

青铜峡水库泥沙冲淤计算数学模型

赵克玉¹, 周孝德¹, 贾恩红²

(1. 西安理工大学, 西安 710048; 2. 宁夏电力总公司, 银川)

摘 要: 青铜峡水库由于建库初期蓄水运行, 库容快速淤损, 后虽然改变了运用方式, 库区仍缓慢淤积, 现在只剩下 5% 的库容。为了研究其冲淤规律, 优化运行方式, 建立了青铜峡水库泥沙冲淤计算数学模型, 并对模型进行了验证, 得到令人满意的验证结果。

关键词: 水库淤积; 水库排沙; 数学模型; 青铜峡水库

中图分类号: TV 697. 22; TB115

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2003)02-0145-03

Numerical Model of Sediment Scouring and Deposition
in Qingtongxia Reservoir

ZHAO Ke-yu¹, ZHOU Xiao-de¹, JIA En-hong²

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Ningxia Electric Corporation, Yinchuan, China)

Abstract: In the primary period of Qingtongxia reservoir operated at high water level, it was deposited quickly. Though the operation way was changed after that, the reservoir was depositing slowly until now only 5% of capacity is left. The numerical model of sediment deposition in Qingtongxia reservoir was set up to study the deposition rule and optimize the operation way. The model was also verified and got satisfactory results.

Key words: reservoir deposition; reservoir sediment flushing; numerical model; Qingtongxia reservoir

水库泥沙数学模型在我国已有近半个世纪的历史, 这期间随着泥沙运动理论的发展和计算手段的提高, 越来越多的学者从不同的角度和对象对水库泥沙数学模型进行研究、发展和提高, 使其逐渐成为水库淤积和排沙研究中不可缺少的工具。即使如此, 由于泥沙运动规律的复杂性和泥沙运动理论的不完善, 数学模型仍处在发展阶段。青铜峡水库自 1967 年投入运用以来, 泥沙严重淤积, 目前仅剩 0.3 亿 m³ 左右的库容。由于库容的淤损, 防洪负担逐渐加重, 同时严重影响了发电等效益的正常发挥, 建立一套准确的库区冲淤计算模型越来越显得重要。在模型的建立过程中, 吸收了其它水库泥沙模型的成功经验, 结合了作者多年的泥沙数学模型研究成果, 使模型具有很好的适应性和精确度。

1 水库概况

青铜峡水利枢纽位于黄河干流上游的下段宁夏境内青铜峡峡谷出口处, 坝址以上河段长 2 605 km, 下距黄河河口 2 779 km。1967 年 4 月建成蓄水, 同时第一台机组发电。1972 年以前水库采用蓄水运用, 以后改为汛期降低水位的运用方式。水库担负着灌溉、发电、排沙、防洪、防凌的综合任务。枢纽工程大坝全长 687.3 m, 最大坝高 42.7 m, 坝顶高程

1 160.2 m。青铜峡水库控制流域面积 275 010 km², 原始总库容 7.36 亿 m³, 正常蓄水位 1 156.0 m, 相应库容 6.06 亿 m³, 水库回水长度 46 km, 库区天然河道比降 0.707‰, 水库平面形状似葫芦型, 坝上游 8.2 km 以内为峡谷段, 两岸悬崖陡壁, 水面狭窄, 宽度为 300~500 m, 向上游河道突然展宽。

青铜峡水库多年平均入库水量 312.5 亿 m³, 多年平均流量 1 020 m³/s, 天然洪水多发生在汛期(7~10 月), 洪峰不高, 涨落也比较平缓, 汛期径流量占全年径流量的 63.8%, 汛期平均流量 1 890 m³/s, 多年平均洪峰流量 3 790 m³/s, 多年平均输沙量 1.07 亿 t, 最大年输沙量为 5.29 亿 t, 多年平均含沙量 9.83 kg/m³, 最大含沙量为 431.35 kg/m³。

入库泥沙以悬移质为主, 刘家峡水库建库前悬移质泥沙中值粒径为 0.03 mm, 刘家峡水库建库后悬移质泥沙中值粒径在 0.015~0.018 mm 之间变化。推移质输沙量占悬移质输沙量的 0.5%。

