

网络出版时间:2012-06-08 16:10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120608.1610.030.html>

微分进化算法在水电站水库优化调度中的应用

肖 刚, 田 皎, 罗军刚, 解建仓

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

【摘 要】 【目的】针对传统优化算法的不足,将微分进化算法应用到水电站水库优化调度问题中,建立新的优化算法模型。**【方法】**建立基于微分进化算法的水电站水库优化调度模型,并给出具体求解步骤。为验证算法的有效性,将其应用于具体水电站水库的优化调度计算中,最后将该方法与遗传算法的计算结果进行了对比。**【结果】**实例计算结果表明,与遗传算法相比,微分进化算法收敛速度快,可调参数少,计算精度高,稳定性好,且该算法简单、容易实现,具有较强的全局搜索能力。**【结论】**微分进化算法在解决水电站水库优化调度问题时具有很强的适用性,为求解水电站水库优化调度问题提供了新思路。

【关键词】 水电站水库; 优化调度; 微分进化算法

【中图分类号】 P333.6

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)07-0229-06

Application of differential evolution algorithm in optimal operation of hydropower station

XIAO Gang, TIAN Jiao, LUO Jun-gang, XIE Jian-cang

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: 【Objective】In view of the disadvantages of the traditional optimization algorithm, differential evolution algorithm was used in the optimal operation problem of hydropower station to establish a new optimization model. **【Method】**We established an optimal operation model of hydropower station based on differential evolution algorithm, and worked out the specific steps of that problem. In order to validate the efficiency of the algorithm, differential evolution algorithm was used in specific calculation of optimal operation, and finally the calculation results of DE and GA were contrasted. **【Result】**Example calculations show that this algorithm has fast convergence, small number of tuning parameters, high calculation accuracy, good stability, simple and is easy to be implemented with strong global search capability. **【Conclusion】**Differential evolution algorithm has a strong suitability in the optimal operation field of hydropower station, and it will be a new method to solve the problem of hydropower station optimal operation.

Key words: hydropower station reservoir; optimal operation; differential evolution algorithm

水电站水库优化调度是一个强约束、非线性、多阶段的组合优化问题,其优化求解是一个具有实用价值的研究课题。目前,求解这一问题的算法很多,有动态规划法(DP)、逐步优化法(POA)、遗传算法

(GA)、模拟退火算法(SAA)、粒子群算法(PSO)、蚁群算法(ACO)和人工神经网络算法(ANN)等^[1-7]。虽然这些算法都能有效地对水电站优化调度开展研究,但是使用动态规划法求解时,计算速度会随着计

* [收稿日期] 2011-12-28

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51109175, 51079120); 公益性行业科研专项(201001011)

[作者简介] 肖 刚(1987—), 男, 陕西西安人, 博士, 主要从事水库调度研究。E-mail: tj6120131@163.com

[通信作者] 罗军刚(1981—), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: jgluo@xaut.edu.cn

算精度的提高而下降,出现“维数灾”问题;逐步优化法可以将多阶段问题化为两阶段问题,单库求解非常方便,但水库数目增加时,收敛速度大大降低;且上述 2 种方法的共同缺点是很难保证收敛到全局最优解。由于动态规划法和逐步优化法存在不足,遗传算法的出现为水库优化调度问题的求解提供了一种新途径,但是利用遗传算法求解时,存在局部寻优能力差及容易出现早熟现象,且交叉概率和变异概率的选择对问题的解有较大影响。模拟退火算法对把握搜索过程的总体能力较差,运行效率也较低。微分进化算法(Differential Evolution, DE)^[8-9] 是 1995 年由 Stron 和 Price 在遗传算法等进化思想的基础上提出的一种高效率的、基于群体智能的全局优化计算方法,其收敛速度快,可调参数少,计算精度高,算法简单容易实现,具有较强的全局搜索能力。因而在较短时间内便获得了较大发展,并且被广泛应用于许多领域。基于以上优化方法的不足,

本研究将微分进化算法运用到水电站优化调度中,并运用实例,通过与遗传算法的比较,验证了微分进化算法求解水电站水库优化调度问题的有效性、适用性,以期为水电站水库优化调度问题的求解提供一种新思路。

1 微分进化算法

微分进化算法的基本思想^[10-11] 是:首先在搜索空间内随机产生初始种群,然后,基于种群中个体之间的差异重组得到一个试验种群;如果试验种群个体比原始种群个体具有更好的适应值,那么试验种群个体就代替原始种群个体,形成新一代种群。通过对种群进行变异、交叉和选择等操作不断地迭代计算,并根据每一个个体的适应值,保留优良个体,淘汰劣质个体,从而逐步使种群进化到接近最优解的状态。微分进化算法的操作流程如图 1 所示。

