

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.06.007

基于加速微种群遗传算法的拱坝体形优化设计

孙林松¹ 张伟华² 郭兴文³

(1.扬州大学水利科学与工程学院 ,江苏 扬州 225009 ;2.海门市水利局堤防管理所 ,江苏 海门 226100 ;
3.河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :以型值点坐标、拱端厚度和半中心角为体形参数构造三次样条线型拱圈 ,给出了三次样条线型拱坝体形优化设计模型.采用加速微种群遗传算法求解拱坝优化设计问题 ,对约束条件根据复杂程度采用不同的处理方法 ,即相对简单的几何约束采用直接检验法 ,对较复杂的性态约束采用罚函数法处理.以某拟建拱坝的安全性优化设计为例进行了计算 ,结果表明优化设计的坝体最大主拉应力比初始设计减小了 42% ,显示了加速微种群遗传算法的有效性与可行性.

关键词 :加速微种群遗传算法 ;三次样条 ;拱坝体形 ;优化设计

中图分类号 :TV642.4 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2008)06-0758-05

拱坝是水利水电工程中的常用坝型之一 ,以体形优美著称.拱坝体形优化设计始于 20 世纪 60 年代 ,我国从 20 世纪 70 年代后期开始进行这方面的研究 ,经过近 40 年的工作 ,在拱坝体形优化设计方面的研究已处于国际领先地位.拱坝体形优化设计模型最终归结为非线性规划问题 ,对它的求解 ,传统的有复合形法^[1-3]、广义简约梯度法^[4]、序列二次规划法^[5]等.随着人工智能方面研究的深入 ,以遗传算法^[6]、人工神经网络^[7]等为代表的现代优化方法在拱坝体形优化中也逐步等到应用.人工神经网络方法用于网络训练的前期工作量太大 ,而常规的遗传算法由于采用的种群规模较大 ,在拱坝体形优化设计中所需的结构重分析次数很多 ,计算效率有待提高.为了改善常规遗传算法性能、提高计算效率 ,文献[8]提出了一种微种群遗传算法 ,该算法采用很小的种群规模 ,按照常规遗传算法的操作 ,经过几代进化后种群收敛 ,然后随机生成新的种群并在其中保留前面收敛后的最优个体 ,重新进行遗传操作.与常规遗传算法相比 ,微种群遗传算法可以避免早熟收敛并且能够较快地收敛到最优解.在此基础上 ,笔者在文献[9]中提出了一种加速微种群遗传算法 ,进一步提高了计算效率 ,在结构优化设计中 ,该算法所需结构重分析次数远小于传统遗传算法^[10].本文结合三次样条线型拱坝介绍其在拱坝体形优化中的应用.

1 三次样条线型拱坝及其体形优化模型

1.1 三次样条线型拱圈的构造

拱坝体形主要通过拱冠梁剖面 and 拱圈形状描述 ,拱冠梁剖面通常用拱冠上游面曲线和拱冠厚度表示 ,一般假设沿高度按三次曲线变化 ,拱坝水平拱圈可通过拱轴线与拱圈厚度描述 ,不同的拱轴线形式对应着不同的拱圈线型.文献[10]中提出了以型值点坐标和半中心角构造三次样条拱轴线方程的方法.

以图 1 所示右侧拱圈为例 ,设拱轴线上有 $n + 1$ 个节点(型值点) $P_0 , P_1 , \dots , P_n$,其横坐标 $x_0 = 0 , x_1 , x_2 , \dots , x_n = X_R$ 平分区间 $[0 , X_R]$ 纵坐标依次为 $y_0 = y_c , y_1 , y_2 , \dots , y_{n-1} , y_n$.设 $y(x)$ 为通过拱圈轴线上所有样点的三次样条插值函数 ,则 $y(x)$ 在小区间 $[x_{i-1} , x_i]$ $[i = 1 , 2 , \dots , n]$ 上的表达式为

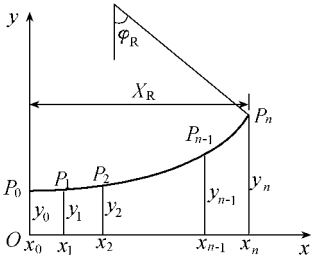


图 1 三次样条拱轴线
Fig.1 Cubic spline arch axis

$$y_i(x) = \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} M_{i-1} + \frac{n(x - x_{i-1})^3}{6h_i} M_i + \left(y_{i-1} - \frac{M_{i-1} h_i^2}{6} \right) \frac{x_i - x}{h_i} + \left(y_i - \frac{M_i h_i^2}{6} \right) \frac{x - x_{i-1}}{h_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{1}$$