水库的淤积过程分为三个阶段: 1967~1971 年, 由于初期缺乏运行经验, 对泥沙淤积的认识不够, 加之追求发电效益而抬升汛期运行水位, 仅 5 年时间, 水库大部分库容已被淤损, 库容由原始的 6.06 亿 m³ 减至 0.79 亿 m³, 损失 87%。1972~1976 年, 采用汛期降低水位的蓄清排浑的运行方式。

¹ 收稿日期: 2002-12-06

作者简介: 赵克玉(1963-), 男, 山东苍山人, 高级工程师, 西安理工大学博士生, 长期从事工程泥沙和泥沙数学模型的研究。

扭转了水库淤积的严重局面,降低了滩库容的淤积速度,基本达到年内冲淤平衡。1977 年以后,采用蓄水运行并结合沙峰期排沙及汛末降低水位集中冲沙的运行方式,但总的趋势是库容进一步损失,由于泥沙淤积,目前仅剩 0.3 亿 m³ 左右库容。

本文针对青铜峡水库急需解决减少淤积、扩大库容这一生产中实际问题,总结前人在这方面的工 作,通过水库实测的水沙资料研究了水库冲淤规律,在水库较优的运行方式下,建立了水库泥沙冲淤计算数学模型,并对模型进行了验证,得到令人满意的验证结果。

2 数学模型

水库泥沙数学模型中,水流计算可以按分段恒定流处理,即:

$$\frac{Q}{x} = 0 \tag{1}$$

但考虑到进出库流量有时相差较大,将沿程各断面流量作线性变化计算,近似模拟水流的不恒定问题。

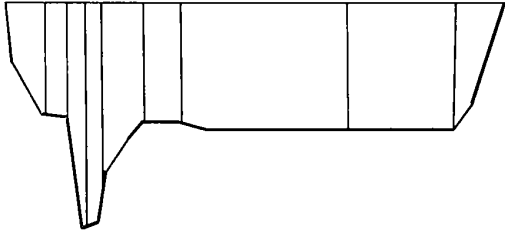


图 1 子断面划分示意图

一维恒定渐变流的能量方程为:

$$\frac{Z}{x} + \frac{\alpha V^2}{2g} + S_f = 0 \tag{2}$$

S_f 为阻力比降,根据满宁公式可以表示为:

$$S_f = \frac{Q^2 n^2 B^{4/3}}{A^{10/3}} \tag{3}$$

α 为流速系数,可以由下式表示:

$$\alpha = \frac{1}{Q V^2} \int q u^2 dy \tag{4}$$

式中:q——断面横向 y 处的单宽流量;u——断面横向 y 处的垂线平均流速;Q——断面流量;B——断面水面宽度;V——断面平均流速。为了将上式离散化,把整个断面沿横向划分成若干个子断面,如图 1 所示,将积分计算离散为求和计算,得到 α 的近似公式(3)。

$$\alpha = \frac{1}{Q V^2} \sum_{k=1}^{km} Q_k u_k^2 \tag{5}$$

式中:Q_k、u_k 分别为第 k 个子断面的流量和水流平均流速。由此,式(1)化为:

$$\frac{Z}{x} + \frac{1}{2g} \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^{km} Q_k u_k^2 + S_f = 0 \tag{6}$$

Q_k 可以通过下式计算:

$$Q_k = \frac{A_{j,k} h_{j,k}^{2/3}}{\sum_{k=1}^{km} (A_{j,k} h_{j,k}^{2/3})} \tag{7}$$

