

崖羊山水库一维泥沙数学模型参数率定与验证

李 振, 顾圣平, 高 力, 肖 聪, 崔 巍

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 根据水动力泥沙模型基本方程, 在一定的假定条件下, 对一维非均匀流不饱饱和输沙模型进行简化, 并分析了利用水库实测资料对模型参数进行率定与验证的方法。最后, 利用崖羊山水库资料作为实例, 通过与实测资料对比验证所率定参数的合理性, 为今后进行崖羊山水库泥沙淤积计算提供依据。

关键词: 泥沙模型; 参数率定; 参数验证; 崖羊山水库

中图分类号: TV 697 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0209-04

Parameter Calibration and Verification of One-dimensional Sediment Mathematical Model in Yayangshan Reservoir

LI Zhen, GU Shengping, GAO Li, XIAO Cong, CUI Wei

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the basic equations of the hydrodynamic and sediment mathematical model and under certain assumptions, the one dimensional model of non uniform flow and non equilibrium sediment transport model was simplified, and the model parameters were calibrated and verified using the observed data of the reservoir. In this paper, the model was applied to Yayangshan Reservoir and verified the parameter feasibility according to the measured data in the reservoir, which can provide reference for the sedimentation calculation of the Yayangshan Reservoir in future.

Key words: sediment model; parameter calibration; parameter verification; Yayangshan Reservoir

水库的修建打破河流本身已有的冲淤平衡, 必定引起库区泥沙的淤积^[1]。水库的淤积降低了水库的防洪能力, 扩大了水库的淹没面积, 降低了水库的经济效益^[2]。多年来, 为减少泥沙淤积对水库运行的影响, 充分发挥水库综合效益, 泥沙工作者在水库淤积计算方面开展了大量工作。我国在水库淤积计算方面的研究成果可分为三种类型: (1) 只估算水库淤积量及其变化过程; (2) 经过对水库淤积规律的研究, 得出各种参数的直接计算方法; (3) 构造河流动力学数学模型^[3-5]。随着计算机技术的发展, 泥沙数学模型得到了较快的发展, 对模型中参数求解的要求也越来越准确。实际工作中, 常因水库资料不完整无法直接应用泥沙数学模型进行计算, 故本文在前人研究的基础上, 对一维非均匀流不饱饱和输沙模型进行简化, 把简化后的水库一维泥沙数学模型应用于崖羊山水库, 并利用水库实测资料对模型参数进行率定和验证, 最后结合崖羊山水库资料进行实例验证。

1 水库一维泥沙数学模型

1.1 基本方程

一维非均匀流不饱饱和输沙模型是以水流、泥沙运动力学和河床演变基本规律为基础建立的, 而描述水流、泥沙运动特性和河床演变基本规律的基本方程包括水流连续方程、水流动量方程、泥沙连续方程、不平衡输沙方程和挟沙力方程^[6,7], 具体形式如下。

水流连续方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \tag{1}$$

水流动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{Q|Q|}{K^2} = 0 \tag{2}$$

泥沙连续方程:

$$\frac{\partial(A S)}{\partial t} + \frac{\partial(Q S)}{\partial x} + v_s \frac{\partial A_s}{\partial t} = 0 \tag{3}$$

收稿日期: 2014-01-21 修回日期: 2014-02-17 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.04.001.html>

作者简介: 李 振(1988-), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事水利规划与水利经济方面研究。E-mail: 815459803@qq.com。

通讯作者: 顾圣平(1957-), 男, 江苏泰州人, 教授, 主要从事水资源系统规划方向研究。E-mail: spgu@hhu.edu.cn。

不平衡输沙方程:

$$\frac{\partial(A S)}{\partial t} + \frac{\partial(Q S)}{\partial x} + \alpha B \omega (S - S_*) = 0 \quad (4)$$

挟沙力方程:

$$S_* = f(Q, A, B, \omega, S) \quad (5)$$

式中: Q 为断面流量(m^3/s); A 为断面过水面积(m^2); B 为断面宽度(m); Z 为水位(m); K 为流量模数(m^3/s); S 为断面平均含沙量(kg/m^3); S_* 为断面平均挟沙力(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2); α 为泥沙恢复饱和系数; ω 为泥沙颗粒沉速(m/s); A_d 为断面冲淤面积(m^2); γ_s' 为泥沙干容重(kg/m^3)。