式中： $h_i = x_i - x_{i-1} = \frac{1}{n} X_R$ ($i = 1, 2, \dots, n$)； M_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) 由式 (2) 确定。

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & & & & \\ \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{2} & & & \\ & \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{2} & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{2} \\ & & & & \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{2} \\ & & & & & 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_{n-2} \\ M_{n-1} \\ M_n \end{bmatrix} = \frac{3n^2}{X_R^2} \begin{bmatrix} 2(y_1 - y_0) \\ y_2 - 2y_1 + y_0 \\ y_3 - 2y_2 + y_1 \\ \vdots \\ y_{n-1} - 2y_{n-2} + y_{n-3} \\ y_n - 2y_{n-1} + y_{n-2} \\ 2\left(\frac{X_R}{n} \tan \varphi_R - y_n + y_{n-1}\right) \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中 φ_R 为拱圈右半中心角，式 (2) 三对角方程可用追赶法求解。

所以，只要已知 $n + 1$ 个节点的坐标 (x_i, y_i) ($i = 0, 1, \dots, n$) 以及半中心角 φ_R ，代入式 (2) 求出 M_i 后，就可得到用式 (1) 表示的三次样条拱轴线方程。

拱圈厚度仍按通常处理方法，假设其随拱轴线弧长 s 或中心角 φ 变化，详见文献 [10]，这里不再赘述。
总之，只要已知拱冠厚度 T_c 、拱端厚度 T_R 、右半中心角 φ_R 以及 $n + 1$ 个节点坐标就可完成右侧三次样条线型拱圈的构造，这里 n 一般可取 1~3，可类似地构造左侧拱圈。

1.2 三次样条线型拱坝体形优化设计模型

拱坝体形优化设计一般是一个非线性规划问题，其数学模型可表示为

$$\begin{cases} \text{find } X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T \\ \text{min } f(X) \\ \text{s.t. } g_j(X) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, p) \end{cases} \tag{3}$$

式中： $f(X)$ ——目标函数； X_i ($i = 1, 2, \dots, n$)——设计变量； $g_j(X)$ ——不等式约束函数。

拱坝体形优化中的设计变量首先要能确定拱坝的几何形状，同时还应便于设计人员进行直观判断，可分为确定拱冠梁的体形参数和确定水平拱圈的体形参数 2 部分。拱冠梁体形一般采用三次多项式描述，可取 4 个控制高程处的拱冠梁上游坐标和厚度为设计变量，要确定水平拱圈的体形，不失一般性，假设将某拱圈一侧弦长 n 等分，则三次样条线型拱圈体形可由 $n + 1$ 个等分点的型值坐标 $(y_0, y_1, \dots, y_n)$ 、半中心角以及拱冠厚度与拱端厚度确定，其中 y_0 和拱冠厚度可由拱冠梁体形确定，所以各拱圈的设计变量为 $y_1, \dots, y_n$ 和半中心角以及拱端厚度。

约束条件可分为几何约束和性态约束 2 类。几何约束一般包括设计变量的界限约束、倒悬度约束和保凸约束等，性态约束则反映了对坝体应力水平、稳定性等性能指标的要求。

拱坝体形优化目标通常包括经济性和安全性 2 类，本文考虑的是安全性目标，取坝体有限元计算最大主拉应力为目标函数。

2 加速微种群遗传算法及其在拱坝体形优化设计中的应用

2.1 加速微种群遗传算法

微种群遗传算法与常规遗传算法的主要区别在于前者采用很小的种群规模（一般为 5），当种群进化收敛后，保留最优个体随机生成新的种群重新启动遗传进化过程。加速微种群遗传算法在微种群遗传算法基础上用 Aitken Δ^2 加速策略改进当前种群，用基于模式移动的局部寻优方法改进当前子代群体。具体步骤如下^[9]：

