

冯家山水库供水调度及调洪计算分析^{*}

林劲松¹, 巨江², 马耀光¹, 张耀哲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, 陕西 西安 710083)

[摘要] 利用千河千阳水文站 1957~1993 年的水沙资料, 依据冯家山水库的运用模式, 建立了冯家山水库淤积数学模型。在数学模型计算得到水位-库容关系的基础上, 对不同频率的洪水进行了不同淤积年限库容的调洪计算, 得到了 2030 年各需水部门的供水调度结果。结果表明, 每年向宝鸡市供水 6 000 万 m³, 向宝鸡第二发电厂供水 4 000 万 m³, 供水保证率为 97.3%, 满足设计标准 97% 的要求; 多年平均供农业灌溉用水 14 910 万 m³, 供水保证率为 59.5%, 超过设计要求的 50%; 向羊毛湾水库供水 3 000 万 m³, 供水保证率为 62.2%。

[关键词] 冯家山水库; 水库淤积数学模型; 供水调度; 调洪计算

[中图分类号] TV 697.1⁺4

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2002)05-096-04

冯家山水库位于陕西省千阳县的千河干流上。水库总库容 3.89 亿 m³, 灌溉面积 9.07 万 hm², 是一座多目标供水、综合利用的大型水利工程。目前, 除承担农业灌溉用水、羊毛湾水库供水及排沙弃水外, 还要向宝鸡第二发电厂一期工程供应工业用水及向宝鸡市城市生活供水。多年来, 由于冯家山灌区渠系配套不健全, 灌溉面积减少, 灌溉用水量为 26.6 亿 m³^[1], 仅占入库总径流量 80.9 亿 m³ 的 32.3%, 其余水量因防洪兼排沙被弃掉。目前来看, 冯家山水库供水的能力远大于需水要求, 无供需矛盾。但随着泥沙淤积的增加, 库容减少, 水库调节能力随之降低, 加之各需水部门需水量随经济增加, 未来若干年内, 水库的供需矛盾将形成并逐渐严重。由于汛期遭遇洪水时, 水库又采用异重流排沙及蓄洪排沙运用方式^[2,3], 异重流运动到坝前将形成浑水水库, 若浑水界面低于 688.5 m 输水洞高程, 则宝鸡二电厂工业用水和宝鸡市城市生活用水水质不受影响; 反之, 各需水部门将引用浑水, 此时必须限制其含沙量。因此, 对水库进行供水调度研究及科学地进行调洪计算是水库及用水部门所关心的问题。作者在文献[4~6]的基础上, 建立了冯家山水库泥沙淤积数学模型, 并对未来几十年内冯家山水库的水位-库容关系进行了计算分析, 同时在模型验证的基础上, 应用该数学模型完成了水库供水调度

和调洪计算分析。

1 水库淤积数学模型

1.1 水流运动方程

$$\text{明流} \quad \frac{d}{dx} \left(Z + \frac{Q^2}{2gA^3} \right) = - \frac{Q^2}{K^3}$$

$$\text{异重流} \quad V = \sqrt{\frac{8}{\lambda} \frac{\Delta Y}{Y_0} g q J_0}$$

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; ΔY 为有效重度; Y_0 为浑水重度; J_0 为异重流底坡; q 为浑水单宽流量。

1.2 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

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

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

式中, $S_{i,k}$, $S_{i-1,k}$ 分别为 i 个断面第 k 组泥沙的含沙量和挟沙力; ω_k 为第 k 组泥沙的代表沉速; α 为恢复饱和系数; Δx_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; $S_{i-1,k-1}$ 为第 $i-1$ 个断面挟沙力。

1.3 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

^{*} [收稿日期] 2002-04-23

[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研究。

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:

$$S_{*k} = P_{bk} K \left(\frac{V^3}{gR\omega} \right)^m$$

式中, S_{*k} 为实际挟沙力; P_{bk} 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。

1.4 悬移质河床变形方程

$$\gamma \frac{\partial h_{i,k}}{\partial t} = \alpha \omega (S_{i,k} - S_{*i,k})$$

式中, γ 为悬移质干容重, 取 1.2 g/m^3 ; $h_{i,k}$ 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。

1.5 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:

$$S = \alpha \left(\frac{VL}{\omega} \right)^\beta$$

推移质河床变形方程为

$$\gamma \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial g_b}{\partial x} = 0$$

式中, S 为水流单位功率挟沙力; V 为流速; L 为比降; ω 为沉速; α , β 为参数; g_b 为推移质输沙率; h 为冲淤厚度; γ 为推移质干容重, 取值 1.4 t/m^3 。其他符号意义同前。

1.6 河床级配方程

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:

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

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

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 为第 k 组泥沙的冲淤厚度; Δh 为平均冲淤厚度, 则总厚度为:

$$\Delta h = \sum_k \Delta h_k$$

1.7 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。

2 供水调度的约束条件

2.1 入库净水量

入库净水量是指从实测径流量中扣除水库蒸发、渗漏等损失后的水量。根据 1957~1993 年统计资料^[1], 冯家山水库多年平均入库径流量 4.27 亿 m^3 , 损失量 0.277 亿 m^3 , 则多年平均入库净水量约 4.0 亿 m^3 。

