

进化策略在重力坝优化设计中的应用

孙林松¹, 王德信¹, 许世刚²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 结合重力坝断面优化设计的数学模型, 讨论了进化策略的实施步骤. 实例计算表明, 进化策略所得结果近似全局最优解, 用于重力坝断面优化设计简单有效, 得到的优化方案经济、合理、可靠.

关键词 进化策略; 重力坝; 优化设计

中图分类号 :TV642.3 ;TB141.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2000)04-0104-03

随着生命科学与计算技术的发展, 两者正在不断地相互渗透. 进化策略就是模拟生物进化过程提出的一种随机优化方法, 它有一定的概率求得全局最优解. 目前, 该方法的研究从理论到应用方面都取得了一些成果, 显示出非常广泛的应用前景. 本文以重力坝断面优化设计为例, 对进化策略在坝工设计中的应用进行了探讨.

1 进化策略的基本思想^[1]

生物进化论认为生物的进化过程是一个由简单到复杂、由低级到高级的进化过程. 在这一过程中, 物种主要通过选择、变异等作用, 依照“物竞天择、适者生存”的原则竞争演化.

进化策略是通过模拟生物的进化过程来求解优化问题, 它将优化问题的解空间视为若干种群, 让种群模拟进化过程不断进化, 直至满足终止准则. 其基本步骤如下:

- a. 构造个体的适应函数 $S(x)$, 函数值表示可行解的适应性.
- b. 随机选取个体 $x_i \in R^n, i = 1, 2, \dots, N$, 构成初始种群.
- c. 父本 x_i 的相应分量 x_{ij} 按下式产生后代 x'_{ij} :

$$x'_{ij} = x_{ij} + N(0, \sigma)$$

式中: x'_{ij} —— x'_i 的分量, $N(0, \sigma)$ ——均值为零、方差为 σ 的正态随机变量.

- d. 比较 $S(x)$ 与 $S(x')$, 依照竞争原则, 从 $2N$ 个个体中选择 N 个适应性好的个体进入下一代.
- e. 终止判断. 若不满足终止准则, 返回 c 步骤.

2 重力坝断面优化的进化策略

2.1 重力坝断面优化设计的数学模型

重力坝断面优化的模型包括设计变量、目标函数和约束条件三个方面.

2.1.1 设计变量与目标函数

重力坝基本断面如图 1 所示. 其中坝高 H 、坝顶宽度 B 等一般为不变常数, 因此, 设计变量可取断面的其它相关尺寸 x_1, x_2, x_3 (见图 1).

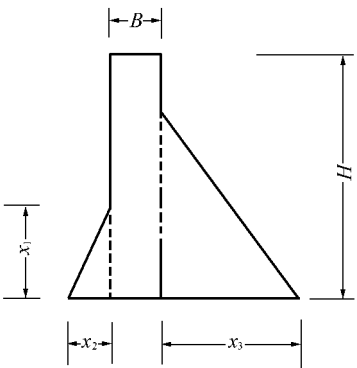


图 1 重力坝断面示意图

Fig.1 Cross section of a gravity dam

目标函数可取单位长度的坝体方量 $W(X)$ 。

2.1.2 约束条件

2.1.2.1 几何约束

- a. 上游坝坡约束 $0 \leq n \leq 0.2$ 。
- b. 下游坝坡约束 $0.5 \leq m \leq 0.9$ 。

2.1.2.2 性能约束

- a. 稳定约束 $[K \geq [K] \text{ 或 } K' \geq [K']]$ 。其中 K 和 K' 分别为按抗剪强度和抗剪断强度公式计算的稳定安全系数。具体算式见文献 [2]。
- b. 应力约束 $[\sigma_y^U \leq [\sigma^{\text{拉}}] \text{ 及 } \sigma_y^D \leq [\sigma^{\text{压}}]]$ 。其中 σ_y^U 和 σ_y^D 分别为上、下游面的垂直正应力,可按文献 [2] 中附录三用材料力学方法计算。

综上所述,重力坝断面优化设计的数学模型可表示为

$$\begin{aligned} &X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T \\ &\min W(X) \\ &\text{s.t. } g_j^L \leq g_j(X) \leq g_j^U \quad (j = 1, 2, \dots, M) \end{aligned}$$

(1)

式中 $g_j(X)$ ——约束条件, g_j^U, g_j^L ——相应约束的上、下限, M ——约束数。

2.2 进化策略的实施

进化策略只需要函数的适应值信息,无需梯度等其它信息。这里将它与罚函数相结合,把式 (1) 转化为无约束优化问题:

$$\min F(X) = \min(W(X) + P(X, \rho))$$

(2)

其中 $P(X, \rho) = \rho \sum G_j(X); G_j(X) = \max(0, g_j^L - g_j(X), g_j(X) - g_j^U), j = 1, 2, \dots, M; \rho$ 为罚因子。

重力坝断面优化的进化策略如下:

- 步 1 输入初始种群规模 N , 进化代数 $k_{\max}$, 初始罚因子 ρ , 置 $k = 0$;
- 步 2 随机产生 N 个初始父本 $X_1, X_2, \dots, X_N$, 设定方差向量 σ 的初值为 $[1, 1, 1]^T$;
- 步 3 构造适应函数, 取 $S(X) = F(X)$, $S(X)$ 值越小, 适应性能越好;
- 步 4 调整方差向量, 让第 k 代父本变异并选择个体进入第 $k + 1$ 代;
- 步 5 收敛判断, 收敛判据为

$$\left| \frac{S_w - S_b}{S_{\text{avg}}} \right| \leq \epsilon$$

(3)

