千河冯家山水库淤积数学模型的研究

林劲松¹, 巨 江², 马耀光¹, 刘俊民¹

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨陵 712100; 2 国家电力公司西北勘测设计研究院科研院,西安 710083)

[摘 要] 利用千河千阳水文站 1957~1993 年的水沙资料及冯家山水库的运用方式,建立了冯家山水库淤积数学模型。在数学模型验证的基础上,得到了冯家山水库未来 50 年内的淤积过程,淤积总量及分布。其中水库将淤积 1.71 亿m³,推移质淤积占 0.259 亿m³,悬移质淤积占 1.45 亿m³;有效库容由 2.86 亿m³ 损失到 1.43 亿m³,死库容由 0.91 亿m³ 损失到 0.33 亿m³,从而导致冯家山水库调节系数降低,大大减小调节能力。

[关键词] 冯家山水库; 水库淤积数学模型; 异重流排沙; 淤积总量; 淤积分布

[中图分类号] TV 145⁺. 1 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387 (2002) 06-0202-05

在我国干旱半干旱的西北地区,水库是该地区 水资源利用的一种最重要的形式。由于西北地区河 流的洪水多由暴雨产流、汇流形成,洪水中多挟带 泥沙,因此水库在调蓄洪水时,必然要对泥沙问题 进行考虑分析,而泥沙冲淤数学模型是水库调水调 沙运用方式研究中的一条极其重要的途径。

冯家山水库是陕西省一座以农业灌溉为主,兼 有防洪、发电、养殖等综合利用的大型水利工程,水 库总库容 3 89 亿m³,灌溉面积 9 07 万 hm²。随 着西部大开发的深入进行和社会经济发展的要求, 冯家山水库将承担向宝鸡第二发电厂供应生产用水 和向宝鸡市进行城市供水等任务。由于水库随着运 行时间的发展,呈现出累计性淤积的特点,库容将 随运行时间的延长出现递减,使水资源的供需矛盾 加剧。本研究针对这些问题,通过建立冯家山水库 淤积数学模型的方法,在模型验证的基础上,对水 库未来 50 年内的淤积情况做出预报,以供有关部门 作为设计、管理及运行的参考依据。

1 基本资料

冯家山水库¹¹¹位于渭河支流千河的下游,控制 流域面积3232 km²,年平均径流量4266 亿m³,年 平均悬移质输沙量40435 万 t。枢纽大坝为均质土 坝,坝高73 m,坝顶高程714 m。右岸泄洪排沙洞 底洞进口高程6525 m,高出原河床10 m,最大泄 量575 m³/s,水库正常蓄水位712 m,死水位6885 m,输水洞进口高程6885 m,最大输水量47 m³/s,水库总库容389 亿m³,死库容091 亿m³,最 大水库回水长度 18 5 km。水库计算模型共分 24 个 控制断面,每个断面分别按起点距、高程资料输入 水库淤积数学模型。从 1974 年实测地形开始,用 1993 年实测地形验证最终结果。

考虑到多年平均 86 7% 以上的沙量集中在汛期 (7~9月份),而且 74 2% 的沙量是随洪峰入库的^[2],所以汛期按天划分时段,非汛期按月划分时段,全年共分 131 个时段,选用 7,8,93 个月多年平均实测悬沙级配作为入库悬移质代表级配。悬沙中值粒径 *d*₅₀为 0 02 mm,级配组成见表 1。

表1 汛期入库悬移质级配

Table 1 Composition of suspending sediment

entering reservior in high-water season

粒径/mm Size	小于某粒径 沙重百分率/% Percentage finer	粒径/mm Size	小于某粒径 沙重百分率/% Percentage finer
0 007	23 83	0 10	93. 29
0 01	33. 18	0 25	98 45
0 025	56 54	0.5	99. 7
0 05	79. 88	1.0	100

表 2 推移质泥沙级配

Table 2 Size distribution of bed sediment

粒径/mm Size	小于某粒径 沙重百分率/% Percentage finer	小于某粒径 粒径/mm Size Percentage fine					
0 08	9. 16	0 28	73. 34				
0 112	23. 34	0 45	87. 36				
0 125	34. 54	1. 0	95. 43				
0. 18	54. 52						