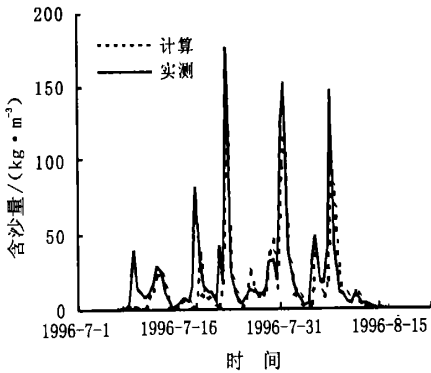


图 2 出库含沙量验证 1995 年沙峰过程

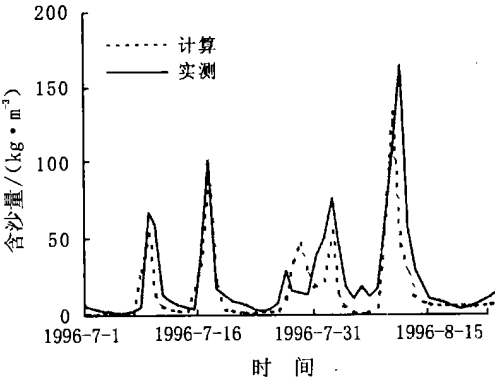


图 3 出库含沙量验证 1996 年沙峰过程

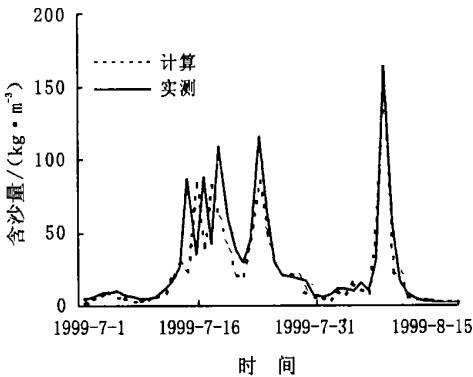


图 4 出库含沙量验证 1997 年沙峰过程
挟沙力公式

$$S_{*k} = c \left(\frac{y_m}{y_s - y_m} \frac{B_k Q_k^3}{g A_k^4 \omega} \right)^m \tag{8}$$

$$S_* = \frac{\sum_{k=1}^{km-1} Q_k S_{*k}}{Q} \tag{9}$$

含沙量方程

$$\frac{1}{x} (QS) + \alpha B \omega (S - S_*) = 0 \tag{10}$$

河床冲淤变形方程

$$\rho \frac{A_b}{t} + \frac{1}{x} (QS) = 0 \tag{11}$$

基本方程的数值解采用差分法,由式(1)和式(6)计算水面线及各断面水力要素,边界条件在下游,即坝前水位,水面线从坝前向上游逐断面试算,进而计算断面各水力要素。由式(8)一式(10)计算各断面挟沙力和含沙量,泥沙计算的边

界条件在上游, 上游入库断面含沙量为已知, 从上游入库断面向坝前逐断面计算挟沙力和含沙量。由式(11) 计算各河段冲淤量, 在逐断面分配到各个子断面上, 进而得到新的断面地形, 为下一时段的计算做准备。重复以上过程, 计算下一个时段, 如此继续下去, 直至计算完所有时段。

3 模型的验证

青铜峡水库具有完整的水沙观测资料, 入库水沙控制干流有下河沿水文站, 支流清水河设有泉眼山水文站、红柳沟设有鸣沙洲水文站, 出库控制有青铜峡水文站。有完整的库区泥沙淤积测量资料, 这些丰富的水沙观测资料为青铜峡水库泥沙数学模型的验证提供了便利条件。为了模型更好地适应今后的水沙条件, 以便预测计算比较准确, 验证计算尽量选择近期资料, 结合水库的库区泥沙淤积观测资料, 选定验证年限为 1995~2000 年。

验证计算初始条件采用 1995 年库区实测断面资料, 进行适当的概化。上游边界条件采用 1995~2000 年下河沿水文站实测的日平均流量和含沙量。下游边界条件采用青铜峡水库实测坝前日平均水位。以一天为一个计算时段。输出计算的出库含沙量过程和计算结束时的冲淤断面地形。分别与同期实测出库含沙量过程和 2000 年库区实测断面地形资料进行对比。

验证计算成果表明, 计算主要来沙期出库含沙量与同期实测出库含沙量符合较好, 见图 2~5, 最大沙峰时计算值略低于实测值, 计算地形的冲淤变化与实测值基本相符, 断面冲淤地形的比较见图 6~7。

