

# 小流域坝系相对稳定与布局优化规划模型研究

秦向阳<sup>1,2</sup>, 李占斌<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 黄河上中游管理局 西安黄河工程监理有限公司, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 坝系相对稳定与优化布局规划是当前小流域坝系建设研究的热点领域。在对坝系规划及坝系相对稳定研究和应用现状综述的基础上, 依据系统动力学的原理, 采用经验法、动态仿真法和非线性规划法建立了基于拦泥库容、滞洪库容、溢洪道流量优化设计的坝系布局优化模型和建坝时序优化模型, 编制了坝系规划计算机自动优化流程图, 并以陕北黄土丘陵区韭园沟小流域坝系优化为例, 对模型进行了实例验证, 取得了较好的应用效果, 对黄土高原丘陵沟壑区小流域坝系建设优化规划有借鉴和指导意义。

**关键词:** 小流域; 坝系相对稳定; 布局; 优化规划模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)06-0223-06

中图分类号: S157

## Relative Stability of Dam System and Its Layout Planning Optimization Model in Small Watershed

QIN Xiang-yang<sup>1,2</sup>, LI Zhan-bin<sup>1</sup>

(1. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an

University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. The Middle Reaches of the Yellow

River Authority, Xi'an Huanghe Construction Supervision Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China)

**Abstract:** Relative stability of dam system and its layout planning optimization are currently a hot area of the dam construction in small watershed. In this paper, the present situation of research and application about relative stability of dam system and its optimization design are reviewed at first. Optimization models of dam layout and construction timing are then established for the optimizations of intercepting sediment reservoir capacity, flood detention reservoir capacity, and design of spillway discharge by the principles of system dynamics, empirical method, dynamic simulation method, and non-linear programming method. Moreover, a computer flow chart of automatic optimization is presented. The optimization models of dam system are verified in Jiuyuangou watershed in the loess hilly area and desirable results are achieved. The study has a valuable reference for watershed dam construction in the similar areas of the loess hilly and gully area.

**Keywords:** small watershed; relative stability of dam system; layout; optimal planning model

20 世纪 60 年代, 人们受天然聚淤对洪水泥沙全拦全蓄、不满不溢现象的启发, 提出了淤地坝相对稳定的概念, 20 世纪 80 年代开始在坝系规划中引入非线性规划方法, 20 世纪 90 年代初又提出了以拦泥坝高和滞洪坝高为决策变量的双优化法, 并在坝系布局、建坝规模和建设时序等坝系的优化规划研究中取得了一定进展<sup>[1-11]</sup>。但这些研究均将坝系中各坝视为“闷葫芦”坝, 忽视了工程之间的水沙联系, 在某种程度上是忽视了坝系的本质。完善坝系优化规划研究, 必须将放水建筑物纳入研究范畴, 尤其是考虑溢洪道的投资和功能。就计算方法而言, 非线性规划尚

不十分成熟<sup>[9]</sup>, 尤其是在决策变量较多的情况下。因此, 在坝系优化规划中, 如果将不同规模淤地坝、以及溢洪道一并纳入数学模型加以研究, 势必使模型十分复杂难以求解。为解决这一问题, 应当重点考虑在坝系农业生产、防洪安全、调水调沙方面发挥主要作用的骨干坝和大中型淤地坝, 从而将复杂问题简单化, 保证主体工程优化规划的精度。同时为了克服非线性规划在坝系中小型淤地坝研究方面的局限性, 有必要尝试其它系统方法。利用系统动力学的原理将有助于解决这些问题, 并满足非线性关系的要求。因此, 有必要探讨利用系统动力学原理进行坝系优化规

划研究,建立坝系优化规划模型,以指导黄土高原小流域坝系建设。

## 1 坝系优化建模方法

非线性规划研究的重点是治沟骨干工程的布局、规模以及建坝顺序的规划方案(优化),是在仿真优化规划初步确定了坝系宏观规划布局及生产坝建设规模的基础上展开,它主要依赖优化仿真规划的几个规划指标:坝系骨干坝初步规划布局方案,生产坝的布局及规模等。

### 1.1 生产坝特性

生产坝坝高与库容、淤地面积、坝体土方量存在密切关系,关系式分别为:

$$V=825 \times \left(\frac{H}{2}\right)^{2.535} \quad (1)$$

$$S=330H^{1.55} \quad (2)$$

$$W=1.37H^{2.035}B^{0.838} \quad (3)$$

式中:  $H$ ——生产坝坝高(m);  $V$ ——库容( $m^3$ );  $S$ ——淤地面积( $m^2$ );  $W$ ——坝体土方( $m^3$ );  $B$ ——坝顶长(m)。