千阳站没有推移质实测资料,水库设计时,推 移质是按悬移质的 15% 估算的,尽管量不大,但对

* [收稿日期] 2001-11-28

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[[]作者简介] 林劲松(1968-),男,湖南长沙人,工程师,在读硕士,主要从事泥沙工程试验及水土环境与保护等研究工作。

回水末端淤积形态的影响至关重要。为此,在库尾 19[#]~23[#] 河段挖坑取样,得到推移质中值粒径 *d*₅₀ 为0 17 mm,平均粒径 *d*_{*p*_j}为0 25 mm,推移质级 配如表 2。

坝前水位是按实际运行水位控制的。

2 水库淤积数学模型控制方程

水库冲淤泥沙数学模型基本方程由水流控制方 程和泥沙输移方程组成,其计算程序由水面线计算 含沙量计算、冲淤量计算及断面形态计算等内容构 成。由于未知物理量的个数大于基本方程数,必须 引入一些补充关系式来封闭基本方程。在文献[3~ 5]的基础上,建立以下的控制方程来对水沙边界条 件进行约束和计算。

2 1 水流运动方程

明流

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x} \left(Z + \frac{Q^2}{2gA^2}\right) = -\frac{Q^2}{K^2},$$

异重流

 $V = \sqrt[3]{\frac{8}{\lambda}} \frac{\Delta Y}{Y_0} g \, q J_{0}$

式中, *x* 为流程; *Q* 为流量; *Z* 为水位; *A* 为过水面 积; *K* 为流量模数; *V* 为异重流运行速度; *g* 为重力 加速度; λ为异重流阻力系数; Δ*Y* 为有效重度; *δ* 为 浑水重度; *J* ⁰ 为异重流底坡; *q* 为浑水单宽流量。

2 2 **悬移质运动方程**

将非均匀沙按粒径大小分组,则第 k 组泥沙的 不平衡输沙方程为

$$S_{i,k} = S_{i,k} + (S_{i-1,k} - S_{i-1,k}) e^{-\alpha u_k \Delta x_i/q} + (S_{i-1,k} - S_{i,k}) \frac{q}{\alpha u_k \Delta x_i} (1 - e^{-\alpha u_k \Delta x_i/q}),$$

式中, *S*_{1,k}, *S*_{+i,k}分别为 *i* 个断面第 *k* 组泥沙的含沙 量和挟沙力; ω 为第 *k* 组泥沙的代表沉速; α 为恢复 饱和系数; Δ*x*_i 为积分河段长度; *q* 为单宽流量; *S*_{i=1,k}为第 *i*-1 个断面含沙量; *S*_{+i=1,k}为第 *i*-1 个 断面挟沙力。

2 3 悬移质挟沙力公式

关于非均匀沙的挟沙力目前有较多的计算方法。本研究计算是将非均匀沙按粒径大小分组,每 组用代表粒径(或沉速)代入挟沙力公式,得到该 组泥沙的可能挟沙力,然后乘以该粒径组床沙百分 数得实际挟沙力,用公式表示为:

$$S \star_k = P_{bk} K \left(\frac{V^3}{gR \omega}\right)^m$$

式中, S • k为实际挟沙力; P kk为第 k 组泥沙的床沙百 分数; V 为断面平均流速; R 为水力半径; K 为挟沙 系数; m 为指数, 由实测资料率定。 2 4 悬移质河床变形方程

$$\mathcal{Y} \quad \frac{\partial h_{i,k}}{\partial t} = \quad \alpha \omega_k \left(S_{i,k} - S_{\star i,k} \right)$$

式中, *Y* 为悬移质干容重, 取 1. 2 g/m³; *h*_{i,k}为第 *i* 个断面上第 *k* 组泥沙的冲淤厚度; *t* 为时间, 其他符 号意义同前。

2 5 推移质输沙率方程

冯家山水库推移质占悬移质沙量的15%,推移 质计算不再分组而用平均粒径代之。选用的水流单 位功率挟沙力公式为:

$$S = \alpha (\frac{VJ}{\omega})^{\beta}$$

推移质河床变形方程

$$\mathcal{Y} \; \frac{\partial h}{\partial t} + \; \frac{\partial g_b}{\partial x} = \; 0$$

式中, *s* 为水流单位功率挟沙力; *v* 为流速; *J* 为比 降; ω为沉速; α, β 为参数; *g*, 为推移质输沙率; *h* 为冲淤厚度; *Y* 为推移质干容重, 取值 1. 4 t/m³, 其 他符号意义同前。