a. 运算过程初始化,主要包括 (a)选择种群规模 N_{popsize} 、交叉概率 p_c 以及局部寻优参数 α 、 β 和 γ ; (b)置进化代数 $i_g = 1$ 、加速指标 $i_a = 1$ (c)随机生成初始种群 $P(i_g)$ (d)对各个体按适应值进行评价,选择最优个体置为 $k(i_a)$ 。

b. 检查终止准则,如满足,优化结束;否则,选择最优个体并检查是否等于 $k(i_a)$,如不等,则置最优个体为 $k(i_a + 1)$, $i_a = i_a + 1$ 。

c. 检查是否满足 $i_a = 3$,如满足,则进行如下操作 (a)进行 Aitken Δ^2 加速, $b_m = b_1 - \frac{(b_2 - b_1)^2}{b_3 - 2b_2 + b_1}$,生成新个体 b_m ,并令 $k(1) = k(3)$, $i_a = 1$ (b)检查 b_m 是否优于当前种群 $P(i_g)$ 中的最差个体,如优于,则用 b_m 取代最差个体。

d. 利用选择、交叉、最优个体保留等遗传操作生成子代 $\alpha(i_g)$ 。

e. 利用基于模式移动的局部寻优方法对 $\alpha(i_g)$ 进行改进,主要包括 (a)选择当前子代中的最优个体 c_1 和次优个体 c_2 ,构造移动模式 $d = c_1 - c_2$ (b)生成 3 个新的个体 $c'_1 = c_1 + \alpha d$, $c'_2 = c_2 + \beta d$ 和 $c'_3 = c_2 - \gamma d$,这里 α 、 β 和 γ 为 3 个控制参数,可分别取 0.3、0.5 和 0.3 (c)在 3 个新个体中选择最优个体 c_m ,使 $f(c_m) = \max\{f(c'_1), f(c'_2), f(c'_3)\}$, $c_m \in \{c'_1, c'_2, c'_3\}$ (d)如 c_m 优于当前子代中的最差个体,则用 c_m 代替该最差个体。

f. 检查 $\alpha(i_g)$ 是否收敛,如是,则利用重启方法生成新的 $\alpha(i_g)$ 。

g. 令 $P(i_g + 1) = \alpha(i_g)$,置 $i_g = i_g + 1$,返回 b。

2.2 在拱坝体形优化设计中的应用

遗传算法在具体实施时需要解决设计变量编码、适应值函数、遗传操作以及约束条件处理等关键问题。本文采用实数编码方案,微种群遗传算法中遗传操作主要包括选择、杂交 2 种,本文采用竞争选择策略选择个体产生下一代种群,同时采用最优个体保存策略保证最优个体基因得以延续;采用算术杂交,即由 2 个个体的线性组合产生出 2 个新的个体。假设在 2 个个体 $X_A^{(t)}$ 、 $X_B^{(t)}$ 之间进行算术交叉,则交叉运算后所产生的 2 个新个体为

$$\begin{cases} X_A^{(t+1)} = \alpha X_B^{(t)} + (1 - \alpha) X_A^{(t)} \\ X_B^{(t+1)} = \alpha X_A^{(t)} + (1 - \alpha) X_B^{(t)} \end{cases} \quad (4)$$

式中 α 为 0 到 1 之间的随机数。

考虑到拱坝体形优化设计中两类约束条件计算复杂性的差别,本文分别采用不同的处理方法:对计算相对简单的几何约束采用直接检验法,若某个体不满足几何约束,则舍弃该个体重新生成新的个体;对计算复杂的性态约束采用罚函数法处理,即对目标函数做如下修改:

$$f'(X) = f(X) + p \sum_{j=1}^{N_{CB}} \max(0, g_j(X)) \quad (5)$$

式中: $f(X)$ 、 $f'(X)$ ——修改前后的目标函数; p ——罚参数; N_{CB} ——性态约束数。

适应值是评价个体优劣的指标,适应值越大,个体越优秀。由于拱坝体形优化是求最小值问题,其适应值函数可取为

$$E(X) = C - f'(X) \quad (6)$$

其中 C 为一足够大的常数。

3 工程算例

某拟建拱坝高 277 m,坝顶高程 827.0 m,正常蓄水位 820.0 m,初始设计方案采用抛物线体形,体形参数由设计部门基于拱梁分载法进行优化后提供。计算荷载组合为“正常蓄水位 + 相应下游水位 + 淤沙压力 + 自重 + 温降”。

