

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241960

# 建库前后水下地形纵剖面反演解析方法及应用

龚兰强<sup>1</sup>, 邵培滢<sup>2</sup>, 田 耘<sup>3</sup>, 龚友龙<sup>3</sup>, 项华伟<sup>1</sup>, 吴 迪<sup>1</sup>

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 2. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214)

**摘要:** 水下地形是河流管理和水库运行调度的重要基础数据, 河床纵剖面则是重要的地形特征参数, 是决定河道或水库流速及水位沿程变化的关键要素之一。为此, 基于水流能量方程, 引用宽深比指标  $\sqrt{B}/H$  和断面形心相对深度指标  $H_c/H$  定量评价断面形态, 针对某电站建立过水断面面积和水力半径与最大水深的相关关系, 提出了在水面线控制下反演水库淤积前后水下地形深泓纵剖面的解析法。算例研究结果表明, 所提水下地形纵剖面反演解析法能快速精确反演河道及水库淤积后水下地形, 可为建库前后地形快速确定提供一种新途径。

**关键词:** 解析法; 水面线; 水库地形; 反问题

**中图分类号:** TV221.1; TV145

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2025)09-0065-04

## 1 引言

水库水下地形是决定水位和水流结构的关键因素之一。快速且精确地获取水库水下地形对研究水库淤积发展规律、确保电站安全运行及指导移民搬迁具有重要意义。实地测量确定水下地形技术难度较大且成本较高<sup>[1]</sup>, 而利用物理模型和数学模型<sup>[2]</sup>仅能基于当前地形资料预测未来水下地形演变, 因此近年来通过其他易测量的数据反演水下地形的思路逐渐兴起。目前, 水下地形的反演研究大多基于遥感图像反演, 如夏长水等<sup>[3]</sup>运用海底地形 SAR 影像仿真与反演模型对渤海湾沽海区进行了仿真和水深反演研究, 确立了 SAR 成像机理的正确性和实用性; 章敏等<sup>[4]</sup>提出了基于潮汐动态淹没过程和时序遥感影像的潮滩地形信息提取算法并将其应用在长江口地区, 为潮滩地形快速反演提供了可能; 孙涛等<sup>[5]</sup>通过建立二滩库区水深和相应的 ETM 遥感影像适宜波段间的模型关系, 为库区泥沙淤积研究提供了新思路。但各方法精度依赖于遥感数据的分辨率, 易受河流特性的影响, 对地形高程的估算误差较

大。相较地形数据, 水位数据往往更易测量。为此, 本文从水动力的角度出发, 基于水流能量方程, 提出了在已知水面线控制下反演水库天然地形和水库淤积后地形的解析方法, 并运用某水库的数据资料验证了该方法的精度和实用性。

## 2 水库水下纵剖面反演解析方法

天然河道槽底地形复杂, 以水位  $z$  来表示水面线。与天然河道水面线计算相同, 库区回水曲线也可运用水流能量方程计算。将计算河段划分成河段。在某小河段中设上、下游断面分别为断面 1、断面 2, 河段长度为  $\Delta s$ , 能量方程为<sup>[6]</sup>:

$$z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2} \quad (1)$$

其中

$$h_{w1-2} = h_f + h_j \quad (2)$$

$$h_f = \bar{J} \Delta s = \Delta s Q^2 / K^2 \quad (3)$$

$$h_j = \zeta \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (4)$$

式中,  $z_1, z_2$  分别为计算河段上、下游断面水位, m;  $\alpha_1, \alpha_2$  分别为计算河段上、下游断面动能修正系数;  $v_1, v_2$  分别为上、下游断面平均流速, m/s;

**收稿日期:** 2024-10-19, **修回日期:** 2024-11-18

**基金项目:** HNKJ22-H108 高海拔长负温期高碾压混凝土坝重大技术研究

**作者简介:** 龚兰强(1978-), 男, 硕士, 研究方向为水文规划设计、多能互补规划与调度, E-mail: 149701401@qq.com

**通讯作者:** 龚友龙(1987-), 男, 高级工程师, 研究方向为水电规划、梯级水库联合调度、水工运行维护管理等,

E-mail: gongyoulong@lcjgs.chng.com.cn

$g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $h_{w1-2}$  为水头损失;  $h_f, h_j$  分别为沿程水头损失、局部水头损失<sup>[6]</sup>, 天然河道中常出现局部的急变河段, 但其中一般的微弯段、渐缩段等的局部水头损失不大, 且常通过糙率的取值而被计入沿程损失中;  $\bar{J}$  为计算河段平均水力坡度, 可利用谢才公式计算;  $Q$  为流量,  $m^3/s$ ;  $\bar{K}$  为河段上下游断面流量模数平均值, 可近似取  $\frac{1}{\bar{K}^2} = \frac{1}{K_1^2} + \frac{1}{K_2^2}$ ,  $K_1, K_2$  分别为上、下游断面流量