### 1.2 骨干坝特性

根据对所采集研究流域水文、地形、水土流失等自然和社会经济方面资料的整理,建立优化规划所必须的回归曲线和计算公式,如坝高一淤地面积、坝高一工程量概化曲线等。

1.2.1 坝体体积计算式 (1) 崖壁的概化曲线。以坝址断面最低点作为原点,建立直角坐标系,水平轴为  $x$ ,垂直轴为  $y$ 。坝址断面也可以原点为界分成左右两侧,根据坝址断面的测量资料即可建立概化曲线:

$$x=d+\psi^\varphi \quad (4)$$

式中:  $x$ ——概化曲线的  $x$  坐标(m);  $y$ ——概化曲线的  $y$  坐标(m);  $d$ ——最低点以左或以右的水平直线段长度(m);  $\psi^\varphi$ ——系数及指数,根据测量资料采用回归方法求出。

上面公式对左右崖壁各有一个,分别根据左右两岸的断面测量资料建立,使用时应注意区分。

(2) 坝体体积计算式。坝体总体积由左右两侧体积求和得出,计算公式:

$$W=Hd(b+mH)+\psi H^\varphi+1/(\varphi+1)\times [b+2mH/(\varphi+1)] \quad (5)$$

式中:  $W$ ——左侧坝体或右侧坝体的体积( $m^3$ );  $H$ ——坝体高度(m);  $b$ ——坝顶厚宽度(m);  $m$ ——坝体上下游边坡系数的平均值,即  $m=(m_1+m_2)/2$ ;  $m_1, m_2$ ——坝体上游和下游的平均边坡系数;  $y, j$ ——系数及指数。

如果坝址断面最低点处无水平直线段,则  $d=0$ ,  $W=\psi H^\varphi+1/(\varphi+1)\times [(b+2mH/(\varphi+1))]$ ; 如果坝址断面左右对称,上式计算的坝体体积就是坝体总体积的  $1/2$ ,乘 2 即得总体积;坝体体积再乘以单位坝体体积的费用,即得坝体的工程费。

1.2.2 溢洪道造价公式 根据理论分析,溢洪道造价公式与设计流量、溢洪道比降、溢洪道进出口的高差及滞洪水深 4 个因素有关,并具有如下的形式:

$$F_z=[\xi(Q/H_z^{1.5})^{5/3}+\zeta Q/H_L^{1.5}+\sigma(Q/H_z^{1.5})^{2/3}]L \quad (6)$$

式中:  $F_z$ ——溢洪道造价(元);  $Q$ ——溢洪道设计流量( $m^3/s$ );  $\xi, \zeta, \sigma$ ——系数,采用回归方法求出;  $H_z$ ——设计滞洪水深(m);  $H_L$ ——设计拦泥坝高(m);  $L$ ——溢洪道长度(斜长)(m);  $L=H_L/i$ ,此时  $H_L$  也可近似认为是溢洪道进出口的高差,  $i$ ——溢洪道比降。

根据研究流域坝系溢洪道统计资料,利用回归分析方法求出上式中的系数  $\xi, \zeta, \sigma$ ,再将各坝址处的  $Q, L, H_z, H_L$  代入上式,即可求出各坝址的溢洪道造价。

1.2.3 各坝建坝时间与实际淤积期的计算公式 如果一座坝的上游还存在拦蓄泥沙的坝,则拦沙量减少,淤积期就会延长,效益发挥时间也相应滞后,效益下降。一般将受上游坝影响而延长了的淤积期称作实际淤积期,不受任何上游坝影响的淤积期称作自然淤积期,实际淤积期与自然淤积期之差称作淤积延长期。淤积延长期的计算公式见表 1。

表 1 淤积延长期计算公式

	条件	公式
$y_d \leq y_u$	$y_d + t_d + \Delta t > y_u + t'_u$	$\Delta t = A_u/A_d \times t'_u$
	$y_d + t_d + \Delta t \leq y_u + t'_u$	$\Delta t = A_u/(A_d - A_u) \times (y_d + t_d - y_u)$
$y_d > y_u$	$y_d + t_d + \Delta t > y_u + t'_u$	$\Delta t = A_u/A_d (y_u + t'_u - y_d)$
	$y_d + t_d + \Delta t < y_u + t'_u$	$\Delta t = A_u/(A_d - A_u) \times t_d$