1.2 模型简化

天然河流的水沙边界条件十分复杂,为了能够计算方便并且实现计算机上编程,可根据实际情况设定一些假定条件,将基本方程式进一步简化:

(1) 假定可以将非恒定流作为恒定流处理,即取 $\partial Q/\partial t = 0$, $\partial U/\partial t = 0$, 将本来为非恒定流的入库流量过程线,概化为若干个不同流量级组成的梯级过程线。对于每一个梯级来说,流量为常数,水流为恒定流^[8]。

(2) 不考虑淤积或冲刷过程中,断面平均流速发生变化所引起的时变惯性项 $(1/g)\partial V\partial t$; 不考虑含沙量沿程改变对水流动力条件产生的影响; 不考虑淤积或冲刷对动量改变的影响^[8]。

(3) 假定水库在冲淤过程中,水位不发生变化。为了满足这一点,只需要在计算中根据每个计算时段内的冲淤量的多少,尽可能缩短计算时段,使该时段内冲淤量不太大即可。另外,假定不考虑水体中含沙量随时间的变化,认为两断面间进、出沙量之差,仅转化为河床上淤积或冲刷的沙量^[8]。

(4) 假定河底向上紊动扩散的泥沙数量只与当时的水力条件有关,而不依赖于底部挟沙力; 假定单宽流量沿程不变; 不考虑沉降速度随空间变化; 假定计算单个库段内,挟沙力沿程成直线变化^[8]。

根据假定条件对基本方程进行有限差分及简化,得到水库一维泥沙数学模型如下:

$$J = \frac{Q^2 n^2}{B^2 h^{10/3}} + \frac{1}{2g \Delta x} \left[\frac{Q^2}{B_2^2 h_2^2} - \frac{Q^2}{B_1^2 h_1^2} \right] \quad (6)$$

$$(G_1 - G_2) \Delta t = \gamma' \Delta x B \Delta y \quad (7)$$

$$S_+ S_* + (S_0 - S_{0*}) e^{-\frac{L}{\alpha L}} + (S_{0*} - S_*) \frac{L}{\alpha L} (1 - e^{-\frac{L}{\alpha L}}) \quad (8)$$

$$S_* = k \left(\frac{U^3}{g R \omega} \right)^m \quad (9)$$

式中: J 为水面比降; h 为平均水深(m); n 为糙率; Δx 为计算河段长度(m); Δt 为计算时段时距(s); Δy 为计算河段平均河床淤积或冲刷的厚度,正值为淤,负值为冲(m); G_1 、 G_2 为进、出口断面输沙率(kg/s); γ' 为床沙干容重(kg/m^3); S_0 为进口断面的含沙量(kg/m^3); S_{0*} 为进口断面的挟沙力(kg/m^3); L 为库段长度(m); α 为恢复饱和系数,淤积时可取 0.25,冲刷时可取 1.0; $l = q/\omega$ 表示泥沙在层流中由水面落到河底的距离(m); q 为单宽流量(m^3/s); U 为断面流速(m/s); R 为断面水力半径(m); k 、 m 分别为水流挟沙力公式的系数与指数。其它符号含义同前。

2 模型参数的率定与验证

在利用水库一维泥沙数学模型进行实际水库泥沙计算

时,必须先确定模型中参数 k 、 m 的值。而模型参数的确定与水库的水沙运动特性密切相关,不同的水库, k 、 m 的值也会不一样。因此,把水库一维泥沙数学模型应用于崖羊山水库时需要利用崖羊山水库实测水沙资料,对模型中参数 k 、 m 的值进行率定和验证。

2.1 参数率定

(1) 选择一段时期的水库日平均入库流量资料和日平均入库含沙量资料,根据流量过程线的变化趋势和特点,按 1.2 节中第(1)条假定条件,把流量过程概化为由若干流量级组成的梯级过程。