模数, 近似按均匀流公式计算 ( $K = AC\sqrt{R}$ ),  $A$  为断面过水面积,  $C$  为谢才系数,  $R$  为水力半径;  $\zeta$  为局部水头损失系数, 在收缩河段一般取为 0, 在渐扩段一般取  $-0.33 \sim -0.55$ , 在急扩段取为  $-0.5 \sim -1.0$ 。

考虑支流汇入情况, 上、下游断面平均流量分别为  $Q_1, Q_2$ , 因此式(1)可变形为:

$$z_1 + (\alpha_1 + \zeta) \frac{v_1^2}{2g} - \frac{\Delta s}{2} \frac{Q_1^2}{K_1^2} = z_2 + (\alpha_2 + \zeta) \frac{v_2^2}{2g} + \frac{\Delta s}{2} \frac{Q_2^2}{K_2^2} \quad (5)$$

$$z_1 + (\alpha_1 + \zeta) \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} - \frac{\Delta s}{2} \frac{Q_1^2}{A_1^2 C_1^2 R_1} = z_2 + (\alpha_2 + \zeta) \frac{Q_2^2}{2gA_2^2} + \frac{\Delta s}{2} \frac{Q_2^2}{A_2^2 C_2^2 R_2} \quad (6)$$

当已有实测的断面水位、流量资料时, 可用式(6)估算河段的断面过水面积、水力半径等。由于断面过水面积、水力半径等均与水深有关, 建立断面过水面积与最大水深  $h_M$  的关系式  $A(h_M)$  和水力半径与最大水深  $h_M$  的关系式  $R(h_M)$ 。将建立的关系式  $A(h_M), R(h_M)$  代入式(6), 忽略局部水头损失, 可得:

$$z_1 + \alpha_1 \frac{Q_1^2}{2gA(h_{M1})^2} - \frac{\Delta s}{2} \frac{n^2 Q_1^2}{A(h_{M1})^2 R(h_{M1})^{4/3}} = z_2 + \alpha_2 \frac{Q_2^2}{2gA(h_{M2})^2} + \frac{\Delta s}{2} \frac{n^2 Q_2^2}{A(h_{M2})^2 R(h_{M2})^{4/3}} \quad (7)$$

令:

$$f(h_{M2}) = z_2 - z_1 + \alpha_2 \frac{Q_2^2}{2gA(h_{M2})^2} + \frac{\Delta s}{2} \frac{n^2 Q_2^2}{A(h_{M2})^2 R(h_{M2})^{4/3}} - \alpha_1 \frac{Q_1^2}{2gA(h_{M1})^2} + \frac{\Delta s}{2} \frac{n^2 Q_1^2}{A(h_{M1})^2 R(h_{M1})^{4/3}} \quad (8)$$

已知上游断面流量、水位、河底高程及下游断面流量、水位, 即可通过式(8)采用二分法求得  $f(h_{M2})=0$  的解, 即为下游断面的最大水深  $h_{M2}$ 。

在断面资料缺少的地形反演实际应用中, 运用断面最大水深  $h_{M2}$ 、断面深泓高程  $z_{b2}$  与水位  $z_2$  之间的关系式即可反推得下游断面深泓高程  $z_{b2}$ :

$$h_M = z - z_b \quad (9)$$

上游小河段中的下游断面深泓高程  $z_{b2}$  即为相邻下游小河段中的上游断面河底高程  $z_{b1}$ , 由水下地形纵剖面反演解析方法即可依次求得每个小河段的深泓高程, 从而确定整个河段的河床纵剖面地形。

