水库优化调度的 Pareto 强度值 SCE－UA 算法

林剑艺[1,2]，程春田[1]，顾妍平[3]，武新宇[1]

（1. 大连理工大学水电与水利信息研究所，辽宁大连 116024；2. 中国科学院城市环境研究所，福建厦门 361003；3. 浙江省水利河口研究院，杭州 310020）

［摘要］ 提出求解水库优化调度问题的 Pareto 强度值 SCE－UA 算法，该方法将水库优化调度的约束优化问题转换成两个目标函数的无约束优化问题，一个为原问题的目标函数，另一个为违反约束条件的程度函数；对上述两个目标函数组成的向量个体，利用 Pareto 优于关系和个体 Pareto 强度值概念，实现个体的优劣比较和群体的优劣排序，在此基础上使用 SCE－UA 算法求解。这种算法不需要人工处理罚函数，具有较强的通用性、稳定性及更好的搜索性能。

［关键词］ 水库优化调度；约束优化；Pareto 优于关系；Pareto 强度值；SCE－UA 算法

［中图分类号］ TV697 ［文献标识码］ A ［文章编号］ 1009－1742(2007)10－0080－03

1 前言

水库优化调度是一个比较复杂的非线性约束优化问题。周育人等[1]提出将约束优化问题转换成两个目标函数的最小值问题，一个为原问题的目标函数，另一个为违反约束条件的程度函数；利用 Pareto 优于关系定义个体 Pareto 强度指标，根据 Pareto 强度指标对上述两个目标函数组成的向量进行排序，使用遗传算法求解。SCE－UA 算法[2,3]是 Duan 等人提出的一种解决非线性约束最优化问题的进化算法，算法结合了单纯形法、随机搜索和基因算法等方法的优点，具有很强的全局寻优能力。笔者采用 SCE-UA 算法结合 Pareto 强度值等概念，用 Pareto 强度值 SCE－UA 算法（PSSCE，Pareto strength SCE－UA algorithm）求解水库优化调度的问题。

2 水库优化调度问题数学模型

假设研究的对象是以发电为主，兼顾其他综合利用要求的水库。长期优化调度的确定性数学模型如下：

目标函数

$$\max f = \max \sum_{t=1}^{T} A Q_t H_t M_t \tag{1}$$

约束条件

水量平衡约束 $V_{t+1} = V_t + (F_t - Q_t - S_t)\Delta t$ （2）

水库蓄水量约束 $V_{t,\min} \leqslant V_t \leqslant V_{t,\max}$ （3）

水轮机过水流量约束 $Q_{\min} \leqslant Q_t \leqslant Q_{\max}$ （4）

水库泄流量约束 $q_{t,\min} \leqslant Q_t + S_t \leqslant q_{t,\max}$ （5）

水电站出力约束 $P_{\min} \leqslant A Q_t H_t \leqslant P_{\max}$ （6）

式中 T 为年内总时段数，以月计 $T = 12$；A 为水电站出力系数；Q_t 为水电站发电引用流量（m^3/s）；F_t 为水库入库流量（m^3/s）；H_t 为水电站时段平均水头（m）；S_t 为水库弃水流量（m^3/s）；M_t 为第 t 时段小时数；V_t 为时段初水库蓄水量（m^3）；V_{t+1} 为时段末水库蓄水量（m^3）；$(t$ 为第 t 时段的秒数；$V_{t,\min}$ 为水库最小允许蓄水量（m^3）；$V_{t,\max}$ 为水库最大允许蓄水量（m^3）；$Q_{\min}$ 为水电站最小引用流量（m^3/s）；$Q_{\max}$ 为水电站最大引用流量（m^3/s）；$q_{t,\min}$ 为水库下游综合利用要求的最小下泄流量（m^3/s）；$q_{t,\max}$ 为下游河道安全泄流量；$P_{\min}$ 为水电站保证出力（kW）；$P_{\max}$ 为水电站装机容量（kW）。