2 6 河床组配方程

将床沙分为可动层和不动层两部分,根据沙量 守恒原理导出的床沙级配方程为:

淤积时 $P_k^{n+1} = P_k^n + (\Delta h_k - P_k^n \Delta h) / \Delta h$

冲刷时 $P_k^{n+1} = P_k^n + (\Delta h_k - P_k \Delta h) / \Delta h$

式中, P_k^n , P_k^{n+1} 分别代表冲淤前后可动层内第 k 组 泥沙的重量百分数; P_k 代表不动层级配; Δh_k 为 k 组 泥沙的冲淤厚度; Δh 为平均冲淤厚度, 则总厚度为:

$$\Delta h = \sum_{k=1}^{k} \Delta h_k$$

2 7 冲淤量横断面分布方程

借用流管原理,联解满宁公式与河床变形方程, 得到冲淤厚度沿周边的分配公式:

$$\Delta h_j = \Delta h \left(\frac{h_j}{H}\right)^{5/3}$$

式中, Δh 为平均冲淤厚度; Δh_j 为第 j 个子断面的 冲淤厚度; H 为平均水深; h_j 为第 j 个子断面水深。 该式表明在一个全断面上,水深越大处冲淤厚度越 大。

3 模型验证

验证是衡量数学模型正确与否的关键^[6]。 泥沙 数学模型验证实质上是通过率定参数,保证计算与 实测结果基本一致,从而提高预报成果的精度和可 靠性。冯家山水库泥沙数学模型验证主要包括淤积

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

形态和淤积量两部分内容。

3 1 淤积剖面验证

冯家山水库有逐年实测地形资料,所以泥沙验 证从1974年建库前原河床地形开始,入库水沙系列 及坝前水位采用1974~1993年实测数据。其中入库 推移质按悬移质沙量的15%估算,千阳站至枢纽区 间来水来沙约占入库水沙量的10%。

从计算结果看,水库按三角洲淤积发展,三角 洲前坡较陡,水深突增,淤积体向坝前推进;三角 洲后坡平缓,淤积朝上游延伸较慢。图1为1974年 到1993年20年内计算与实测淤积纵剖面。





Fig. 1 Comparisons of deposited longitudinal profiles of Fengjiashan reservior between calculated and real results
Calculated value: Real value

由图 1 可见,库尾三角洲段,异重流过渡段的 计算与实测形态吻合较好,而坝前锥体段差别较大。 其原因是坝前锥体淤积是由水库运用方式形成的浑 水水库落淤造成的,它与闸门推迟开启时间、浑水 水库历时长短有关,用数学模型是难以描述的。

3 2 累计淤积量验证

-7

数学模型逐年输出悬移质、推移质累计淤积结 果。图 2 为计算与实测累计淤积量曲线。由图 2 可 见,累积曲线近似呈直线变化,表明水库逐年淤积 强度接近,排沙比变化不大,其淤积量完全由入库 沙量和蓄洪排沙运用方式决定。只有当泥沙淤积到 一定程度后,淤积强度才开始降低,排沙比增大,逐 渐趋于淤积平衡。



between calculated and real results . Calculated value; . Real value

4 模型预报成果

待模型验证完成后,保持数学模型所率定的参数不再变化,然后可根据不同的入库水沙系列,坝 前水位调度过程预报未来若干年的淤积形态,累计 淤积量、库容损失情况等。

4. 1 入库水沙系列的选择

冯家山水库已搜集到 1957~1993 年共 37 年水 沙资料, 代表年系列直接影响着未来的预报成果。水 沙系列选择应力图包括枯、中、丰不同代表年份, 系 列的年水量、沙量均值能与多年平均值接近。为此, 选择了 1980~1989 年 10 年入库水沙过程, 其年均 水量 4 166 亿m³, 年均沙量 403 89 万 t, 分别与 37 年的平均值 4 266 亿m³ 和 404 35 万 t 接近。预 报未来 50 年淤积情况时, 该系列可重复使用。

4. 2 预报淤积剖面

数学模型在 1993 年实测地形基础上重复执行 1980~ 1989 年水沙系列及坝前水位过程, 每隔 10 年输出 1 次淤积地形。相应淤积纵剖面高程见表 3。