### 3 建库前后水下地形纵剖面反演解析方法应用

#### 3.1 研究区域及断面特性

为确定解析法在水库地形反演中的适用性, 利用规划中的某水电站作为研究区域进行反演计算。该电站是我国西南某河流水电规划一库七级开发方案中的第四级。水库库长 71 km, 坝址处多年平均流量为  $621 m^3/s$ , 径流年际变化不大但年内汛期枯期分明, 河流含沙量较高, 水库库尾分布有 3 鱼类产卵场, 产卵月份为 4~7 月, 对河床特性、水深、流量及流速均有要求。但水库两岸多为峡谷山地, 水库淤积后水下地形难以测量。为方便反演计算, 在库区沿程布置 59 个断面, 库区河势及断面布置见图 1。

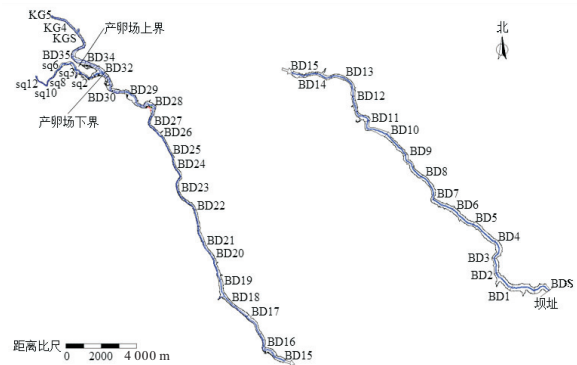


图 1 研究区域图

Fig. 1 Study area map

天然河道地形复杂多变, 断面过水面积、河宽随水深变化关系难以确定, 为方便地形反演研究, 需对河道断面形态进行概化。研究区域位于山区河流, 通过对实测地形资料分析, 坝址断面至 BD27 号断面为峡谷河段, 断面形态呈现出“U”或“V”型; BD28 号断面到 BD35 号断面之间为相对开阔河段, 两段河道断面形态相似, 岸坡比降及河宽区别不大。引用宽深比指标  $\sqrt{B}/H$  和断面形心相对深度指标  $H_c/H$  ( $H_c$  为形心深度,  $H$  为断面平均水深) 定量评价断面形态, 其中峡谷河段断

面的宽深比指标为 0.664~0.866,断面形心相对深度指标为 0.587~0.603;相对开阔河段的宽深比指标为 0.934~1.279,断面形心相对深度指标为 0.544~0.563,峡谷河段的宽深比更小但断面形心相对深度指标更大,但两段河道内两种指标变化不大,即断面形态类似。为方便计算,在峡谷河段选择 BD1 号断面为代表断面,其断面宽深比指标为 0.794,形心相对深度指标为 0.597;在相对开阔河段选择 BD32 号断面为代表断面,其断

面宽深比指标和形心相对深度指标分别为 1.197、0.554。分别建立断面过水面积、水力半径和最大水深之间的相关关系,见表 1。将建立好的过水断面面积与最大水深的关系式与水力半径与最大水深的关系式代入式(8),采用二分法求解,即可得到河床深泓高程。峡谷段和相对开阔河段断面过水面积、水力半径之间的相关程度良好,因此可近似认为此关系足以代表研究库区河段整体情况,可应用于库区地形的反演计算中。

表 1 库区河段概况

Tab. 1 Overview of reservoir reach

河段类型	包含断面	$\sqrt{B}/H$	$H_c/H$	过水断面面积与最大水深关系	水力半径与最大水深的关系
峡谷段	BDS-BD27	0.794	0.597	$A = 1.213 6h_M^2 + 50.37h_M - 33.045$	$R = 0.410 4h_M + 5.204 8$
相对开阔段	BD28-BD35	1.197	0.554	$A = 2.889 2h_M^2 + 174.56h_M - 214.06$	$R = 0.645 9h_M + 1.211 9$

### 3.2 计算参数确定

一维水流数学模型中河道糙率反映了断面形态的沿程变化,在计算时对河道断面进行概化后需率定河道糙率。选择多年平均流量(坝址流量 621 m<sup>3</sup>/s)下的水面线和天然深泓率定糙率。图 2 为多年平均流量下反算地形的糙率率定结果。由图 2 可知,峡谷河段糙率的取值范围为 0.055~0.080,相对开阔河段河道糙率取值范围为 0.060~0.085。