［收稿日期］ 2006－06－28；修回日期 2006－09－04

［基金项目］ 国家自然科学基金资助项目（50479055）；高校博士点基金资助项目（20050141008）

［作者简介］ 林剑艺（1978－）男，福建安溪县人，博士，中国科学院城市环境研究所助理研究员，E-mail：jylin@ student. dlut. edu. cn

3 Pareto 强度值 SCE－UA 算法

3.1 约束优化问题转化为无约束多目标问题

约束优化问题可以概括地描述为如下形式：

$$\min f(x) \tag{7}$$

Subject to：$g_j(x) \leqslant 0,\ j = 1, \cdots, q,$

$h_j(x) = 0,\ j = q+1, \cdots, m,$

$l(i) \leqslant x_i \leqslant u(i),\ i = 1, \cdots, n$。

对于上述问题定义

$$f_j(x) = \max\{0,\ g_j(x)\},\ 1 \leqslant j \leqslant q \tag{8}$$

$$|h_j(x)|,\ q+1 \leqslant j \leqslant m。$$

记 $s_1(x) = f(x)$，$s_2(x) = \sum_{j=1}^{m} f_j(x)$，原优化问题式(7)转化为一个两目标无约束优化问题[4]：

$$\min y = s(x) = (s_1(x),\ s_2(x)) \tag{9}$$

其中，$x \in F \in S \in R^n$，S 为目标函数的搜索空间，F 为可行区域。其中 $s_1(x)$ 为原问题的目标函数，$s_2(x)$ 为违反约束条件的程度函数，如果 x^* 既是$s_1(x)$的最小值又是 $s_2(x)$的最小值($s_2(x)$的最小值为 0)，那么 x^* 就是原约束问题式(7)的解。

3.2 基于 Pareto 强度值的个体排序

在进化算法求解问题式(9)的过程中的个体选优，可利用向量之间的 Pareto 优于关系为基础比较两个个体的优劣，对群体中的个体则以 Pareto 强度值[1]概念为基础来进行排序。

定义 1　设 $a \in S$，$b \in S$，称 a Pareto 优于 b (Pareto dominate 记 $a < b$)或 b Pareto 劣于 a 当且仅当 $\forall i \in \{1, 2\}: s_i(a) \leqslant s_i(b)$ 且 $\exists j \in \{1, 2\}: s_i(a) < s_i(b)$。

定义 2　设 x_i 是群体 P_t 中的一个个体，用 $S(x_i)$表示群体中 Pareto 劣于 x_i 的个体个数，称为 x_i 的强度值，即

$$S(x_i) = \#\{x_j | x_j \in P_t \text{ 且 } x_i \text{ 优于 } x_j\} \tag{10}$$

其中#表示集合的基数。强度值 $S(x_i)$反映了个体 x_i 在群体 P_t 中的 Pareto 优于关系的强弱程度，从而可以根据强度值为基础来对群体中的个体进行排序，排序步骤如下：

