

复杂地形条件下天然河道水面线计算研究

林劲松¹, 巨江², 张宽地¹, 吕宏兴¹

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2 西北勘测设计研究院 科研工程试验分院, 陕西 西安 710043)

[摘要] **【目的】**解决复杂地形条件下天然河道断面水面线计算问题。**【方法】**采用预测-校正求解方法, 在一维河床冲淤变形计算模型基础上, 增加了急流均匀流水深与临界水深判断公式, 为解决河道正坡、倒坡交替出现, 突扩、突缩频繁发生的复杂地形条件下水面线计算的不连续性问题, 并将该方法在黄河羊曲水电站河段进行了实例验证。**【结果】**建立了解决复杂地形条件下天然河道水面线计算模型, 并将该模型进行实例验证, 结果表明, 用该模型计算的水面线与实测水面线吻合较好, 可满足工程设计的精度要求。**【结论】**将该研究应用于黄河羊曲水电站天然河道的水面线计算, 得到了原河道各级流量下的水面线, 可供其上、下游水库梯级开发的水能规划部门参考应用。

[关键词] 复杂地形条件; 急流均匀流; 临界水深; 水面线计算

[中图分类号] TV13

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2010)09-0187-05

Study on natural river water surface calculation under complex terrain conditions

LIN Jin-song¹, JU Jiang², ZHANG Kuan-di¹, LÜ Hong-xing¹

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

2 Northwest Investigation Design and Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: **【Objective】** For complex terrain conditions, a calculation method is provided to solve the interruption of natural river water surface. **【Method】** By using Predictor-Corrector Method, based on the application of one-dimensional deformation of riverbed erosion and deposition calculation model, an increase of a formula to solve the river slope, down slope turns, sudden expansion, sudden contraction frequent complex terrain conditions was added to determine the uniform flow depth and critical depth, the discontinuities of the water-line calculation of the problem was realized. The method was validated in Yang Qu Hydropower station in the Yellow River. **【Result】** A natural water line calculation model under complex terrain is established and the instance is validated by the model. The results showed that the model calculations of the water line is closer to the measurement of the water line, satisfying precision requirements of the engineering design. **【Conclusion】** The research was applied to solve the natural water line of Yang Qu Hydropower Station on Yellow River. The discharge of the natural original river water lines at all levels was obtained, which could be used for a reference applications by its upstream and downstream reservoirs of hydropower cascade development planning departments.

Key words: complex terrain condition; jet-uniform flow; critical depth; water surface calculation

在大江大河上游梯级水库的开发利用上, 天然河道水面线的计算、绘制及研究是水能规划中的重

* [收稿日期] 2010-03-04

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目(40335050); 2009 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090204110019); 西北农林科技大学留学归国人员科研基金项目(01140507); 西北农林科技大学科研专项基金项目(A213020503)

[作者简介] 林劲松(1968—), 男, 湖南长沙人, 副教授, 在读博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: linjinsong01369@nwsuaf.edu.cn

要内容,尤其是梯级水库开发设计中的一个主要内容。目前,对于规则棱柱形渠道的水面线计算已经比较成熟^[1-2],但复杂地形天然河道水面线计算问题一直未得到很好地解决。近年来,国内学者针对该问题进行了不断探索,如魏文礼等^[3]采用预测-校正技术的隐式数值格式求解控制水流运动的二维浅水方程,建立了模拟大坝瞬间全溃或局部溃倒所致的洪水演进过程数学模型,应用该模型对矩形明渠中缓、急流过渡的水面曲线进行了数值计算,并与理论解进行了比较。王志力等^[4]、王翰等^[5]通过改进动能修正系数和引入综合局部系数,解决了采用常规的水面线计算方法计算山区性河段水面线时,出现的下游水头比上游水头大或糙率、局部损失系数变化较大的问题。黄佑生等^[6]在现行水面线试算模型的基础上,改造得出一种新的水面线试算模型,用该模型解决了由上游控制水位向下直接试算推求河道水面线的问题。在溢洪道棱柱形断面中,曹长冲等^[7]提出了一种计算从缓流到急流控制水深的新方法。万五一等^[8]、张建民等^[9]分别采用变步长方法和收敛迭代算法,对水面线的计算方法进行了优化提高。以上研究主要针对的是规则形断面或者地形变化较小地区,但随着我国水电开发的不断深入,大江大河上游河段已经成为主要开发地区,而该河段一般均属山区河道,地形变化复杂,峡谷一盆地一峡谷相连,水下地形变化多端,正坡、倒坡、平坡相间,给常规水面线计算带来了极大的难度。为此,本研究采用预测-校正求解方法,在一维河床冲淤变形计算模型的基础上,增加了急流的均匀流水深与临界水深判断公式,以解决河道正坡、倒坡交替出现,突扩、突缩频繁发生的复杂地形条件下,水面线计算不连续的问题,并将该方法应用于黄河羊曲水电站河段,旨在为复杂地形条件下天然河道水面线的计算提供科学依据。