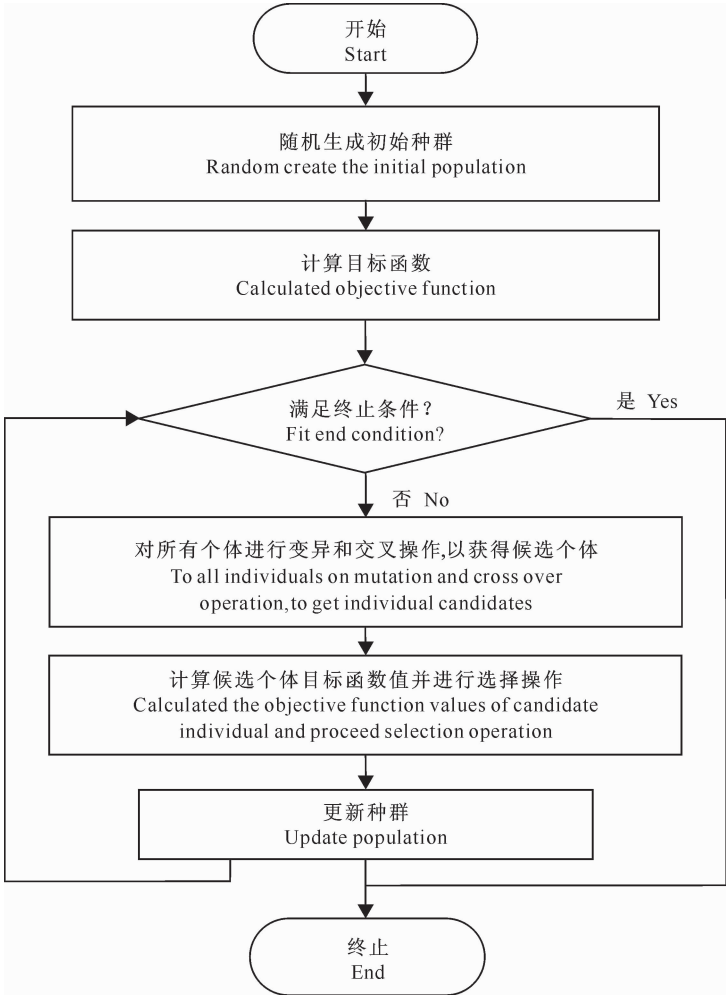


图 1 微分进化算法的操作流程

Fig. 1 Operation flow chart of differential evolution algorithm

微分进化算法作为进化算法的一个分支,与其他进化算法相比,包含着相似机理,整体结构包括种群初始化,进行变异、交叉和选择操作,不断进化更新,判断停止条件等。最大的不同之处是,它的变异算子是从当前种群中选取的2个或多个任意个体进行差值运算,并乘以系数得到的;而其他一些进化算法的变异算子则是定义的概率分布函数。

1.1 初始化

微分进化算法的种群初始化^[12]与其他进化算法相同,从给定边界约束内的值中随机选择,并假定所有随机初始化种群均符合均匀概率分布。设初始群体为 $X_{i,j}^0 (i=1,2,\dots, NP)$, NP 为种群规模,其中每个个体由以下公式计算得到:

$$X_{i,j}^0 = X_{i,j \min} + \text{rand} \cdot (X_{i,j \max} - X_{i,j \min}). \quad (1)$$

式中: rand 为 $[0,1]$ 之间的均匀分布随机数; $X_{i,j \max}$ 和 $X_{i,j \min}$ 为个体向量 X_i 第 j 个变量的上、下界; $j=1,2,\dots,D$, D 为问题解空间的维数。

1.2 变异操作

微分进化算法与一般进化算法最大的不同在变异操作上,其常用的一种变异模式为:

$$V_i^{G+1} = X_{r_1}^G + F \cdot (X_{r_2}^G - X_{r_3}^G). \quad (2)$$

式中: $X_{r_1}^G$, $X_{r_2}^G$ 和 $X_{r_3}^G$ 为第 G 代中随机采样的个体; V_i^{G+1} 为与目标个体 X_i^G 对应的变异个体,且 $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$; F 为差分向量的放大系数,用于控制差异向量的缩放程度。