其中 ϵ 为预先给定的小数, $S_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S(X_k), S_w = \max_k \{S(X_k)\}, S_b = \min_k \{S(X_k)\}, k = 1, \dots, N$ 。

若式 (3) 满足, 则算法终止, 输出结果, 否则转步 4。

在上述各步中, 方差向量的调整是进化策略中最关键的步骤, 可按下列方案进行: 设每个个体包含两方面的信息, 即解向量 X 与方差向量 $\sigma(X, \sigma)$ 的后代 (X', σ') 为

$$\begin{aligned} \sigma'_j &= \sigma_j \exp(\tau' \cdot N(0, 1) + \tau \cdot N(0, 1)) \\ x'_j &= x_j + N(0, \sigma'_j) \end{aligned}$$

其中 $\tau' = 1/\sqrt{2n}, \tau = 1/\sqrt{2\sqrt{n}}, N(0, 1)$ 和 $N(0, 1)$ 为相互独立的标准正态随机变量。

3 工程算例

某混凝土重力坝非溢流断面, 已知坝高 110.0 m, 坝顶宽度 7.0 m, 设计水位高程 95.0 m, 泥沙高程 30.0 m, 下游尾水位高程 5.0 m, 摩擦系数 $f = 0.70, f' = 1.45$, 凝聚力 $C' = 1.084 \text{ MPa}$ 。约束条件有 (a) 允许稳定安全系数 $[K] = 1.10, [K'] = 3.00$ (b) 坝踵允许拉应力小于零。初始设计断面参见表 1。

表 1 方案及成果比较

Table 1 Results of different design options

方 案	混凝土方量 /m ³	设计变量/m			稳定安全系数		应力/MPa		坝 坡	
		x_1	x_2	x_3	K	K'	坝趾	坝踵	上游	下游
初始设计	4 731	55.00	6.60	75.60	1.275	4.697	1.690	0.680	1∶0.120	1∶0.756
优化设计	3 867	54.67	10.92	52.17	1.100	3.918	2.077	0.002	1∶0.200	1∶0.522
文献 [3]	3 951	51.15	9.84	58.59	1.101	4.019	2.279	0.133	1∶0.192	1∶0.586

本文用进化策略对上述重力坝进行断面优化设计 ,初始种群数取 $N = 15$,容许误差 $\epsilon = 0.002$.经 50 次进化迭代基本收敛(图 2) ,优化结果目标函数 $W^* = 3\,867\text{ m}^3$,比原初始设计方案节省约 18.3% .表 1 为优化设计与初始设计及文献 [3] 结果的对比 .从表中可以看出 ,优化设计断面上游坡比达到上限值 1∶0.2 ,稳定约束与坝踵应力也都达到临界值 ;下游坡比和坝趾应力仍有富余 .因此 ,本文优化结果是经济、安全的 .

另外从表中还可以看出 ,文献 [3] 采用复形法所得结果目标函数比本文优化结果大 84 m^3 ,约占 2.2% .

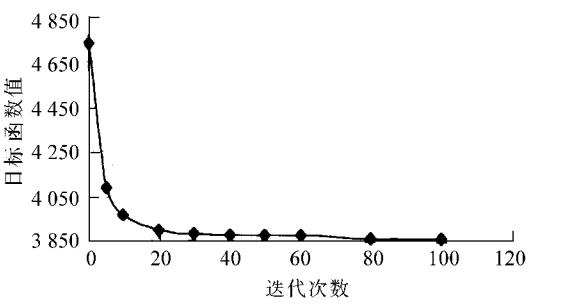


图 2 优化迭代过程

Fig.2 Iterative process of optimization

4 结 语

- a. 将进化策略引入重力坝断面的优化设计 ,为坝工结构设计提供了一种新的途径 .由于本文方法所得结果更接近全局最优解 ,因而成果更加经济、合理、可靠 .
- b. 进化策略概念清楚 ,简单有效 ,实施方便 ,值得在水工结构的优化设计中作进一步推广研究 .

参考文献 :

[1] Fogel D B. An introduction to simulated evolution optimization[J]. IEEE Trans on Neural Networks , 1994 5(1) 3 ~ 14.
[2] 水利电力部 .SDJ21—78 混凝土重力坝设计规范 [S].北京 :水利电力出版社 ,1985.16 ~ 31 ,75 ~ 82.
[3] 蔡新 ,王德信 .模糊优化在坝工结构设计中的应用 [J].河海大学学报 ,1995 23(6) :10 ~ 15.

Application of Evolutionary Strategies to Gravity Dam Optimization

SUN Lin-song¹ , WANG De-xin¹ , XU Shi-gang²

(1. College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 ,China ;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 ,China)

Abstract: In this paper , the evolutionary strategies are applied to the optimization of a gravity dam , and the implementation process is studied in detail . An engineering example indicates that the evolutionary strategies can yield the overall optimum solution , and they are simple and effective . The optimum plan is reasonable , reliable and economical .

Key words evolutionary strategies ; gravity dam ; optimum design