(2) 把库区划分为若干河段,称第 i 断面至第 $i+1$ 断面之间的河段为第 i 河段,断面序号由下游向上游递增。绘制每一断面的横剖面图及有关工作曲线,如水位-河宽、水位-水力半径及水位-过水面积关系线等。对于每一流量梯级,根据水库坝址处水位和公式(6),从坝址向上游利用试算法推求水面线,可得到上游入库断面流速 U 和断面水力半径 R 的值,即可求得 $U^3/(gR\omega)$ 。

(3) 根据水库日平均入库流量资料和日平均入库含沙量资料,求出逐日平均输沙率,通过曲线拟合方法,建立输沙率和流量关系式 $G = MQ^N$, 并确定其中参数 M 与 N 的值。对于天然河流,含沙量与挟沙力通常较为接近,而水库入库断面一般距离坝址较远,因此可以视水库入口处为天然状态,故可以假定水库入库断面挟沙力应具有和含沙量相同的函数形式,而含沙量的函数形式只需由前面求得的输沙率与对应流量的比值可得,因此对于每一流量梯级,根据流量即可求得入库断面平均挟沙力。

(4) 把求得的 S_* 与 $U^3/(gR\omega)$ 的值点绘在对数坐标系中,并通过曲线拟合方法求得一条趋势线,由斜率及截距就可以率定出模型参数 k 、 m 的值。

2.2 参数验证

对以上模型参数的率定成果,尚需验证其合理性,方法如下:

(1) 将模型参数的率定成果代入水库一维泥沙数学模型进行水库泥沙淤积计算。为此,另选择一段时期的水库日平均入库流量资料和日平均入库含沙量资料,以一天 24 h 为计算时段 Δt ,以每一河段长度为计算河段长度 Δx ,联立方程(6)、方程(8)和方程(9)计算每一河段进、出口断面的平均含沙量 S_1 、 S_2 ; 再联立方程(6)和方程(7),即可得到该计算河段内的淤积量和淤积厚度。

(2) 从库区上游至坝址逐河段计算,即可得到该计算时段内的淤积量和淤积厚度。

(3) 从选定时期内第一天计算到最后一天,即可得到该时期内水库总淤积量和库区淤积厚度。

(4) 将模型计算的总淤积量和淤积厚度与实测结果进行比较和分析,验证模型参数率定成果的准确性。

3 实例分析

3.1 水库概况

现以崖羊山水库为例,对本文的水库泥沙数学模型参数率定与验证方法进行实例分析。该水库位于云南省思茅地区

李仙江流域把边江河段上,坝址以上控制流域面积 6 130 km²,水库总库容 2 47 亿 m³,调节库容 1 34 亿 m³,具有季调节能。根据历史实测资料分析,最大年平均流量 136 m³/s,发生在 1966 年,最小年平均流量 51.5 m³/s,发生在 1989 年,最大、最小年平均流量之比为 2.6;最大年平均输沙率 499 kg/s,发生在 1991 年,最小年平均输沙率 109 kg/s,发生在 1965

年,最大、最小年平均输沙率之比为 4.6。崖羊山水库坝址输沙模数在 1 500~1 800 t/km² 之间,泥沙特征值及年内分配见表 1。其中,汛期(6 月-10 月)平均输沙率 696.88 kg/s,含沙量 3.16 kg/m³,汛期悬沙量占全年悬沙量的 93.92%。

库区范围自坝址至上游 31.9 km 处,共 35 个断面,断面间距见表 2,各断面横剖面的位置见图 1。

表 1 崖羊山水库坝址水沙特征值

Table 1 Water sand characteristic values at dam site of Yayangshan Reservoir

月份	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	平均值
泥沙年内分配比例	0.15	0.1	0.04	0.18	2.11	11.59	28.8	26.51	17.56	9.46	3.05	0.43	100
沙量(104t)	1.471	0.981	0.392	1.765	20.695	113.675	282.47	260.01	172.228	92.784	29.914	4.217	980.8
输沙率(kg/s)	5.493	4.018	1.465	6.811	77.3	439	1 055	971	664	346	115	15.7	310.8
流量(m ³ /s)	46.8	34.7	25.1	21.9	41.4	127	264	305	220	182	120	71.0	122
含沙量(kg/m ³)	0.12	0.12	0.06	0.31	1.87	3.46	4.00	3.18	3.02	1.90	0.96	0.22	2.55