1 计算原理

本工程使用原水利部西北水利科学研究所多年来开发研制的一维河床冲淤变形计算模型。该模型已在黄河中、下游河道^[10]及渭河、三门峡水库、冯家山水库调水调沙研究^[11-12]等若干工程的河床变形计算中推广使用,并在 U 型渡槽粉煤灰浆输送能力研究^[13]、水电站长引水渠道瞬变流计算研究^[14]及水电站水力过渡过程仿真计算^[15]中得到了应用。该模型克服了浅滩急流中出现的水跌、水跃水面线间断计算难题,模型概况如下。

1.1 控制方程

一维明渠恒定非均匀流基本方程为:

$$-\frac{d}{dx}\left(y+\frac{Q^2}{2gA^2}\right)=\frac{Q^2}{K^2}+h_j。 \quad (1)$$

式中: x 为纵向流程长度, y 为水位, Q 为流量, g 为重力加速度, A 为横断面过水面积, K 为流量模数, h_j 为局部水头损失。 h_j 的表达式为:

$$h_j=\xi\left|\frac{V_i^2}{2g}-\frac{V_{i+1}^2}{2g}\right|。 \quad (2)$$

式中: ξ 为局部水头损失系数,突扩时取 1,突缩时取 0.5; g 为重力加速度, V_i 、 V_{i+1} 分别为相邻 2 个断面的流速。

推移质输沙率方程为:

$$S=\alpha\left(\frac{VJ}{\omega}\right)^\beta\omega。 \quad (3)$$

式中: S 为输沙率, α 为系数, V 为流速, J 为比降, ω 为泥沙沉速, β 为指数系数。

河床变形方程为:

$$\gamma'B\frac{\partial Z}{\partial t}+\frac{\partial(QS)}{\partial x}=0。 \quad (4)$$

式中: γ' 为泥沙干容重, B 为河宽, Z 为河床高程, t 为时间。

1.2 算法简介

在相邻 2 个节点上,将方程(1)写成差分形式:

$$y_j-y_{j+1}+\left(\frac{Q^2}{2gA_j^2}-\frac{Q^2}{2gA_{j+1}^2}\right)=\frac{1}{2}\left(\frac{Q^2}{K_j^2}+\frac{Q^2}{K_{j+1}^2}\right)\Delta x_j。 \quad (5)$$

方程(5)可用预测-校正法求解。对于缓流问题,由下游已知水位边界条件向上游递推可求解水面线;急流问题由上游水位边界向下游递推。具体步骤为:首先由下游 $j+1$ 断面按均匀流预测上游 j 断面的水位,然后代入方程(5)得到 j 断面的校正水位,如果连续迭代 2 次后的水位仍未能达到允许误差,则继续用方程(5)进行迭代。上游 j 断面水位的进一步计算可用下列 2 个方程表示:

预测:

$$y_j=y_{j+1}+\frac{Q^2}{K_{j+1}^2}\Delta x_j, \quad (6)$$

校正:

$$y_j^k=y_{j+1}-\left(\frac{Q^2}{2gA_j^2}-\frac{Q^2}{2gA_{j+1}^2}\right)+\frac{1}{2}\left(\frac{Q^2}{K_j^2}+\frac{Q^2}{K_{j+1}^2}\right)\Delta x_j。 \quad (7)$$