注:  $\Delta t$ ——下游坝的淤积延长期(a);  $y_u, y_d$ ——上、下游坝的建坝年;  $t_u, t_d$ ——上、下游坝的自然淤积期(a);  $t'_u$ ——上游坝的实际淤积期(a);  $A_u, A_d$ ——上、下游坝的控制面积,坝址以上的流域面积( $km^2$ )。

(1) 自然淤积期的计算。自然淤积期计算公式为:

$$t = \frac{\gamma V'}{kMA} \quad (7)$$

式中:  $t$ ——自然淤积期(a);  $V'$ ——拦泥库容( $10^4 m^3$ );  $\gamma$ ——淤泥干容重( $t/m^3$ );  $M$ ——多年平均侵蚀模数[( $t/km^2 \cdot a$ )];  $A$ ——计算坝址以上流域面积( $km^2$ );  $k$ ——泥沙拦蓄系数,由实测资料确定。

(2) 实际淤积期的计算。因上下游坝与坝之间有各种不同的影响关系,实际淤积期的计算比较复杂。假设同一条沟道中只有两座坝,上坝的实际淤积期  $t'_u$  就等于自然淤积期<sup>9</sup>。下游坝的淤积期根据上下游坝的关系分 3 种情况计算式,其中上坝的淤积期均为实际淤积期,下坝则为自然淤积期。

情况 1: 上坝比下坝先淤满,即:

$$y_u + t'_u \leq y_d + t_d, \Delta t = \frac{A_u}{A_d} L \quad (8)$$

情况 2: 下坝比上坝先淤满,即:

$$y_u + t'_u \geq y_d + t_d, \Delta t = \frac{A_u}{A_d - A_u} L \quad (9)$$

情况 3: 下坝比上坝先淤满,但下坝淤积期延长后变为下坝后淤满,即:

$$y_d + t_d \leq y_u + t'_u \leq y_d + t_d + \frac{A_u}{(A_d - A_u)} L, \Delta t = \frac{A_u}{A_d} t'_u \quad (10)$$

式中:  $y$ ——建坝年;  $t$ ——自然淤积期;  $t'$ ——实际淤积期;  $\Delta t$ ——淤积延长期;  $A$ ——控制面积;  $L$ ——上坝实际淤积期与下坝自然淤期重叠时段长; 下标  $u, d$  分别表示符号属于上游坝或下游坝。

计算时首先判断上、下游坝之间的关系属于情况 1 还是情况 2,按不同公式计算,再检查条件  $y_u + t'_u \geq y_d + t_d + \Delta t$  是否满足。若条件满足就结束计算,条件不满足时即属于情况 3,按公式(10)重新计算。

(3) 淤积期重叠段  $L$  的确定。如果一座坝受上游多座坝的影响,该坝的淤积延长期就应多次计算,再将计算所得的多个延长期相加才是总延长期。多次计算中应注意避免某一重叠时段的重复计算。假设有图 1 所示的 3 座坝,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 坝的实际淤积期已经求出,现计算 3<sup>#</sup> 坝的实际淤积期。由图 1 可见 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 坝淤积期的重叠时段是  $L_{23} + L_{13}$ , 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 坝的重叠时段是  $L_{23}$ , 计算 1<sup>#</sup> 坝对 3<sup>#</sup> 坝的影响时只以  $L_{13}$  作为重叠时段  $L$  代入计算式。计算 2<sup>#</sup> 坝对 3<sup>#</sup> 坝的影响时,则以  $L_{23}$  作为重叠时段  $L$  代入计算公式。两次计算的淤积延长期相加,就是 3<sup>#</sup> 坝在 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 两座坝影响之下的淤积延长期。

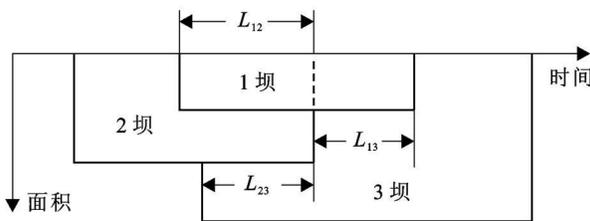


图 1 多坝淤积期的重叠

1.2.4 坝高与库容、坝土方、淤地面积的换算公式

(1) 由各坝库区测量资料可建立库容与坝高、坝土

方、淤地面积的换算公式为:

$$W = aH^b \quad (11)$$

$$V = cH^d \quad (12)$$

$$S = mH^n \quad (13)$$

式中:  $V$ ——库容 ( $10^4 \text{ m}^3$ );  $W$ ——坝土方 ( $10^4 \text{ m}^3$ );  $H$ ——坝高 (m);  $S$ ——分别为淤地面积 ( $\text{hm}^2$ );  $a, b, c, d, m, n$ ——系数及指数,根据小流实测资料,通过回归拟合分析求得。