2.2 水库供水量

2.2.1 城市、电厂供水 到 2030 年, 冯家山水库每年向宝鸡市供水 6000 万 m^3 , 向宝鸡第二发电厂供水 4000 万 m^3 , 按月平均分配水量, 且要求保证率在 97% 以上。

2.2.2 农业灌溉用水 考虑到灌区城镇建设和生活占地, 到 2030 年, 实际灌溉面积由原设计的 9.07 万 hm^2 减少到 8.40 万 hm^2 ; 同时, 随着关中灌区改造项目的完成, 渠系配套设施将进一步完善, 灌溉系数由原设计的 0.5 提高到 0.6 。灌区按湿润年 ($P=25\%$) 不灌水, 中水年 ($P=50\%$) 灌溉定额为 $1860 \text{ m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$, 干旱年 ($P=75\%$) 灌溉定额为 $2265 \text{ m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ 。再结合灌区雨量制订灌溉制度, 要求农灌全年保证率在 50% 以上。

2.2.3 向羊毛湾水库供水 在中、丰水年内, 利用冯家山水库余水向羊毛湾水库年供水 3000 万 m^3 。

2.2.4 排沙弃水 为了减轻水库淤积, 每年 7、8 月份, 水库采用异重流或蓄洪排沙耗水 2000 万 m^3 。

2.3 灌区地下水利用

灌区地下水开发利用是对水库水量的一种补偿。目前机井、辐射井每年已开发利用地下水 4200 万 m^3 ^[11], 冬、春灌各用 1050 万 m^3 , 夏灌 2100 万 m^3 。

2.4 冯家山水库水位-库容关系

通过建立水库泥沙淤积数学模型, 计算得到了不同年末的水位库容关系见表 1。

表 1 冯家山水库不同年末计算水位-库容关系

预报年份 Years of fore- casting	水位/m Level															万 m ³
	658	662	666	670	674	678	682	686	690	694	698	702	706	710	712	
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	37 700	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	31 134	34 668
2003			10	139	728	1 657	3 081	4 795	6 989	9 445	12 540	16 052	20 163	25 389	28 305	31 629
2013				71.3	545	1 349	2 651	4 302	6 350	8 686	11 450	14 791	18 431	23 041	25 685	28 872
2023				10	335	1 033	2 173	3 738	5 673	7 861	10 380	13 228	16 300	20 555	23 059	26 010
2033					196	787	1 685	3 183	4 979	7 074	9 491	12 041	14 680	18 393	20 727	23 460
2043					69	468	1 170	2 256	3 919	5 671	7 613	9 645	11 753	15 178	17 360	20 014

3 输水洞浑水出流计算分析

水库在不同的淤积年限上,如遇到不同频率的入库洪水过程,推迟泄洪或泄量不足,会导致浑水界面抬升,浑水库容增大。当清浑水界面上升到一定高程时,输水洞可能外泄浑水将对城市用水和宝鸡二电厂工业用水构成威胁。

3.1 入库洪水过程设计

冯家山水库设计中,根据水文气象资料,降雨成因、暴雨时空分布等,选用 1968-09-10~13 一场降水作为典型洪水过程。它接近 10 年一遇洪水标准,按同频率放大原则,分别得到 2, 5, 10, 20, 50 年一遇洪水过程线。其设计洪水的特征值见表 2。

表 2 入库洪水过程特征值

Table 2 Characteristic value of flood in the process of entering reservoir

频率/% Frequency	重现期/年 Years	洪峰流量/ (m ³ · s ⁻¹) Flood flow	3 日洪量/万 m ³ Flood volume of three days
50	2	340	3 510
20	5	560	5 770
10	10	1 040	8 270
5	20	1 650	11 800
2	50	2 600	15 610

3.2 浑水水库调洪计算

进入汛期后,特别是遭遇洪水时,冯家山水库多采用蓄洪排沙的运行方式。即水库异重流运动到坝前时,因推迟开闸下泄而在水库下部滞蓄成一定体积的浑水水库,随着入库异重流和排泄流量的增减,浑水水库将经历一个由小到大,然后消失的变化过程。在这个过程中,清浑水界面比较分明,且水平上升或下降,同时浑水内的泥沙也不断落淤。描述浑水水库调洪过程的方程^[7]为:

$$\frac{dv}{dt} = Q_{\lambda} - Q_{\text{出}} - \bar{\Omega}\omega + \bar{\Omega}q$$

式中, v 为浑水库容; $\bar{\Omega}$ 为浑水面积; t 为时间; Q_{λ} 为入库流量; $Q_{\text{出}}$ 为出库流量; ω 为浑水界面沉速; q 为