判断 $|y_j^{k+1}-y_j^k|\leq\epsilon$ 是否成立,若是则迭代结束,否则按式(7)继续迭代。

天然河道横断面形状极不规则,横断面宽度 B 、过水面积 A 、流量模数 K 等随水位 y 变化的曲线光滑性较差,从数学角度而言即为 $B(y)$ 、 $A(y)$ 、 $K(y)$ 曲线连续不可导,导致(7)式迭代收敛困难,甚至误差值 $|y_j^{k+1} - y_j^k|$ 振荡根本不收敛,故引入松弛因子 β ($0 \leq \beta \leq 1$) 能很好地解决收敛问题。具体方法为将每次式(7)的迭代数值用下式修正后,代入式(7)后再次进行迭代:

$$y^{k+1} = \beta y^{k+1} + (1 - \beta) y^k. \quad (8)$$

工程实践发现,取 $\beta = 0.3$ 收敛较快。

一维明渠恒定非均匀流的基本方程(1)适合于水面线连续的水流运动,对于河道正坡、倒坡交替出现,突扩、突缩频繁发生的复杂地形,经常会产生水跌和水跃,导致水面线间断。因为能量方程只适合于连续的水流运动,此时方程(1)已不能满足实际要求;故水面线间断时必须附加动量方程。因此,在水面线计算之前,先要确定每一个河段的均匀流水深和临界水深,判断该水面线是壅水还是降水曲线。按照断面比能理论,如果计算的水位低于临界水深,表明该河段发生了水跃,跃前水深可近似地用临界水深代替,此时上游水面线按水跌降水曲线计算,这样可避免用动量方程进行计算。

均匀流水深计算方程为:

$$g(h) = Q - K(h) \sqrt{S_0} = 0. \quad (9)$$

式中: $g(h)$ 为均匀流水深,对负坡或水平坡度的河道而言均匀流水深均为无穷大;流量模数 $K(h)$ 是水深 h 的函数; S_0 为河道底坡。

临界水深是断面比能最小时所对应的水深,在给定的流量下其佛汝德等于 1,临界水深的计算公式为:

$$f(h) = 1 - \frac{Q^2 B(h)}{g A^3(h)} = 0. \quad (10)$$

式中: $f(h)$ 为临界水深, $B(h)$ 为已知水位或水深的水面宽度, $A(h)$ 为已知水位或水深下的横断面过水面积。临界流水深的计算方法与均匀流水深相似。计算定床水面线时不求解方程(3)和(4)。

2 模型验证

2.1 研究区概况

拟建中的黄河羊曲水电站工程位于青海省海南州兴海与贵南交界处,距上游班多水电站约 75 km,距下游龙羊峡水电站大坝约 100 km。正常蓄水位 2 715 m,死水位 2 713 m,正常蓄水位下的库容为

14.724 亿 m^3 。工程规模为 I 等大(1)型工程,坝顶高程 2 721 m,最大坝高 150 m,电站装机容量 1 100 MW。本河段地形变化十分复杂,上有羊曲峡,下有野狐峡,两峡之间夹有吾托盆地。羊曲峡长约 3 km,两岸地形陡峻,河宽 100 m 左右;野狐峡横穿山梁,河谷狭窄,岸坡陡峭,接近直立,河宽 70~100 m;吾托盆地地形开阔,河流蜿蜒曲折,漫滩、心滩和 I、II 级阶地及两岸冲沟较发育,宽度为 300~500 m。从地形纵横剖面来看,河道平均比降 0.228%,其中比降最大为 2.3%,最小比降为 -3.0%。羊曲河段平面地形及计算横断面布置见图 1,计算河段进口断面为上坝线,出口断面至下坝线厂房以下 946.4 m,总长 8 497 m,包括了羊曲峡、野狐峡和吾托盆地。