淤积三角洲前坡向坝前推进,后坡向上游延伸, 淤积体越来越大。50年内水库总淤积量 1.71亿m³,三角洲顶点推至距大坝9km,淤积厚 度达25m。坝前锥体淤积由原河床高程645m抬高 到675m,淤积厚度约30m,距输水洞口仅 13.5m。以50年末淤积剖面为例,水库各段淤积 分布见表4。

m

表 3 计算淤积纵剖面高程

Table 3 The caculating altitude of depositing vertical section

收去的日		预报年限/年 Results of forecasting											
的 M M M M M の	距坝里程/m Distance	199	93	1)	20	0	30)	40)	5	0
				(20	33)	(20	13)	(20)	23)	(20)	33)	(20	43)
CS24	18 500	714	00	710	37	714	79	716	84	718	33	719.	55
CS23	17 760	710	00	710	89	714	22	715	87	717.	18	718	52
CS22	16 970	709.	20	710	90	713	35	715.	04	716	35	717.	60
CS21	16 400	708	40	710	58	712	82	714	57	715.	91	717.	36
CS20	15 720	706	70	709.	83	712	00	713	77	715.	08	716	45
CS19	14 810	705	40	709.	09	711.	36	713	06	714	74	716	15
CS18	14 310	705	30	708	42	710	91	712	67	713.	97	715.	19
CS17	13 430	702	00	707.	53	708	78	709.	83	711.	27	712	48
CS16	12 910	700	20	706	56	707.	80	708	45	709.	69	710	69
CS15	12 300	698	20	702	44	707.	14	707.	43	708	84	707.	57
CS14	11 355	694	50	698	7	705.	18	706	77	708	15	708	34
CS13	10 955	693	00	695.	88	701.	08	706	65	707.	81	9 707.	88
CS12	10 570	691.	50	693	17	697.	14	706	54	707.	69	708	08
CS11	10 170	686	30	690	24	695.	37	705.	70	707.	53	707.	75
CS10	9 500	680	40	683.	65	687.	76	694	67	706	11	705.	49
CS9	9 000	679.	45	681.	80	684	74	689.	32	696	59	705.	72
CS8	8 495	678	50	679.	94	681.	70	683.	92	686	97	705.	95
CS7	7 845	676	30	677.	14	678	10	679.	30	680	49	683.	71
CS6	7 300	674	35	675.	42	676	67	678	06	679.	86	683.	35
CS5	6 810	672	60	673.	87	675.	39	677.	27	679.	29	682	95
CS4	4 905	670	40	671.	32	672	41	673.	72	675.	04	677.	07
CS3	3 275	688	50	669.	38	670	44	671.	69	672	99	674	93
CS2	1 740	677.	20	668	03	669.	04	670	25	671.	51	673.	29
CS1	0	664	50	665.	34	666	33	667.	46	668	61	670.	22

表 4 50 年内冯家山水库各段淤积特征

Table 4 Characteristics of deposition on every stage in Fenjiashan Reservoir in fifty years in the future 占淤积总量 库区分段 平均淤积厚度/m 淤积量/万m³ 断面号 长度/m 比降/‰ 百分数/% Stage of Thickness of Depositon No. Percentage of Length Slope reservior depo sition amount deposition 锥体段 1# ~ 7# 7 500 7~ 10 2 400 13 1. 73 Stage of cone 三角洲前坡 7# ~ 8# 650 33. 8

1. 26

9 500

预报的横断面除回水末端滩槽明显外,其他库 区横断面均水平抬升。

8# ~ 24#

4. 3 预报累计淤积量及库容损失

Fornt slope of delta

三角洲后坡

Back slope of delta

从 1993 年开始, 冯家山水库未来 50 年还将淤积1. 71 亿m³, 其中推移质淤积 2 585 万m³, 悬移 质淤积 14 500 万m³。入库推移质被全部淤积, 入库 悬推移质仍有部分排出库外。