掺混强度; $\bar{\Omega}\omega$ 为浑水界面沉降引起的浑水减少量; $\bar{\Omega}q$ 为掺混导致的浑水增加量。

表 3 不同淤积年限的最高浑水位

Table 3 Highest level of turbid water during different years

重现期/年 years	淤积年限/年 Deposition years						m
	1993	2003	2013	2023	2033	2043	
2	671.15	673.55	674.50	675.80	677.11	677.61	
5	678.10	679.51	680.40	681.78	683.45	685.20	
10	685.60	686.61	687.66	688.80	690.20	692.72	
20	695.18	696.16	697.50	699.00	701.50	703.80	
50	702.97	704.36	705.95	708.18	710.00	712.80	

据冯家山水库多年蓄洪运用的经验,拟定在异重流抵达大坝后推迟 10 h 开闸排沙,使浑水界面淹没排沙洞到一定高程而不浪费上层清水。表 3 给出了冯家山水库在不同的淤积年限,如遇到不同频率的入库洪水时,由数学模型计算得到的坝前出现的最高浑水水位。它是判断城市生活用水水质及宝鸡二电厂工业用水水质好坏及是否引用的基本依据。

4 供水调度成果

4.1 调度方案

在未来运行过程中,主汛期 06-01~09-30 汛期限制水位仍保持为原设计的 707 m,10 月初至次年 5 月底限制水位不超过正常高水位 712 m。一方面不再增加下游城市、电厂及陇海铁路防洪负担,另外又尽可能地多拦蓄汛末 10 月份富余水量。经过数学模型逐月重复调度计算,确定农业灌溉限制最低水位为 694 m,预留 688.5~694 m 的 2 760 万 m³ 库容以提高城市、电厂的供水保证率。

4.2 调度成果

在计算得到的水库-库容基础上,利用 37 年实测入库径流量、设计灌溉用水量、城市和电厂供水量等约束条件逐月计算。按保证率概念,每年 12 个月只要出现 1 次农灌缺水,就认为该年灌溉供水遭受

破坏; 只要出现 1 次闸水位低于死水位(但用泵抽仍能满足取水), 就认为该年城市和电厂供水遭受破坏; 只要全年冯家山水库向羊毛湾水库供水小于 3 000 万 m³, 就认为向羊毛湾水库供水遭受破坏。表 4 为 2030 年水库的供水调度结果。

表 4 2030 年水库的供水调度结果

Table 4 Allocation of water supply in 2030 year

供水保证率/% Percentage of water supply			供水量/万 m ³ Water supply			农业灌溉/万 m ³ Agriculture irrigation			弃水量/万 m ³ Abandonment
城市电厂 City electric plant	农灌 Irrigation	羊毛湾 Yangmaowan reservoir	城市 City	电厂 Electric plant	羊毛湾 Yangmaowan reservoir	需水量 Water requirement	供水量 Water supply	缺水量 Shortage of water	
97.3	59.5	62.2	6 000	4 000	3 000	19 030	14 910	- 4 120	12 020

可见, 冯家山水库运行到 2030 年, 向宝鸡市和宝鸡第二发电厂的供水率仍达到 97.3%, 满足设计标准 97% 的要求; 农业灌溉供水保证率为 59.5%, 超过设计标准 50% 的要求; 向羊毛湾水库供水的保证率为 62.2%。

若不考虑各部门保证率概念, 单纯从供水绝对

量上讲, 37 年中农灌平均年缺水量 4 120 万 m³, 共计有 15 年缺水, 其中 1993 年缺水 20 000 万 m³, 另有 8 年年缺水达到 10 000 万 m³; 城市、电厂供水仅 1980 年动用了死库容, 但用泵抽仍能满足电厂需水量; 有 23 年供给羊毛湾水库水量超过 3 000 万 m³。

[参考文献]

[1] 冯家山水库管理局 冯家山水库向宝鸡第二发电厂供水可行性报告[R]. 1995
[2] 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
[3] 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
[4] 张瑞瑾 河流泥沙动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988
[5] 谢鉴衡 河流模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990
[6] 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
[7] 西北水利科学研究所, 清华大学水利系 水库泥沙[M]. 北京: 水利电力出版社, 1979

Allocation of water supply and analysis on routing
flood of Fenjiashan Reservoir

LIN Jin-song¹, JU Jiang², MA Yao-guang¹, ZHANG Yao-zhe¹

(1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, 712100, China;
2 Northwest Investigation Design and Reserch Institute, Xi'an 710083, China)

Abstract: This paper utilizes water and sediment data which collected from Qianyang hydrologic station from 1957- 1993 and the administrated model of Fengjiashan Reservoir, to construct a mathematic model of reservoir deposition. Based on the relations between level and capacity which obtained from mathematic model calculation, routing of flood between different frequency and different capacity was calculated, meanwhile allocation of supply water in 2030 year for different units was obtained. The concrete results are: the quantity of water supply to Baoji City is 60 millions m³; the quantity of water supply to electric plant is 40 millions m³, the percentage of water supply is 97.3%, satisfied the demand of the designed standard- 97%; average agriculture irrigation is 149.1 millions m³, percentage of water supply is 59.5%, surpassing designed standard - 50%, water supply to Yangmaowan reservoir is 30 millions m³, percentage of water supply is 62.2%.

Key words: Fenjiashan reservoir; mathematic model of reservoir deposition; allocation of supply water; analysis of flood routing