1)按式(10)计算群体中的每个个体的强度值，强度值大者为优。

2)对于强度值相同者，进一步比较 $s_2(x)$，$s_2(x)$小者为优。

3.3 Pareto 强度值 SCE－UA 算法

算法由 SCE 和 CCE 两部分构成，如图 1 所示。

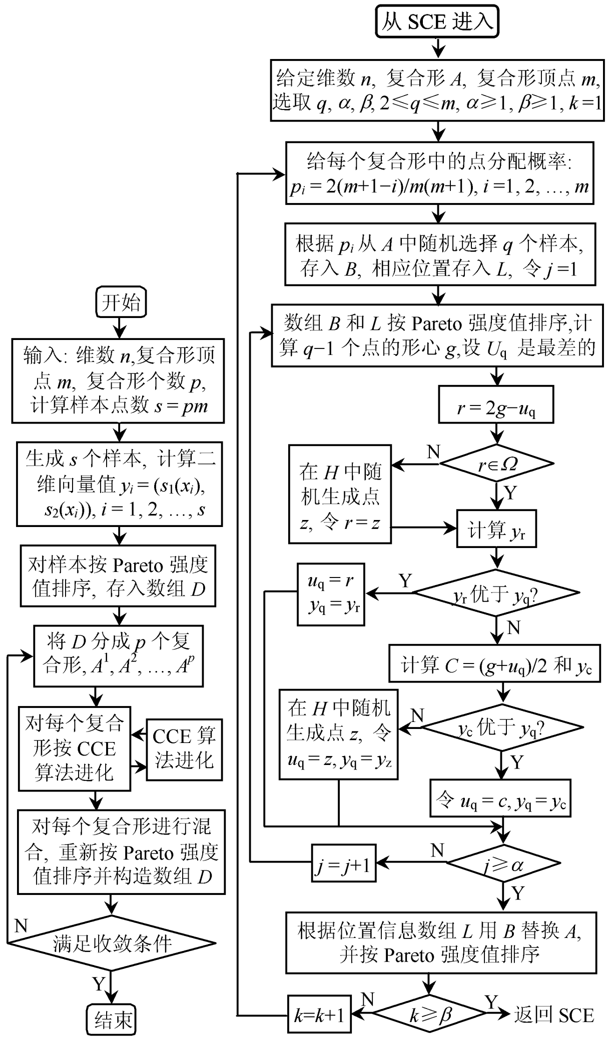

图 1　Pareto 强度值 SCE－UA 算法流程图

Fig. 1　Flowchart of Pareto strength SCE－UA algorithm

SCE 算法步骤：

Step 1 初始化　假定是 n 维问题，选取参与进化的复合形的个数 $p(p \geqslant 1)$和每个复合形所包含的顶点数目 $m(m \geqslant n+1)$。计算样本点数目 $s = pm$。

Step 2 产生样本　在可行域内随机产生 s 个样本 $x_1, \cdots, x_s$，计算样本 $y_i = (s_1(x_i), s_2(x_i))$，得样本点$(x_i, y_i)$，$i = 1, \cdots, s$。

Step 3 样本点排序　把 s 个样本点按 Pareto 强度值排序，排序后不妨仍记为$(x_i,\ y_i)$，$i = 1, \cdots, s$，其中 x_i 优于 x_{i+1}，记 $D = \{(x_i, y_i),\ i = 1, \cdots, s\}$。

Step 4 划分为复合形群体　将 D 划分为 p 个复合形 $A^1, \cdots, A^p$，每个复合形含有 m 点，其中

$$A^k = \{(x_j^k,\ y_j^k);\ x_j^k = x_{j+(k-1)m}^k,\ y_j^k = y_{j+(k-1)m}^k,\ j = 1, \cdots, m\},\ k = 1, \cdots, p。$$

Step 5 复合形进化　按照竞争复合形进化算法

(CCE)分别进化每个复合形。

Step 6 复合形掺混　把进化后的每个复合形的所有顶点组合成新的点集,再次按 Pareto 强度值排序,排序后不妨仍记为 D。

Step 7 收敛性判断　如果满足收敛条件则停止,否则回到 Step 4。

CCE(竞争复合形进化算法)步骤:

Step 1 初始化　选取 q, α, β,这里 $2 \leqslant q \leqslant m$, $\alpha \geqslant 1$, $\beta \geqslant 1$。$p_i = 2(m+1-i)/m(m+1)$, $i = 1, \cdots, m$。

Step 2 分配权重　对第 A^k 个复合形中的每个点分配其概率,这样较好的点就要比稍差的点有较多的机会形成子复合形。

Step 3 选取父辈群体　从 A^k 中按照概率分布随机地选取 q 个不同的点 $u_1, \cdots, u_j$,并记录 q 个点在 A^k 中的位置 L 。计算每个点的 $y_i = (s_1(x_i), s_2(x_i))$,把 q 个点及其相应的 y_i 放于变量 B 中。

Step 4 进化产生下一代群体

Step 4a 对 q 个点按 Pareto 强度值排序,计算 $q-1$个点的形心:$g = \sum_{j=1}^{q-1} u_j/(q-1)$

Step 4b 计算最差点的反射点 $r = 2g - u_q$

Step 4c 如果 r 在可行域内 Ω,计算其二维向量值 y_r,转到 Step 4d。否则,计算包含 A^k 的可行域中的最小超平面 H,从 H 中随机抽取可行点 z,计算 y_z,以 z 代替 r,y_z 代替 y_r。

