))

[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. (ZHANG Jianmin, WANG Yurong, XU Weilin. New iteration method for calculating water level of gradually varied steady flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4): 501-504. (in Chinese))

[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. (WAN Wuyi, JIANG Chunbo, LI Yuzhu. Application of varies increment iteration to simulation of water-surface profile in natural channels [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(4): 648-650. (in Chinese))

[5] 清华大学. 水力学(修订本)上册[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990. (Tsinghua University. Hydraulics (revised) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990. (in Chinese))

[6] 张志昌, 李银才, 刘亚菲, 等. U形渠道水力最优断面的计算[J]. 陕西水力发电, 2001, 17(2): 25-27. (ZHANG Zhichang, LI Yincui, LIU Yafei, et al. Calculation of optimal hydraulic cross section for U-shape canal [J]. Journal of Shaanxi Water Power, 2001, 17(2): 25-27. (in Chinese))

[7] 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. (XIE Chengyu, TENG Kai. Simplified equation of contracted water depth in a channel having a cubical paraboloid section [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 148-150. (in Chinese))

[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): 41-44. (LIU Gang, TENG Kai. Approximate calculation formula for uniform flow depth of trapezoidal cross-section [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(1): 41-44. (in Chinese))

[9] 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, 172. (XIE Chengyu, TENG Kai. Approximate calculation formula for uniform flow depth of parabolic cross-section channel [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 94-95, 172. (in Chinese))

[10] 滕凯. 消力池深的简化算法[J]. 人民长江, 2012, 43(15): 77-79, 91. (TENG Kai. Simplified calculation method of depth of stilling basin [J]. Yangtze River, 2012, 43(15): 77-79, 91. (in Chinese))

[11] 王慧文. 偏最小二乘回归法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. (WANG Huiwen. Partial least squares regression method and its application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. (in Chinese))

[12] 阎凤文. 测量数据处理方法 [M]. 北京: 原子能出版社, 1988. (YAN Fengwen. Measurement Data Processing Method [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1988. (in Chinese)) (下转第 86 页)

表2 不同 ΔZ 流量计算误差Table2 The errors of discharge calculated with different ΔZ

水位允许限差 ΔZ /cm	年径流量误差 /%	月平均流量误差 /%	洪量误差 /%
2.5	1.7	-0.9~4.9	-0.3~1.9
2.0	1.7	-0.8~1.0	0.0~1.7
1.5	1.1	-0.1~2.8	-0.6~1.3

变化转折点,反应出水位变化的完整过程。

4 结语

应用以水位摘录允许限差 ΔZ 为控制的D-P算法能有效地对固态存储水位进行精简摘录,摘录成果可以满足有关规范要求。水位摘录允许限差 ΔZ 表示摘录数据最大误差,实际使用中可取1.5~2.0cm。该法即适用于定时采集,也适用于事件采集取得的水位数据精简摘录。另外,该法也可考虑用于由自动监测仪器取得的其它水文要素过程的精简摘录,如固定式AD-CP测得的流速过程。

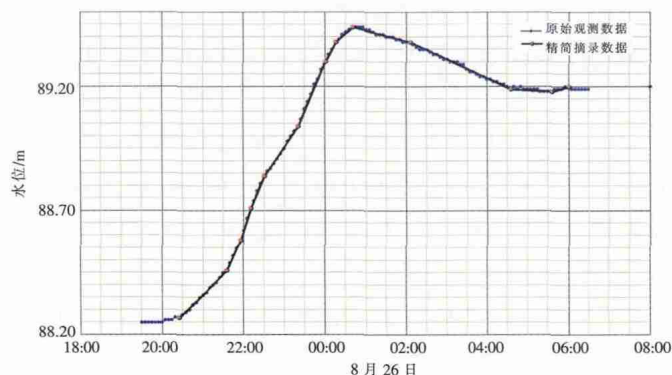


图2 水位精简摘录成果的软件截图

Fig.2 The hydrograph of stages extracted by applying the improved Douglas-Peucker algorithm

参考文献:

- [1] 林祚顶. 水文现代化与水文新技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (LIN Zuoding. Modernization and New Technology of Hydrology [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008. (in Chinese))
- [2] GB/T 50138-2010, 水位观测标准[S]. (GB/T 50138-2010, Standard for Stage Observation [S]. (in Chinese))
- [3] Douglas D H, Peucker T K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature [J]. The Canadian Cartographer, 1973, 10(2): 112-122.

Extraction of Simplified Stage Data from Solid State Storage

ZHAO Liangmin

(Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Fujian Province, Fuzhou 350001, China)

Abstract: This paper discussed the issues and requirements about how to extract the simplified stage data inform solid state storage, and introduced to Douglas-Peucker algorithm for curve vector compression. The algorithm was made better to accommodate simplification of stage data in this paper. A practical example of improved Douglas-Peucker algorithm was described, which indicates the effectiveness of this method.

Key words: solid state storage; stage; extraction

(上接第74页)

A Model for Standard U-shaped Cross-section Surface Curve Calculation

TENG Kai

(Water Authority of Qiqihar City, Qiqihar 161006, China)

Abstract: Summation method with conventional staging to complete the standard U-shaped cross-section surface curve calculation not only exist cumulative error, but also does calculation of the heavy workload with low efficiency. Based on the theory of optimum fitting, with the standard minimum residual difference as the objective function, in the scope of the engineering applicable parameters, a non-integrable function was obtained by a simplified formula to replace the segments in the original integral. By integration, an analytical model for the cross-sectional surface curve was obtained. Because the positive and negative fitting errors offset each other the accuracy of the calculation was higher.

Key words: standard U-shaped cross section; normal depth; optimization fitting; approximate calculation