(2) 坝地保收率随坝地面积的变化关系。假定保收率与坝地面积成正比关系,在淤积期内泥沙不断淤积,坝地面积不断增大,保收率也随之增加;当拦泥库容淤满之后,可近似认为坝地面积不再增加,保收率也近似为常数。保收率计算公式为:

$$R_j = R [(j-x)/t']^\eta \quad (x < j \leq x+t') \quad (14)$$

式中:  $j$ ——计算年 (a);  $R_j$ ——建坝后第  $j$  年的保收率;  $R$ ——拦泥库容淤满后的保收率,可由调查资料确定;  $x$ ——从计算期起始年起计算的建坝年 (a);  $t'$ ——实际淤积期 (a);  $\eta$ ——指数。

1.3 溢洪道泄洪流量及调洪计算

1.3.1 溢洪道泄洪流量计算 溢洪道流量是溢洪道工程费计算的核心。在计算各坝溢洪道最大流量时,必须考虑上游坝的下泄流量及一定时段内的下泄总水量,然后采用高切林公式计算本坝溢洪道的最大流量。此后就可由流量与工程费之间的回归方程计算溢洪道工程费。考虑溢洪道的坝系优化的原则及方法以及原有拦泥、滞洪库容双优化保持一致,仍然采用经济效益最大为目标函数,非线性规划方法为手段,通过优化得到最佳的拦泥、滞洪库容和溢洪道最大流量。溢洪道最大流量计算式可用半理论公式或经验公式:

(1) 半理论公式。溢洪道工程量(费)可写为:

$$W_y = [\xi \frac{Q}{H^{0.5}} + \zeta \frac{Q}{H^{1.5}} + \sigma H^n] L \quad (15)$$

式中:  $W_y$ ——溢洪道工程量(或工程费);  $Q$ ——溢洪道最大流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $H$ ——宽顶堰的全水头,如果溢洪道进口高度与拦泥面齐平,可近似取泥面以上的滞洪坝高 (m);  $L$ ——溢洪道长度 (m);  $\xi, \zeta, \sigma$ ——综合系数,可通过回归分析求出。可见,溢洪道工程量是最大流量及作用水头的复杂函数。按照以上公式,根据韭园沟小流域坝系现有溢洪道资料,求得溢洪道工程量回归方程为:

$$W_y = [0.54694 \frac{Q}{\sqrt{H}} - 0.41533 \frac{Q}{H^{1.5}} + 0.36668 H^n] L \quad (16)$$

(2) 纯经验公式。根据现有溢洪道的资料拟合

出经验公式:

$$W_y = (2.4224Q^{0.4316})L \quad (17)$$

式中符号与前文相同。该公式与半理论公式相比,符合实际资料的程度(相关系数、误差等)大体相当,但计算比较简单,所以在优化程序中采用。

1.3.2 坝系调洪计算 按照《水土保持治沟骨干工程暂行技术规范(SD175-86)》,上游有坝泄洪时,下游坝的溢洪道流量按下式计算:

$$Q = (q_p + q_u) \left(1 - \frac{V''}{W_p + W_u}\right) \quad (18)$$

式中:  $q_p$  —— 区间面积上频率为  $p$  的洪峰流量 ( $m^3/s$ );  $W_p$  —— 区间面积上频率为  $p$  的洪水总量 ( $10^4 m^3$ );  $q_u$  —— 相邻上游坝溢洪道最大流量 ( $m^3/s$ );  $W_u$  —— 在计算坝溢洪道流量达到最大值之前,相邻上游坝溢洪道下泄洪水总量 ( $10^4 m^3$ );  $V''$  —— 计算坝滞洪库容,是优化规划的决策变量之一 ( $10^4 m^3$ )。

公式(18)中,  $q_p$  和  $W_p$  是按水文条件确定的常数,  $V''$  是决策变量,所以计算溢洪道流量的关键在于计算  $q_u$  及  $W_u$ 。为此,必须完成 4 个步骤的工作:(1) 相邻上游坝的识别。(2) 计算相邻上游坝通过溢洪道下泄的流量  $q_u$ ,为计算简便,在相邻上游各坝中选溢洪道流量的最大值作为  $q_u$ 。(3) 计算本坝溢洪道从泄流开始到最大流量时的时段。(4) 求出该时段内各个相邻上游坝的泄流量,并求和,作为  $W_u$ 。