本文在优化过程中取 4 个控制高程处的拱冠梁和拱圈体形参数为设计变量,并假设各拱圈左、右侧节点数目均取 2 个,其中,左、右侧拱圈在拱冠处的节点重合。各设计变量的取值范围及初始设计取值见表 1。

表 1 设计变量取值范围及初始设计体形取值
Table 1 Ranges and initial values of design variables

高程/m	拱冠梁参数				左侧拱圈参数						右侧拱圈参数					
	上游面坐标/m		厚度/m		拱端厚度/m		轴线拱端坐标/m		半中心角/(°)		拱端厚度/m		轴线拱端坐标/m		半中心角/(°)	
	初始设计	取值范围	初始设计	取值范围	初始设计	取值范围	初始设计	取值范围	初始设计	取值范围	初始设计	取值范围	初始设计	取值范围	初始设计	取值范围
827.0			14.000	10.0~20.0	19.035	10.0~25.0	201.933	150.0~250.0	46.891	40.0~55.0	19.000	10.0~25.0	138.190	90.0~190.0	45.073	40.0~55.0
740.0	-32.563	-40.0~-20.0	41.510	30.0~50.0	42.822	30.0~60.0	152.333	100.0~200.0	47.876	40.0~55.0	55.000	30.0~60.0	114.683	60.0~160.0	46.746	40.0~55.0
640.0	-48.000	-60.0~-40.0	58.677	50.0~70.0	70.442	60.0~85.0	91.851	50.0~150.0	46.396	35.0~50.0	78.787	60.0~85.0	88.167	50.0~130.0	47.060	35.0~50.0
550.0	-37.816	-50.0~-30.0	70.000	60.0~80.0	73.834	60.0~85.0	5.836	-10.0~40.0	18.500	10.0~30.0	74.435	60.0~85.0	5.851	-10.0~40.0	18.500	10.0~30.0

结构分析方法采用有限单元法,坝体沿高度方向分 12 层单元,沿厚度方向分 4 层单元.在优化过程中应力约束采用有限元等效应力控制,根据混凝土拱坝设计规范^[1]要求,等效主拉应力不超过 1.5 MPa,等效主压应力的安全系数为 4.0,该拱坝采用 C40 混凝土,则等效主压应力不超过 10.0 MPa.其他主要约束条件包括最大中心角 $\varphi \leq 100^\circ$,上游倒悬度 $K_u \leq 0.30$,下游倒悬度 $K_d \leq 0.25$.

加速微种群遗传算法优化过程如图 2 和图 3 所示.优化结果见表 2,表 3 对比了优化设计方案与初始设计方案的主要性能指标,可以看出初始设计方案不满足有限元等效应力约束,而优化设计方案满足所有约束条件,与初始设计相比,优化设计方案的坝体体积基本上没有变化,最大主压应力与初始设计也基本相同,而最大主拉应力减小了 1.82 MPa,达 42%,优化效果明显.另外,优化方案的拱圈中心角也比初始体形有所减小,这有利于拱推力指向坝肩山体内部,从而提高坝肩稳定性.

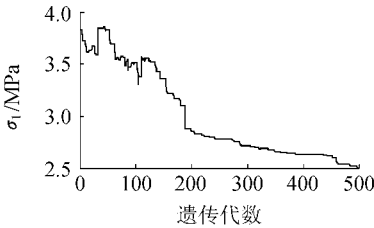


图 2 目标函数迭代过程

Fig.2 Iteration process of objective function

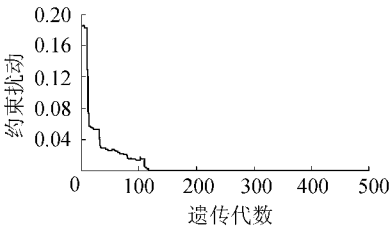


图 3 最优点约束迭代过程

Fig.3 Iteration process of constraints at optimum points

表 2 优化设计方案拱坝体形参数
Table 2 Shape parameters of optimum design for arch dams

高程/m	拱冠梁参数			左侧拱圈参数			右侧拱圈参数		
	上游面坐标/m	厚度/m	拱端厚度/m	轴线拱端坐标/m	半中心角/(°)	拱端厚度/m	轴线拱端坐标/m	半中心角/(°)	
827.0		15.171	23.835	198.740	43.152	16.012	151.930	43.054	
740.0	-35.059	40.767	43.225	151.320	41.010	45.807	146.200	48.804	
640.0	-53.851	58.371	81.082	67.594	41.142	76.335	84.856	42.798	
550.0	-42.963	79.974	81.551	2.704	11.525	80.586	6.220	20.646	