表 2 各横剖面编号及其距坝址里程数

Table 2 Uumber and mileage to dam site of each cross section

断面编号	距坝址里程/m	断面编号	距坝址里程/m	断面编号	距坝址里程/m	断面编号	距坝址里程/m
坝址断面	0	YK10	10 986.09	YK21	20 826.74	YK31	27 846.29
YK01	1 917.3	YK11	11 205.68	YK22	21 722.69	YK32	29 057.03
YK02	2 832.62	YK12	12 872.62	YK23	22 193.81	YK33	3 0259.14
YK03	4 221.5	YK13	13 987.39	YK24	22 761.1	YK34	3 1193.15
YK04	4 764.72	YK15	14 895.05	YK25	23 477.89	YK35	3 1938.39
YK05	5 546.4	YK16	16 978.66	YK26	24 350.84		
YK06	6 401.2	YK17	17 682.59	YK27	25 093.03		
YK07	7 028.57	YK18	17 991.69	YK28	25 795.1		
YK08	8 783.42	YK19	18 926.62	YK29	26 334.6		
YK09	9 944.09	YK20	19 936.23	YK30	27 122.98		



图 1 崖羊山水库横剖面分布图

Fig. 1 Distribution map of cross sections in Yayangshan Reservoir

3.2 模拟数据

用于模拟分析的数据包括 2006 年 7 月 8 日至 2011 年 12 月 31 日的日平均入库流量资料和日平均入库含沙量资料,以及 2001 年和 2013 年库区沿河横剖面 and 纵剖面资料。

3.3 参数率定

利用崖羊山水库 2006 年 7 月 8 日至 2011 年 12 月 31 日的日平均入库流量资料和含沙量资料,求得输沙率与流量关系式

$G = MQ^N$ 中参数 M 与 N 的值见图 2,分别为 $M = 0.001779$ 、 $N = 2.1134$,所以输沙率与流量的关系式为 $G = 0.001777 Q^{2.1134}$,即挟沙力与流量的关系式为 $S_* = 0.001779 Q^{1.1134}$ 。

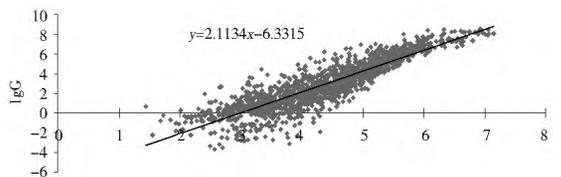


图 2 输沙率与流量的对数关系

Fig. 2 Logarithmic relationship between sediment transport rate and flow rate

选择时期 2007 年 1 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日率定模型参数 k 、 m 的值。把率定期内入库流量过程线概化为由 12 个不同流量级组成的梯级过程线;对于每一个流量梯级,计算对应流量下水库的水面线,根据水面线计算断面流速 U 和断面水力半径 R ,求得 $U^3/(gR\omega)$ 的值;再根据求得的 $S_* = 0.001779Q^{1.1134}$ 计算 S_* 的值。最终把 12 组 S_* 与 $U^3/(gR\omega)$ 的值以对数的形式绘在坐标轴上,见图 3。

根据图 3,可以得出 $k = 0.03069$ 、 $m = 0.4648$,所以 $S_* = 0.03069(U^3/(gR\omega))^{0.4648}$ 。

3.4 模型验证

根据所建立的模型方程编制 VB 计算程序进行水库泥沙计算,验证参数 k 、 m 值的准确性。利用 2006 年 7 月 8 日

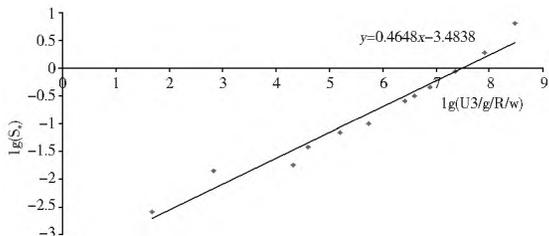


图 3 断面挟沙力与 $U^3/(gR\omega)$ 的对数关系

Fig. 3 Logarithmic relationship between sediment transportation capacity and $U^3/(gR\omega)$