其中,最关键的问题是相邻上游坝的识别。计算坝的上游可能有多个相邻上游坝,需把相邻的上游坝挑选出来,以便进行下一步的计算。计算从上游向下游进行,计算最上游坝时,  $q_u$  及  $W_u$  均为零;计算第 2 座坝时,上游相邻坝就是最上游坝,第 2 座坝计算结束后,第一座坝的计算标记就被设置为“y”;计算第 3 座坝时,发现第 1 座坝的计算标记为“y”,就会不再作为上游坝考虑。计算开始前,所有坝的计算标记均设为“n”。

## 2 坝系优化规划模型建立

小流域坝系优化规划分 2 步进行:拦泥、滞洪库容、溢洪道综合优化和建筑顺序的优化。优化过程通过多次反复计算完成。

### 2.1 坝址综合优化模型

2.1.1 目标函数 按“工程费—收益”极小化为目标,编写优化的目标函数。当目标函数达极小值时,说明工程费极小而收益极大,相应的决策变量(各坝拦泥、滞洪库容)的取值就是最佳的。目标函数为:

$$f(x_i) = \sum_{i=1}^n \{d_v \alpha_i x_i^{\beta_i} + d_{yt} \delta [(q_{pi} + q_{ui}) (1 - \frac{x_{n+1}}{W_{pi} + W_{ui}})]^{\epsilon_i}\}$$

$$\times \{L_{yi} + d_{yq} (B_i + 2h_{ki}) L_{yi}\} - \sum_{i=1}^n T_s B R \varphi_i x_i^{\psi_i} \quad (19)$$

式中:  $f(x_i)$  —— 目标函数;  $n$  —— 坝系中坝址的个数;  $x_i$  —— 决策变量,标识第  $i$  号坝址的拦泥库容 ( $10^4 m^3$ ),  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $x_{n+1}$  —— 决策变量,表示第  $i$  号坝址的滞洪库容 ( $10^4 m^3$ ),  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $d_b, d_{yt}, d_{yq}$  —— 分别为坝体土方单价、溢洪道土方单价、溢洪道衬砌单价 (元/ $m^3$ );  $\alpha, \beta$  —— 第  $i$  号坝根据库容求坝体工程量的系数及指数;  $\delta, \epsilon$  —— 第  $i$  号坝根据溢洪道流量求溢洪道土方量的系数及指数;  $\varphi, \psi$  —— 第  $i$  号坝根据拦泥库容求坝地面积的系数及指数;  $q_{pi}$  —— 第  $i$  号坝区间面积上频率为  $p$  的洪峰流量 ( $m^3/s$ );  $W_{pi}$  —— 第  $i$  号坝区间面积上频率为  $p$  的洪水总量 ( $10^4 m^3$ );  $q_{ui}$  —— 第  $i$  号坝相邻上游坝溢洪道最大流量之和 ( $m^3/s$ );  $W_{ui}$  —— 第  $i$  号坝在计算坝溢洪道流量达到最大值之前,相邻上游坝溢洪道下泄洪水总量 ( $10^4 m^3$ );  $L_{yi}$  —— 第  $i$  号坝的溢洪道长度 (m);  $B_i, h_{ki}$  —— 第  $i$  号坝的溢洪道宽度及临界水深 (m);  $T_s$  —— 坝系计算期,取  $T_s=50$  a;  $B$  —— 坝地单位面积产值,  $B=7500$  元/ $hm^2$ ;  $R$  —— 坝地保收率,取值 0.8。

2.1.2 决策变量 坝系优化规划中需要优化的决策变量有:拦泥库容、滞洪库容、溢洪道最大流量。但是滞洪库容和溢洪道最大流量通过高切林公式相联系,存在函数关系。当其中一个被确定时,另一个也就随之确定了。所以,本研究中决策变量仍然采用拦泥库容和滞洪库容。为简化计算,可将坝地拦泥效益,蓄水效益等对优化结果影响不大的指标忽略不计,只考虑种植业的收入即可。同时,泄水工程是各坝都必须的,均忽略不计,不会影响各坝的相对优劣和优化结果,所以,为简化计算,不考虑泄水工程的费用。

2.1.3 约束条件 (1) 非负约束。各坝的库容不可能为负值,即:  $x_i \geq 0$ , ( $i=1, 2, \dots, 2n$ ),  $n$  为坝址数,每个坝址上的骨干坝有拦泥及滞洪库容,所以上式中  $i$  的最大值为  $2n$ 。