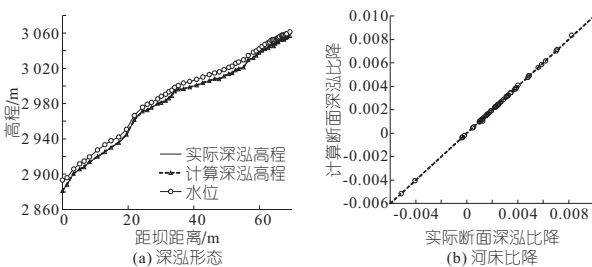


图 2 地形反演糙率率定结果

Fig. 2 Calibration results of roughness in topographic inversion

### 3.3 计算工况

分别以天然水面线和建库后水面线为观测值反演天然地形和建库后淤积地形,以验证解析法在不同条件下计算结果的准确性。工况 1 采用 6~9 月 20 年一遇洪水(对应坝址流量 5 100 m<sup>3</sup>/s)下天然水面线反演天然河道地形,计算结果与建库前 2016 年天然实测河道地形验证;由于水库尚未建成,工况 2 选择一维水沙数学模型计算得到 6~9 月 20 年一遇洪水(对应坝址流量 5 100 m<sup>3</sup>/s)下回水水面线反演水库淤积后地形,计算结果与采用数值模拟计算得到的建库 20 年后的淤积地形验证。

### 3.4 建库前地形反演

选择 6~9 月  $P=5\%$  流量(坝址流量 5 100 m<sup>3</sup>/s)下的水面线作为观测值,糙率取值依据率

定结果确定,反演河床底坡(工况 1)。图 3(a)为 6~9 月 20 年一遇洪水水面线下地形的反演计算结果。由图 3(a)可看出,实际深泓高程与计算反演深泓高程基本重合,解析法在工况 1 下应用良好。

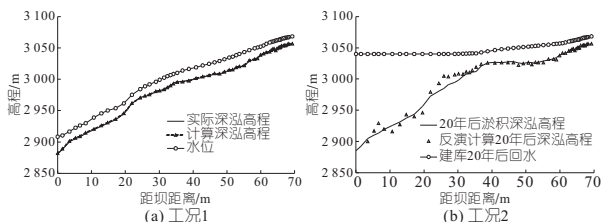


图 3  $P=5\%$  流量下天然地形(工况 1)、淤积 20 年后地形(工况 2)反演结果

Fig. 3 Inversion results for natural topography (condition 1) and post-20-year sedimentation topography (condition 2) under  $P=5\%$  flow

### 3.5 建库后地形反演

选择水库淤积 20 年后的汛期 20 年一遇洪水水面线进行水库淤积后地形反演计算(工况 2),其中考虑到水库建成后库区河道沿程细化,因此常年回水区河段,即坝址至坝址上游 59.92 km 河段的糙率取为天然河道糙率的 0.9 倍<sup>[7]</sup>。图 3(b)为解析法反演汛期 20 年一遇洪水流量下建库 20 年后的淤积地形。由图 3(b)可看出,解析法在坝址上游距坝距离 33.33 km 以上河段能够较好地模拟深泓,反演得到深泓与文献[8]中数值模拟计算的淤积后深泓基本重合,且能够准确模拟出三角洲顶点的位置和高程,高程误差为 -0.38 m。但在坝址至坝址上游 33.33 km 的河段,反演得到的深泓高程与实际深泓误差较大。

## 4 解析法反演结果评估

为准确有效评估模型的预测性能,选择均方根误差( $R_{RMSE}$ )、平均相对误差( $M_{MRE}$ )及平均绝

对百分误差( $M_{MAPE}$ )和最大误差( $M_{ME}$ )作为误差分析指标,量化模型的预测误差。

分别计算不同工况下各指标定量评价反演结果的准确性,结果见表 2。由表 2 可看出,在率定糙率时,解析法计算深泓高程与实际深泓高程的

表 2 反演工况评估结果

Tab. 2 Evaluation results of inversion conditions

工 况	类 型	反演地形	坝址 流量	$R_{RMSE}$ /m	$M_{MRE}$	$M_{MAPE}$	$M_{ME}$ /m
率定糙率	天然地形		621	0.195	0.033 8	0.000 064 5	0.200
1 反演计算	天然地形		5 100	0.926	0.056 1	0.000 303 0	1.146
2 反演计算	淤后地形		5 100	1.802	0.060 4		2.530