至 2011 年 12 月 31 日的水库日平均入库流量资料和日平均入库含沙量资料,通过计算可得水库总淤积量为 887.6255 万 m^3 ,年平均淤积量为 161.3864 万 m^3 。

利用水库 2001 年和 2013 年河道横剖面资料计算得到水库总淤积量为 2 314 2455 万 m^3 ,年平均淤积量为 192 8538 万 m^3 。

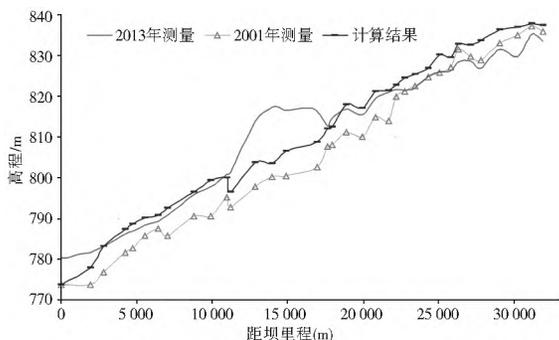


图 4 崖羊山水库深泓线剖面比较

Fig. 4 Profile comparisons of thalweg in Yayangshan Reservoir

模型计算的年平均淤积量的结果比实测偏小,相对误差为 16%。可能原因是水库实测淤积量是以两年的河道横剖面数据计算得出,而模型计算是逐年进行计算的。

通过模型计算和实测得到水库纵断面成果,见图 4。可以看出:从水库深泓线剖面变化曲线可以看出模型计算所得的淤积分布呈带状分布,无明显三角洲出现;库尾未形成冲刷;坝址处泥沙淤积程度小于实测值。可能原因是模型计算时把坝址处河道断面当作开敞式断面所致。

综上,可以看出,率定的模型参数基本合理。

4 结语

本文是在一定假定条件下对一维非均匀流不饱和输

沙模型进行简化,并对模型中参数的率定和验证过程进行研究,通过运用崖羊山水库实测资料进行分析验证了所率定参数的准确性,为崖羊山水库今后进行水库泥沙计算提供依据,也为类似工程提供一些帮助。但由于模型参数的确定与水库的水沙运动特性密切相关,所以今后应随着实测资料的增加做进一步的验证,以保证参数的准确性。

参考文献(References):

- [1] 陈建. 水库调度方式与水库泥沙淤积关系研究[D]. 武汉大学, 2007. (CHEN Jian. Research on the Relation between Operation Regulation and Sediment Deposition of Reservoir[D]. Wuhan University, 2007. (in Chinese))
- [2] 嵇海洋. 水库泥沙模型研究[D]. 河海大学, 2005. (JI Hai xiang. Study on Sediment Model of Reservoir[D]. Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [3] 韩其为. 水库淤积[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (HAN Qi wei. Reservoir Sedimentation[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [4] 张瑞瑾, 谢鉴衡. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988. (ZHANG Rui jin, XIE Jian heng. River Sediment Dynamics[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1988. (in Chinese))
- [5] 韩其为, 杨小庆. 我国水库泥沙淤积研究综述. 中国水利水电科学研究院学报, 2003. (HAN Qi wei, YANG Xiao qing. Review of Research on Reservoir Sediment Deposition in China. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003. (in Chinese))
- [6] 梁国亭, 高懿堂, 梁跃平, 等. 非恒定流泥沙数学模型原理及其应用[J]. 泥沙研究, 1999. (LIANG Guo ting, GAO Yi tang, LIANG Yue ping, et al. The Principle and Application of Unsteady Flow Sediment Mathematical Model[J]. Journal of Sediment Research, 1999. (in Chinese))
- [7] 杨国录. 河流数学模型[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. (YANG Guo lu. The Mathematical Model of River[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993.)
- [8] 武汉水利电力学院著. 河流泥沙工程学[M]. 水利电力出版社, 1983. (Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering. River Sediment Engineering[M]. Water Conservancy and Electric Power Press, 1983. (in Chinese))