(2) 地形约束。地形限制了坝高的增长,最大坝高相应的库容就是地形限制的最大库容,各坝实际库容都应小于这个最大值,即:  $V_i - x_i - x_{n+1} \geq 0$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ; 式中:  $V_i$  —— 第  $i$  号坝址处的地形允许最大库容。

(3) 坝地面积约束。拦蓄泥沙本身就是生态效益之一,坝地面积又是经济效益的主要来源。为了满足一定的生态、经济效益,往往对坝地的最小面积加以约束。最小面积需考虑多方面因素确定,本研究主要考虑 3 个方面因素来确定:① 坝系相对稳定。只有坝地面积与相应的流域面积之比达到一定值时,才

可能实现坝系的相对稳定。根据优化仿真规划结果,当坝地面积与流域面积之比达到11~12时,是最佳淤地比,据此,确定骨干坝和生产坝淤地面积。②泥沙淤积厚度。坝地上每年都有泥沙的淤积,淤积的泥沙有利于作物的生长,但过厚则可能淹没农作物。一般以每年淤积泥沙不超过0.2 m为宜,故可根据流域侵蚀模数确定所要求最小坝地面积。③蓄水深度。如果不设溢洪道,洪水期间坝地上的蓄水深度可能过大,使农作物受淹。在陕西省北部的洪水期间,坝地上多种植高秆作物,所以坝地上的蓄水深度以不超过0.7 m,浸泡时间不超过3 d为宜。因为保收率为0.8,所以应能保证5年一遇的洪水积水深度不超过0.7 m,据此计算坝地面积。如果坝系普遍设置溢洪道,且溢洪道进口高度与坝地面齐平,蓄水深度一般可以得到保障时可不必再考虑。综合考虑上述各方面的要求,以及流域中众多生产坝的坝地面积,确定骨干坝的最小坝地面积为 $A_0$ ,则坝系总的坝地面积应满足:
$$\sum_{i=1}^n k_i \xi_i \lambda_i - A_0 \geq 0; k_i, \lambda_i \text{——系数及指数。}$$

(4) 滞洪库容约束。不设溢洪道时,滞洪库容必须不小于防洪频率下的洪水总量,即: $x'_i \geq W_{pi}$ , ( $i=1, 2, \dots, n$ ),  $x'_i$ ——第 $i$ 号坝的滞洪库容; $W_{pi}$ ——第 $i$ 号坝频率为 $p$ 的洪水总量。

设置溢洪道时,防洪频率下的洪水总量就作为已知参数,用来计算溢洪道最大流量,计算出的溢洪道

$$f(x_i) = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+q)^{x_i-1}} - BR \sum_{i=1}^n A_i \left\{ \frac{1}{\ln(1+q)} \left[ \frac{1}{(1+q)^{x_i+t'_i}} - \frac{1}{(1+q)^{T_s}} \right] + \frac{1}{t'^{2\beta_i}} \int_{x_i}^{x_i+t'_i} \frac{(j-x_i)^{2\beta_i}}{(1+q)^j} dj \right\} \quad (20)$$

式中: $f(x_i)$ ——目标函数(元); $x_i$ ——决策变量,即第 $i$ 号坝的建坝时间(a); $C_i$ ——第 $i$ 号坝的总工程费用(元); $q$ ——贴现率,取值0.04; $B$ ——单位坝地面积上的净产值(元/hm<sup>2</sup>); $R$ ——坝地保收率; $A_i$ ——第 $i$ 号坝的坝地面积(hm<sup>2</sup>); $T_s$ ——经济计算期(a); $t'_i$ ——第 $i$ 号坝的实际淤积期(a); $\beta_i$ ——第 $i$ 号坝坝地面积—库容回归方程( $S = \alpha V^\beta$ )中的指数; $j$ ——从基准年开始计算的年数(a)。

上式中除了建坝时间 $x_i$ 之外,实际淤积期 $t'_i$ 、坝地面积 $S_i$ 也会随着建坝时间 $x_i$ 的变化而变化(考虑到泥沙的淤积是渐进的,坝地面积的增长自然也随时间而增加,所以是本坝及上游坝建坝时间的函数),要根据 $x_i$ 的取值进行计算,最后代入目标函数中。