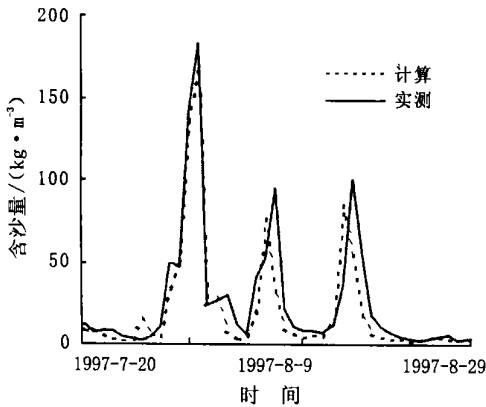


图 5 出库含沙量验证 1999 年沙峰过程

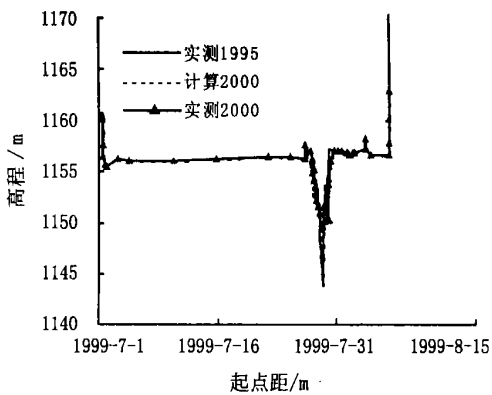


图 6 泥沙冲淤验证青库淤 13 断面

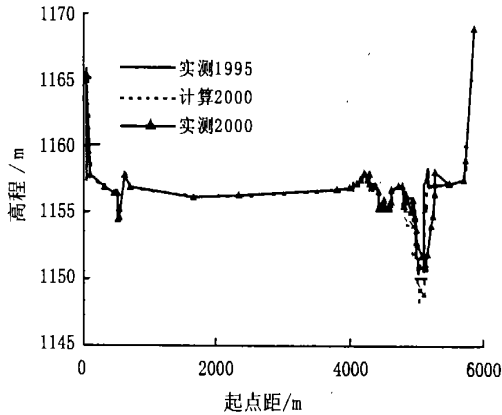


图 7 泥沙冲淤验证青库淤 18 断面

从验证成果来看, 计算精度对于工程实际问题的研究是令人满意的, 说明本套水流泥沙数学模型可以用于青铜峡水库的泥沙冲淤预测计算。

4 结 语

青铜峡水库自 1967 年投入运用以来, 由于初期缺乏运行经验, 对泥沙淤积的认识不够, 加之追求发电效益而抬升汛期运行水位, 水库库容快速淤损, 后期虽然改变了运用方式, 但总的趋势是库容进一步损失, 由于泥沙淤积, 目前仅剩 0.3 亿 m^3 左右库容。本文建立的数学模型将直接服务于青铜峡水库水沙调度、效益的持续有效发挥的规划、决策和实施, 并已成功进行了青铜峡水库不同运用方式的库区淤积过程计算、不同程度降低水位冲刷计算和空库拉沙计算。

参考文献:

[1] 谢鉴衡. 河流模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
[2] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
[3] 武汉水利电力学院. 河流泥沙工程学[M]. 北京: 水利出版社, 1981.
[4] 张启卫. 黄河下游泥沙数学模型及其应用[J]. 人民黄河, 1994(1): 4- 8.
[5] 韩其为, 何明民. 水库淤积与河道演变的一维数学模型[J]. 泥沙研究, 1987(3): 14- 29.
[6] 曲少军, 吴保生, 等. 黄河水库一维泥沙数学模型的初步研究[J]. 人民黄河, 1994(1): 1- 4.
[7] 陈孝田, 张启卫. 泥沙运动方程和数学模型中有关问题的讨论[J]. 泥沙研究, 1998(2): 81- 88.
[8] 张俊华, 张红武, 等. 多沙水库准二维泥沙数学模型[J]. 水动力学研究与进展, 1999(1): 45- 50.