表 3 初始设计与优化设计主要性能指标对比
Table 3 Comparison of performance indices between initial design and optimum design

设计方案	体积/10 ⁴ m ³	最大主拉应力/Pa	最大主压应力/MPa	最大等效主拉应力/MPa	最大等效主压应力/MPa	最大顺河向位移/cm	最大中心角/(°)	上游倒悬度	下游倒悬度
初始设计	692.4	4.33	-14.82	2.36	-10.42	10.34	94.62	0.254	0.048
优化设计	698.0	2.51	-14.90	0.69	-9.93	9.53	89.81	0.290	0.069

4 结 语

本文结合三次样条线型拱坝体形优化设计,讨论了加速微种群遗传算法的具体实施方法.以某拟建拱坝

为例,考虑以坝体最大主拉应力最小为优化目标的安全性优化模型,计算结果表明,优化方案的坝体最大主拉应力比初始设计减小了 1.82 MPa,达 42%,效果明显,表明了加速微种群遗传算法在拱坝体形优化设计中的可行性与有效性。

参考文献:

- [1] 孙林松,王德信,孙文俊.考虑开裂深度约束的拱坝体形优化设计[J].水利学报,1998(10):18-23.
- [2] 孙林松,王德信,裴开国.以应力为目标的拱坝体型优化设计[J].河海大学学报:自然科学版,2000,28(1):57-60.
- [3] 孙文俊,孙林松,王德信,等.拱坝体形两目标优化设计[J].河海大学学报:自然科学版,2000,28(3):57-60.
- [4] 张秀丽,汪树玉.拱坝优化及 GRG 法的应用[J].水力发电学报,1989(3):20-33.
- [5] 杨仲侯,杨海霞,任青文.高拱坝应力分析与形状优化设计程序系统[G]//姜弘道,赵光恒,向大润,等.水工结构工程与岩土工程的现代计算方法与程序.南京:河海大学出版社,1992:160-173.
- [6] 杨海霞.基于遗传算法的拱坝优化设计[J].水利水运科学研究,2000(3):13-16.
- [7] 徐明毅,陈胜宏,张勇传.基于人工神经网络的拱坝混合优化方法[J].湖北水力发电,2004(1):18-21.
- [8] KRISHNAKUMAR K. Micro-genetic algorithms for stationary and on-stationary function optimization[J]. SPIE Intelligent Control and Adaptive Systems,1989,1196:289-296.
- [9] SUN Lin-song, ZHANG Wei-hua. An accelerated micro genetic algorithm for numerical optimization[J]. Lecture Notes in Computer Science,2006,4247:277-283.
- [10] 张伟华.基于 APDL 的三次样条线型拱坝体形优化设计研究[D].扬州:扬州大学,2007.
- [11] SL282—2003,混凝土拱坝设计规范[S].

Shape optimization of arch dams based on accelerated micro genetic algorithm

SUN Lin-song¹, ZHANG Wei-hua², GUO Xing-wen³

(1. College of Hydraulic Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Dike Management Office, Bureau of Water Conservancy of Haimen City, Haimen 226100, China;

3. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The coordination of nodes, the thickness at arch end and the semi-center angle were taken as the shape parameters for the establishment of a cubic spline arch, and an optimization model was established for the shape design of arch dams by use of the cubic spline arch. An accelerated micro-genetic algorithm was proposed for the numerical solution of the optimization of arch dams. For various constraints, different methods were employed according to their complexity, i. e., the geometrical constraints were treated by the checking-reject method, and the performance constraints were treated by the penalty function method. The optimization of an arch dam was taken as an example with the objective to minimize the maximum tensile principal stress. The results show that the maximum tensile principal stress is decreased by 42%, indicating the effectiveness and the feasibility of the accelerated micro-genetic algorithm for the shape optimization of arch dams.

Key words: accelerated micro-genetic algorithm; cubic spline; shape of arch dam; optimum design