2.2.2 决策变量 建筑顺序及间隔时间优化中采用各坝的建坝时间为决策变量 $x_i$ 。得到最佳的建坝时间后,坝系的最佳建筑顺序及相隔时间也就得到了。

2.2.3 约束条件 (1) 非负约束。由于基准年选在坝系开始建设的年份,所以各坝的建坝时间不可能是

流量及相应的滞洪库容自然满足防洪要求,因而约束条件也可省略。

(5) 淤积时间约束。为了避免拦泥库容过大,淤积期过长,可以设置淤积期约束。本优化研究中这个限制是30 a,即: $A_i M_{xi} / \gamma - 30 \geq 0$ ,式中: $A_i$ ——坝址以上流域面积(控制面积),如果上游无坝,则产生的全部泥沙就会淤积在库容内; $M$ ——侵蚀模数(t/km<sup>2</sup>·a); $\gamma$ ——泥沙干容重,取 $\gamma = 1.3 \text{ t/m}^3$ 。

## 2.2 建坝顺序优化模型

淤地坝系中包含许多坝,受投资的限制,不可能一次同时建成。从第1座坝开始建设到最后一座坝建成,需要一定的间隔时间,这就提出了建设顺序及间隔时间问题。为了以更科学的方法研究坝系建设顺序及间隔时间问题,双优化之后还需要进行建设顺序及间隔时间的优化规划。优化规划中把各坝坝址及坝高等都作为已知的数据(由双优化确定),各坝建坝时间作为待优化的变量,坝系的经济效益最大作为目标函数,建立数学模型。由于建筑顺序及间隔时间问题与时间的关系极为密切,所以不能忽略货币的时间价值。本研究以坝系开始建设的年份为基准年,把各年的收益及费用都换算成基准年的限值,建立数学模型,即采用动态经济分析的方法建立数学模型。

2.2.1 目标函数 以总费用与总收益的现值之差作为目标函数。

负值,即: $x_i \geq 0$ 。

(2) 淤满时间约束。坝系中任何一座坝的拦泥库容的淤满时间都不得大于经济计算期结束的年份,也就是全坝系必须在经济计算期内淤满。这个约束条件的目的是保证坝系在经济计算期内就能发挥正常的经济效益,使优化规划得到正确的结果,即:

$$T_s - x_i + T_s(j)_i \geq 0$$

式中: $T_s$ ——坝系的经济计算期(a)。对于坝系建筑顺序问题而言,可以认为50 a的经济计算期已经足够,50 a以后发生的费用换算成坝系开始建设年的现值已十分微小,对优化结果的影响可以忽略不计。 $T_s(j)_i$ 为第 $i$ 号坝的实际淤积期(a)。实际淤积计算是建坝顺序优化中十分关键的一步,过程也比较复杂。

## 3 坝系优化模型应用

### 3.1 拦泥、滞洪库容及溢洪道流量综合优化

经过现场勘察,在陕北丘陵区韭园小沟流域内初选了21座坝址,以此坝址为基础进行优化。首先,采用100年一遇洪水对韭园沟流域进行了坝系优化规

划。第一轮优化结果, 拦泥库容小于  $1.00 \times 10^5 \text{ m}^3$  坝有 10 座, 其中有 7 座坝的拦泥库容接近于零, 经济效益不好。但是考虑到骨干坝的合理布局, 仅决定淘汰吴家沟 2 号、范家山、下桥沟 3 号 3 座坝。对剩余

的 18 座坝再进行下一轮的优化, 依次选用  $P=10\%$ ,  $5\%$ ,  $3.3\%$ ,  $2\%$ ,  $1\%$ ,  $0.5\%$ ,  $0.33\%$ ,  $0.2\%$ , 分别进行优化计算。因篇幅所限, 现仅以  $P=1\%$  为例, 其优化结果见表 2。

表 2 韭园沟骨干坝系拦泥、滞洪、溢洪道最大流量优化结果( $P=1\%$ )