2.2 模型验证

羊曲河段天然水面线计算共分 29 个横断面,在每个横断面输入了起点距、高程资料,一般约有 20 个控制点,个别断面多达 35 个控制点。用本研究建立的数学模型验证 2005-06-09 的实测同步水面线,流量取实测水面线过程中的平均流量,为 636.5 m^3/s ,接近于多年平均流量 625 m^3/s 。由于本河段存在着羊曲峡、野狐峡 2 个峡谷和 1 个吾托盆地,沿程河宽、比降、植被变化均比较剧烈,糙率系数 n 也不同。采用预测-校正求解方法,经多次反复试算,确定 2 个峡谷段糙率系数 $n = 0.04$,中间盆地糙率系数 $n = 0.03$,发现计算结果与实测资料吻合良好,糙率系数也符合工程规范和技术人员的经验。图 2 为羊曲河段计算的和实测的水面线。由图 2 可知,虽然该河段的地形条件极其复杂,其平面和纵剖面均变化剧烈,但采用引入松弛因子 β 的预测-校正法计算该河段天然河道水面线时,计算所得的水面线除个别断面最大误差达到 0.54 m 外,大多数断面的水位误差在 0.4 m 以内,可满足工程设计的精度要求。

3 计算成果

在保持原率定的糙率系数和计算方法不变的情况下,用验证后的模型计算羊曲水电站河段各级流量下的水面线沿程变化。其中小流量时流量间隔为 100 m^3/s ,大流量间隔为 500 m^3/s 。