表 5 为不同年份悬移质的淤积量及排沙比。 冯家山水库运行到 2043 年,累计淤积量可达

2 37 亿m³。其中设计水位712 7m 以下淤积2 06 亿m³,占总库容的53%;有效库容淤积1 43 亿m³,

占有效库容的 50%; 死库容积淤积 0 58 亿m³, 占 死库容的 63 7%。数学模型预报的不同年份末的水 位~ 库容关系见表 6。

16 023

87

17. 5

表 5 不同年份的悬移质淤积特性

Table 5 Characteristics of suspending sediment

depos	sition ir	n different	vears
			/

-	•	
年份 Years	淤积量/万 t Deposition amount	排沙比/% Percentage of sand sluicing
1993~ 2003	2 682	33. 5
2003~ 2013	2 776	31. 3
2013~ 2023	3 035	24 9
2023~ 2033	3 034	24 9
2033~ 2043	3 000	25. 7

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 6 冯家山水库不同年末计算水位~ 库容关系

Table 6 Storage capacity and level curve of the different year end in Fengjiashan reservior 万m³

预报年份								水位/ո	n Leve	1						
Years of forecasting	658	662	666	670	674	678	682	686	690	694	698	702	706	710	712	714
1974	392	720	1 200	1 840	2 760	3 980	5 610	7 540	10 130	13 370	17 420	22 420	28 150	34 450	37 70	0 41 230
1993	76	88	115	340	1 067	2 079	3 571	5 269	7 506	10 188	13 479	17 309	22 349	28 468	31 13	4 34 668
2003			10	139	728	1 657	3 081	4 795	6 989	9 445	12 540	16 052	20 163	25 389	28 30	5 31 629
2013				71. 3	545	1 349	2 651	4 302	6 350	8 686	11 450	14 791	18 431	23 041	25 68	5 28 872
2023				10	335	1 033	2 173	3 738	5 673	7 861	10 380	13 228	16 300	20 555	23 05	9 26 010
2033					196	787	1 685	3 183	4 979	7 074	9 491	12 041	14 680	18 393	20 72	7 23 460
2043					69	468	1 170	2 2 5 6	3 919	5 671	7 613	9 645	11 753	15 178	17 36	0 20 014

表 7 给出了有效库容和死库容(688 5 m 以 下)的损失过程。 表 7 冯家山水库有效库容和死库容损失过程

Table 7	Lossing process of	effctive storage	and died storage
---------	--------------------	------------------	------------------

年份 Years	有效库容/亿m ³ Effective storage	死库容/亿m ² Died storage	年份 Years	有效库容/亿m ³ Effective storage	死库容/亿m ² Died storage		
1974	2 86	0 916	2023	1. 81	0 495		
1993	2 44	0 667	2033	1. 64	0 431		
2003	2 21	0 617	2043	1. 43	0 330		
2013	2 01	0 558					

[参考文献]

[1]	朱书乐	冯家山水库异重流排沙观测成果初步分析 [J]. 陕西水利,1986,(6):14-19.
[2]	林劲松	冯家山水库排沙运用及水库淤积分析 [J] 西北水资源与水工程, 2002, (1): 37-40
[3]	张瑞谨	河流泥沙动力学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1988
[4]	谢鉴衡	河流模拟 [M] 北京:水利电力出版社,1990
[5]	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
[6]	西北水和]科学研究所,清华大学水利系 水库泥沙 № 1 北京:水利电力出版社,1979

Study on M athematic M odel of Depositon in the Fengjiashan Reservor on Q ian R ive

 $L IN Jin-song^{1}$, $JU Jiang^{2}$, $MA Yao-gang^{1}$, $L IU Jum-m in^{1}$

(1 College of W ater R esources and A rchitectural Engineeing, N orthwest Sci⁻Tech University of A griculture and Forestry, 2 N orthwest Investigation D esign and Reserch Institute, X i'an 710083, China)

Abstract This paper utilizes water and sediment data which collected from Q ianyang hydrologic station from 1957-1993 and the administrated model of Fengjiashan Reservior, the authors constructe a methematic model of reservior deposition. Based on the check of the model, the authors research on the process, quantities and distribution of the deposition in fifty years in the future Total deposition in the reservior is 171 millions m³, bed material is 25. 85 millions m³, suspending sediment is 145 millions m³. Effective storage will decrease from 286 millions m³ to 143 millions m³, died storage will decrease from 91 millons m³. It will lead to the decrease of coefficent of the reservior and reduce the capability of adjustment greatly.

Key words: Fengjiashan reservior; mathematic model of reservior deposition; density current sluicing sedinment; depositing quantity; deposting distribution