Step 4d 若 y_r 优于 y_q,以 r 代替最差点 u_q,转到 Step 4f;否则计算 $c = (g + u_q)/2$ 和 y_c。

Step 4e 若 y_c 优于 y_q,以 c 代替最差点 u_q,转到 Step 4f;否则,计算包含 A^k 的可行域中的最小超平面 H,从 H 中随机抽取可行点 z,计算 y_z,以 z 代替 u_q,y_z 代替 y_q。

Step 4f 重复 Step 4a 到 Step 4e α 次。

Step 5 取代　把 B 中进化产生的下一代群体即 q 个点放回到 A^k 中原位置 L,并重新排序。

Step 6 迭代　重复 Step 1 到 Step 5 β 次,它表示进化了 β 代,也即每个复合形进化了多远。

算法建议取 $m = 2n+1$, $q = n+1$, $\alpha = 1$, $\beta = 2n+1$。

4　计算实例

以辽宁省某水电站为例,该水电站坝址以上控制流域面积10 400 km²,坝址以上干流总长247 km。水电站是以发电为主兼有防洪和灌溉的综合利用枢纽,电站出力系数为 8.5,保证出力为 33 MW,装机容量为 225 MW,多年平均发电量为 4.77×10^8 kW· h。水库为不完全年调节水库,正常蓄水位为 300 m,死水位为 290 m,最高蓄水位为 303 m,为保证水库安全,要求水库在 7 月份至 8 月份的水位不超过 300 m,9 月初以后才允许超蓄,直到最高蓄水位303 m。为验证计算结果的准确性,同时与传统的动态规划法(DP)计算比较,调度过程计算结果如表 1 所示,可以看出 PSSCE 计算结果与 DP 计算结果基本一致,其中 Pareto 强度值 SCE – UA 算法计算结果的总发电量为 5.6238×10^9 kW· h,DP 计算结果的总发电量为 5.6238×10^9 kW· h,这表示建立的方法有效可行。

表 1　Pareto 强度值 SCE – UA 算法和动态规划典型年计算结果

Table 1　Result of typical year optimal operation by PSSCE and DP

日期	入流/m³· s⁻¹	库水位/m		发电流量/m³· s⁻¹		水头/m		出力/10⁴ ×kW		弃水/m³· s⁻¹	
		PSSCE	DP	PSSCE	DP	PSSCE	DP	PSSCE	DP	PSSCE	DP
1956 – 04	106.00	290.50	290.50	77.47	77.48	49.59	49.59	33.00	33.00	0	0
1956 – 05	212.00	291.55	291.55	73.18	73.18	50.66	50.66	33.00	33.00	0	0
1956 – 06	285.00	296.33	296.33	154.28	154.27	55.00	55.00	74.53	74.52	0	0
1956 – 07	349.00	300.00	300.00	349.00	349.00	58.03	58.03	172.14	172.14	0	0
1956 – 08	155.00	300.00	300.00	64.33	64.35	59.18	59.18	33.01	33.02	0	0
1956 – 09	297.00	302.37	302.37	271.10	271.07	60.62	60.62	140.42	140.41	0	0
1956 – 10	54.80	303.00	303.00	62.53	62.56	62.19	62.19	33.01	33.02	0	0
1956 – 11	61.10	302.80	302.80	62.65	62.65	62.00	62.00	33.00	33.01	0	0
1956 – 12	17.40	302.77	302.77	66.92	67.81	61.93	61.92	34.87	35.32	0	0
1957 – 01	9.20	301.50	301.48	103.55	101.71	60.43	60.42	52.08	51.16	0	0
1957 – 02	6.70	298.97	299.00	121.19	120.40	57.81	57.84	57.95	57.62	0	0
1957 – 03	14.90	295.88	295.93	167.07	168.70	54.49	54.54	73.57	74.31	0	0

(下转第 87 页)