羊曲水电站河段天然河道丰、中、枯三级洪水下的水面线计算结果见图 3。

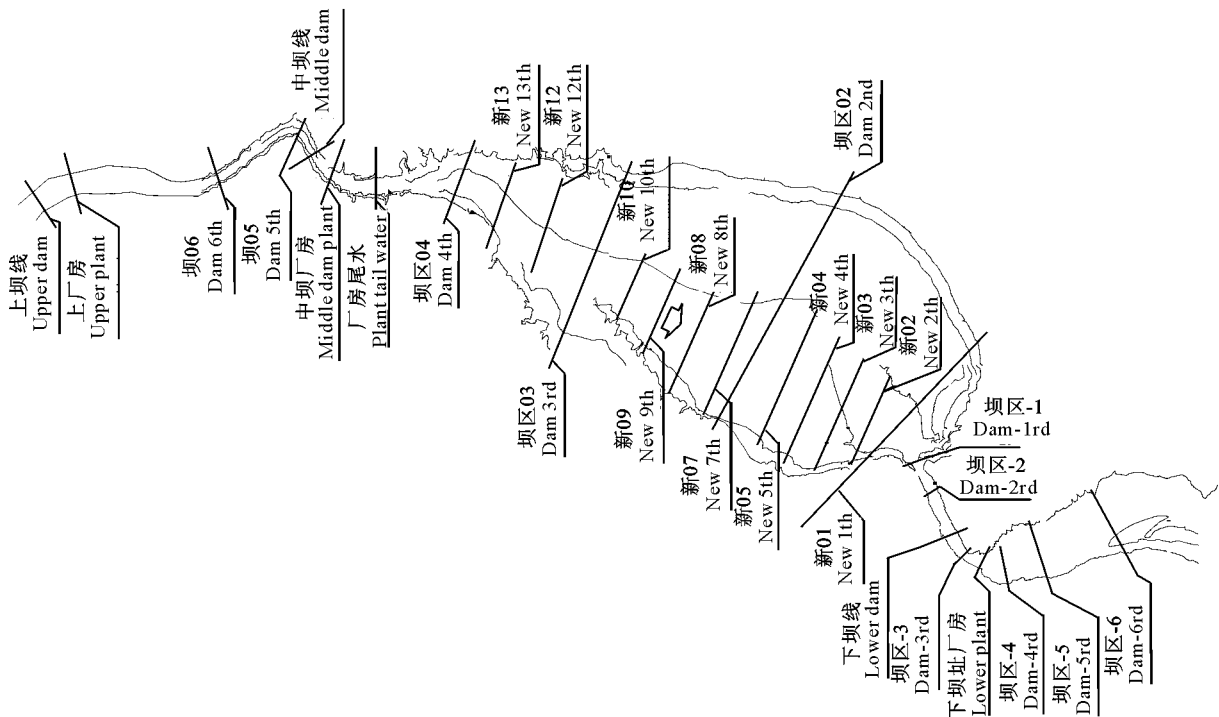


图 1 羊曲河段平面地形及计算横断面布置图

Fig. 1 Flat and Calculating cross-section layout of Yangqu hydropower station

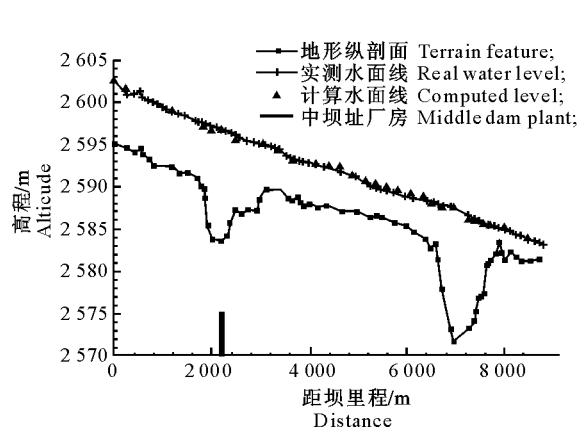


图 2 羊曲河段水面线计算值与实测值的比较

Fig. 2 Comparisons of water surface line between calculated and real results in Yangqu

由图 3 可见,当流量为分别为 500,1 500 m^3/s 时,羊曲峡、野狐峡阻水不明显;随着流量的加大,阻水作用愈趋明显,当流量达 3 500 m^3/s 时,野狐峡行洪不畅,致使吾托盆地变成了湖泊,水面接近水平。由于野狐峡下游河道开阔,使得野狐峡内水面比降变陡,多次出现了水跌现象。

4 小 结

(1)采用预测-校正求解方法,在一维河床冲淤变形计算模型基础上,增加急流的均匀流水深与临

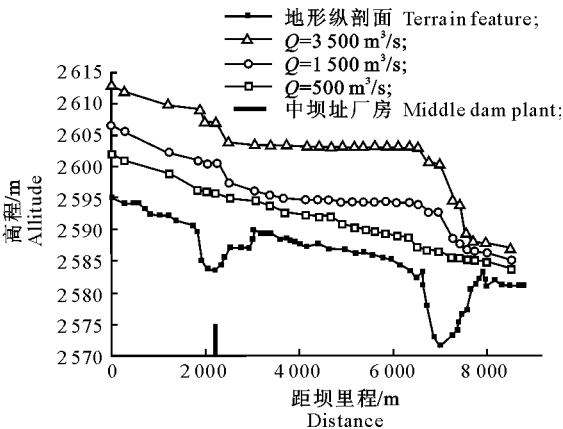


图 3 羊曲水电站河段天然河道丰、中、枯三级流量下的水面线

Fig. 3 Natural water surface of different discharges in Yangqu hydropower station

界水深判断公式,可以较好地解决天然河道复式断面正坡、倒坡交替出现,突扩、突缩频繁发生复杂地形条件下水面线计算的间断问题。

(2)虽然羊曲水电站河段的地形条件极其复杂,其平面和纵剖面均变化剧烈,但采用引入松弛因子的预测-校正求解方法,计算该河段实测天然河道水面线时,计算所得的水面线除个别断面最大误差达到 0.54 m 外,大多数断面水位误差在 0.4 m 以内,可满足工程设计的精度要求。

(3)将本研究建立的模型应用于拟建的羊曲水

电站天然河道水面线的计算之中,经水文实测资料验证后,计算得到了原天然河道各级流量下的水面线,可供其上、下游水库梯级开发的水能规划部门参考应用。

[参考文献]

[1] 吕宏兴,裴国霞,杨玲霞.水力学 [M]. 北京:中国农业出版社,2002.
Lü H X,Pei G X,Yang L X. Hydraulics [M]. Beijing: China Agriculture Press,2002. (in Chinese)