注:坝址流量单位为  $m^3/s$ ;工况 2 中各指标仅表征三角洲顶点至库尾河段的反演结果。

最大误差为 0.200 m,相对误差为 0.033 8,均方根误差为 0.195 m。使用相同糙率在工况 1 的水面线下反演得到的计算深泓高程与实际深泓高程的均方根误差为 0.926 m,相对误差为 0.056 1,最大误差为 1.146 m,误差略大,这是因为在计算时未考虑糙率随流量的变化。实际上,一维水沙数学模型在断面布设上的限制和天然河道中沿岸地形多变等问题,模型的糙率主要是河段断面间的平均糙率,不仅反映了河床边界的粗糙程度,一定程度上也反映了河段的特性,如河段的弯曲程度、断面的收缩扩张、断面类型的变化等,相较于二、三维数学模型,一维数学模型的糙率是除过水断面因素外其他各种水力因素的综合指标。因此,准确确定糙率在一维河道地形的反演中至关重要。对建库后淤积地形进行反演(工况 2)发现,在三角洲顶点至库尾河段反演得到的河道深泓高程与数值模拟计算深泓高程吻合良好,最大误差为 2.530 m,均方根误差为 1.802 m,相对误差为 0.060 4。而在坝址至三角洲顶点河段上则

误差较大,这是由于在此河段上水库回水主要受坝前壅水影响,水面比降基本为 0,河床地形基本不影响回水。当然,库区河道淤积前后断面形态“V”、“U”型在一定程度上会发生转变,对深泓高程有一定影响,但在一维模型计算中较难反映。

### 5 结 论

本文提出了在水面线控制下反演库区河道淤积前后地形纵剖面的解析法,并将其应用于天然地形和淤积后地形反演中进行验证。结果表明,本文所提解析法可快速准确反演建库前后河道地形,反演计算深泓高程与天然实际深泓高程、淤积后深泓高程基本重合。

#### 参 考 文 献:

- [1] 韩啸,龚德林,张智敏,等. 基于多源数据融合的库区水下地形测量方法探究[J]. 水利水电快报, 2024, 45(11):32-39.
- [2] WU B S, WANG G Q, XIA J Q. Case study: Delayed sedimentation response to inflow and operations at Sanmenxia Dam[J]. Journal of hydraulic engineering, 2007, 133(5): 482-494.
- [3] 夏长水,袁业立. 塘沽海区海底地形的 SAR 影像仿真与反演研究[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(4): 437-445.
- [4] 章敏,吴文挺,汪小钦,等. 基于潮汐动态淹没过程的长江口潮滩地形信息反演研究[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(3): 583-596.
- [5] 孙涛,庞治国,潘世兵,等. 二滩库区水深遥感反演研究[C]//中国国土经济学会. 全国国土资源与环境遥感应用技术研讨会论文集. 中国水利水电科学研究院遥感中心, 2009.
- [6] 赵昕,张晓元,赵明登,等. 水力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [7] 韩其为. 水库淤积[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [8] 王凯旋,李大成,吴迪,等. 基于库尾产卵场保护的水库特征水位优化研究[J]. 泥沙研究, 2022, 47(5): 23-29.

## Analytical Inversion Research and Application of Underwater Longitudinal Profiles in Reservoirs Before and After Reservoir Construction

GONG Lan-qiang<sup>1</sup>, SHAO Yu-ying<sup>2</sup>, TIAN Yun<sup>3</sup>, GONG You-long<sup>3</sup>, XIANG Hua-wei<sup>1</sup>, WU Di<sup>1</sup>  
(1. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;  
3. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China)

**Abstract:** Underwater topography serves as essential foundational data for river management and reservoir scheduling. The riverbed longitudinal profile is a significant topographical characteristic and is one of the key elements determining the flow velocity and water level variation along the river or reservoir. Based on the energy equation of flow, this paper employs the width-to-depth ratio  $\sqrt{B}/H$  and the relative depth of the section centroid  $H_c/H$  as indicators to quantitatively assess the cross-sectional morphology. The correlation relationship between the cross-sectional area, hydraulic radius, and the maximum water depth for a certain power station is established. An analytical method for inverting the longitudinal profile of deep pools of underwater topography before and after reservoir siltation under the control of water surface lines was proposed. Case study results indicate that the proposed method can quickly and accurately invert underwater topography after the siltation of rivers and reservoirs, providing a new approach for rapid determination of topography before and after reservoir construction.

**Key words:** analytical method; water surface profile; reservoir terrain; inverse problem