坝名	控制面积/ $\text{km}^2$	拦泥库容/ $10^4 \text{ m}^3$	滞洪库容/ $10^4 \text{ m}^3$	溢洪道流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	坝地面积/ $10^4 \text{ m}^2$	换算总坝高/ m	坝名	控制面积/ $\text{km}^2$	拦泥库容/ $10^4 \text{ m}^3$	滞洪库容/ $10^4 \text{ m}^3$	溢洪道流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	坝地面积/ $10^4 \text{ m}^2$	换算总坝高/ m
雒家沟 1 号	3.05	33.37	15.58	0	5.07	19.23	马连沟 2 号	6.58	30.31	15.02	0	3.06	25.71
二郎盆 1 号	7.93	16.59	20.08	3.81	2.29	22.16	蒲家峡大坝	6.16	103.67	25.90	1.21	13.90	32.17
折家沟 1 号	1.55	25.15	7.82	0	4.33	15.95	林硷村前坝	11.67	29.47	23.56	0	4.75	19.15
龙王庙	6.08	49.01	26.96	0	6.28	33.97	马家沟 2 号	1.67	24.40	7.36	0	4.32	14.08
何家沟 3 号	1.61	26.98	5.83	10.62	4.51	17.14	三角坪老坝	17.16	116.10	14.38	30.92	12.72	31.92
王茂沟 2 号	2.97	48.69	11.89	4.86	6.44	24.43	三角坪新坝	26.60	49.35	17.01	42.25	6.70	17.93
王茂沟 1 号	5.87	81.22	12.62	4.80	7.24	32.77	马连沟大坝	40.30	48.21	27.50	76.21	6.81	21.56
西堰沟村前	3.87	58.69	17.50	0	7.47	18.06	刘家坪新坝	61.62	92.07	11.25	98.89	12.47	22.28
龙王庙大坝	3.25	6.52	14.52	0	1.16	22.11	韭园沟大坝	70.24	129.62	31.16	121.57	17.00	28.31

### 3.2 建坝顺序的优化

采用 50 a 的经济计算期。约束条件除了非负约束外, 主要就是淤满年(建坝年加实际淤积期)必须小于 50。其它内容如前文所述, 所得优化结果如图 2 所示, 图中竖条下端的竖坐标表示建坝年, 上端竖坐标表示淤满年, 竖条长度表示实际淤积期。优化结果表明, 须最先建设的是王茂沟 2 号、西堰沟村前、蒲家峡大坝、三角坪新坝, 最后兴建是王茂沟 1 号(第 21 a)。

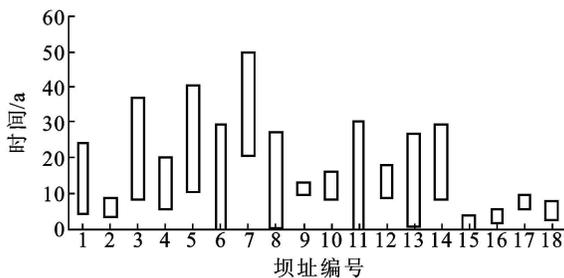


图 2 建坝时间及淤积期示意图

## 4 结论

(1) 依据系统动力学的原理, 采用经验法、动态仿真法和非线性规划法建立了基于拦泥库容、滞洪库容、溢洪道流量优化设计的坝系布局优化模型和建坝时序优化模型, 编制了计算机自动优化流程, 并在韭园沟小流域坝系优化中应用取得较好效果, 优化结果基本符合实际情况, 表明所建立优化模型具有实用性。

(2) 本研究是根据黄土高原韭园沟小流域实际

情况进行的理论研究, 因而研究结果难免存在局限性, 模型的普遍适用性还有待进一步实践检验和验证。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 常茂德, 郑新民, 柏跃勤, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域坝系相对稳定及水土资源开发利用研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2007.
- [2] 史学建, 付明胜, 左仲国. 小流域坝系相对稳定研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009.
- [3] 秦向阳, 郑新民. 小流域治沟骨干坝系优化规划模型研究[J]. 中国水土保持, 1994(1): 18-22.
- [4] 肖培青, 姚文艺, 史学建. 淤地坝建设回顾及其物理比尺模型研究展望[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 316-319.
- [5] 李靖, 秦向阳, 柳林旺. 国内小流域综合治理规划方法刍议[J]. 水土保持通报, 1995, 15(3): 8-11.
- [6] 段喜明, 王治国. 小流域淤地坝坝系分布设计方案的优化研究[J]. 山西农业大学学报, 1999, 19(4): 326-332.
- [7] 武永昌. 变区间线性化方法及淤地坝系库容、建坝时序的同步优化[J]. 水土保持学报, 1994, 8(4): 60-66.
- [8] 武永昌, 崔云鹏, 梁文辉. 淤地坝系拦泥、滞洪坝高的双优化[J]. 水土保持学报, 1991, 22(1): 19-26.
- [9] 武永昌, 黄林. 骨干坝系最佳建筑时间的存在条件及实际淤积期的计算[J]. 中国水土保持, 1995(6): 21-24.
- [10] 朱小勇, 雷元静, 刘立斌. 坝系相对稳定几个重要问题地认识[J]. 中国水土保持, 1997(7): 53-56.
- [11] 李智录, 万临生, 严秉良, 等. 小流域治沟骨干工程坝系优化的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(4): 45-52.