[2] 清华大学.水力学:修订本上册 [M]. 北京:高等教育出版社,1980.
Tsinghua University. Hydraulics; Revised edition [M]. Beijing: Higher Education Press,1980. (in Chinese)

[3] 魏文礼,沈永明,孙广才,等.二维溃坝洪水波演进的数值模拟 [J]. 水利学报,2003(9):43-47.
Wei W L,Shen Y M,Sun G C, et al. Numerical simulation of 2D dam-break flood wave [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003(9):43-47. (in Chinese)

[4] 王志力,耿艳芬,金生.山区性河流水面线计算改进 [J]. 大连理工大学学报,2005,43(5):433-437.
Wang Z L,Geng Y F,Jin S. Improvement of water level calculation of rivers in mountainous district [J]. Journal of Dalian University of Technology,2005,43(5):433-437. (in Chinese)

[5] 王翰,田发美,吕宏兴.山区渐扩性河流水面线计算改进 [J]. 人民黄河,2007,29(5):66-67.
Wang H,Tian F M,Lü H X. Improvement on the calculation of water surface in Gradual expansion of mountain rivers [J]. Yellow River,2007,29(5):66-67. (in Chinese)

[6] 黄佑生,顾令宇.一种新的水面线计算方法 [J]. 水利水电科技进展,2003,23(3):31-33.
Huang Y S,Gu L Y. A new method of calculating the water line [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2003,23(3):31-33. (in Chinese)

[7] 曹长冲,刘韩生,彭超平.一种计算缓流到急流控制水深的新方法 [J]. 灌溉排水学报,2008,27(4):113-115.
Cao C C,Liu H S,Peng C P. A new calculating method of the water depth of the control section from subcritical flow to supercritical flow [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2008,27(4):113-115. (in Chinese)

[8] 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):647-649.
Wan W Y,Jiang C B, Li Y Z. Application of varies increment iteration to simulation of water-surface profile in natural chan-

nels [J]. Journal of Haerbing Institute of Technology,2007,39(4):647-649. (in Chinese)

[9] 张建民,王玉蓉,许唯临,等.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 J M,Wang Y R,Xu W L, et al. New iteration method for calculating water level of gradually varied steady flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2005,36(4):501-504. (in Chinese)

[10] 巨江,林劲松.非恒定悬移质不平衡输沙的研究 [J]. 水利学报,1995(3):77-83.
Ju J,Lin J S. Study on non-equilibrium transport of suspended material in unsteady flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1995(3):77-83. (in Chinese)

[11] 林劲松,巨江,马耀光,等.千河冯家山水库淤积数学模型的研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2002,30(6):202-206.
Lin J S,Ju J,Ma Y G, et al. Study on mathematic Model of deposition in the Fengjiashan Reservoir on Qian River [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition,2002,30(6):202-206. (in Chinese)

[12] 林劲松,巨江,马耀光,等.冯家山水库供水调度及调洪计算分析 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2002,30(5):96-99.
Lin J S,Ju J,Ma Y G, et al. Allocation of water supply and analysis on routing flood of Fengjiashan Reservoir [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition,2002,30(5):96-99. (in Chinese)

[13] 林劲松,巨江,张根广.U型渡槽煤灰浆输送能力的研究 [J]. 泥沙研究,2003(3):66-72.
Lin J S,Ju J,Zhang G G. Study on fly ash transport in U-type channels [J]. Sediment Research,2003(3):66-72. (in Chinese)

[14] 林劲松,巨江,张根广,等.水电站长引水渠道水力瞬变过程计算研究 [J]. 长江科学院院报,2009,26(12):36-40.
Lin J S,Ju J,Zhang G G, et al. Study on computational hydraulics transient flow in long channel of water diversion of hydropower station [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2009,26(12):36-40. (in Chinese)

[15] 林劲松,巨江,诸亮,等.水电站水力过渡过程仿真计算的工程应用 [J]. 水力发电学报,2010,29(1):32-38.
Lin J S,Ju J,Zhu L, et al. Project application on computation simulation of water transient process in hydropower station [J]. Journal of hydroelectric Engineering,2010,29(1):32-38. (in Chinese)