1.3 交叉操作

交叉操作的目的是增加个体向量的多样性,采用二项式交叉算子,生成试验个体 U_i^{G+1} 的方式为:

$$U_i^{G+1} = \begin{cases} V_i^{G+1}, & \text{如果 } (\text{rand } b(j) \leq CR) \text{ 或 } j=q(i); \\ X_i^G, & \text{其他。} \end{cases} \quad (3)$$

式中: CR 为交叉概率,控制选择变异个体分量值代替当前个体分量值的概率, $CR \in [0,1]$; $q(i)$ 为从 $[1,D]$ 中随机选取的一个整数,用来确保 X_i^{G+1} 中至少有1个分量由 X_i^G 的相应分量得到。

1.4 选择操作

在试验个体 U_i^{G+1} 和目标个体 X_i^G 之间通过贪婪策略进行选择。如果 U_i^{G+1} 的适应度优于 X_i^G ,那么 U_i^{G+1} 将取代 X_i^G 进入到下一代,否则保留 X_i^G 。对于最小化问题,选择操作可表述为:

$$X_i^{G+1} = \begin{cases} U_i^{G+1}, & \text{如果 } f(U_i^{G+1}) < f(X_i^G); \\ X_i^G, & \text{其他。} \end{cases} \quad (4)$$

1.5 控制参数的设置

微分进化算法有种群规模 NP 、差分向量的放

大系数 F 、交叉概率 CR 3个控制参数。控制参数的选择对微分进化算法的搜索性能有较大影响^[13]。

1) NP 越大,搜索能力会加强,但会增加算法的计算量。一般 $NP=3 \times D \sim 10 \times D$,其中 D 为问题解空间的维数。

2) 差分向量的放大系数 F 影响算法的收敛速度。 F 变大,会提高收敛速度。一般 $F \in [0.5,1]$ 。

3) 交叉概率 CR 对算法起微调作用,用于控制种群的多样性。一般 $CR \in [0,1]$ 。

2 水电站水库优化调度的微分进化算法实现

2.1 问题描述

已知某水电站水库的水位、库容关系曲线,下游水位流量关系曲线及设计中水年流量过程线。该电站是以发电为主、兼有防洪和灌溉的综合利用枢纽,水库正常蓄水位为 704 m,死水位为 685 m,电站出力系数为 8.5,保证出力为 7.8 万 kW,装机容量为 30 万 kW,为保证水库安全,要求水库在洪水期(6,7,8月)水位不超过 695 m。

2.2 优化准则

水电站水库优化调度的最优准则是:满足电力系统安全与电能质量的要求,完成系统给定的日发电任务,若不计水头损失,按年发电量最大准则进行水电站优化调度。

2.3 数学模型

对于以发电为主、兼顾其他综合利用的水电站水库,其优化调度的确定性数学模型为:

$$\max f = \max \sum_{t=1}^T A Q_t H_t \Delta t. \quad (5)$$

式中: f 为水电站年发电量(万 kW · h), t 为时段变量, T 为年内总时段数, A 为水电站出力系数, Q_t 为水电站发电引用流量(m^3/s), H_t 为水电站时段平均水头(m), Δt 为第 t 时段的小时数。

2.4 确定决策变量与约束条件

对于有综合利用任务的水电站水库优化调度,其约束条件^[14-15]主要包括如下几方面。

1) 水量平衡约束:

$$V_{t+1} = V_t + (F_t - Q_t - S_t) \Delta t. \quad (6)$$

式中: 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), F_t 为水库入库流量(m^3/s), Q_t 为水电站发电引用流量(m^3/s), S_t 为水库弃水流量(m^3/s), Δt 为第 t 时段的小时数。

2) 水库库容约束:

$$V_{\min} \leq V_t \leq V_{\max} \circ \tag{7}$$

式中: $V_{\min}$ 为水库最小允许蓄水量(m^3), $V_{\max}$ 为水库最大允许蓄水量(m^3)。

3) 水库下泄流量约束:

$$q_{\min} \leq q_t \leq q_{\max} \circ \tag{8}$$

式中: q_t 为水库的下泄流量(m^3/s), $q_{\min}$ 为水库下游综合利用要求的下泄流量(m^3/s), $q_{\max}$ 为下游河道安全下泄流量(m^3/s)。

4) 水轮机过水流量约束:

$$Q_{\min} \leq Q_t \leq Q_{\max} \circ \tag{9}$$

式中: $Q_{\min}$ 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)。

5) 水电站出力约束:

$$N_{\min} \leq A Q_t H_t \leq N_{\max} \circ \tag{10}$$

式中: $N_{\min}$ 为水电站保证出力(kW), $N_{\max}$ 为水电站装机容量(kW)。

6) 水位约束:

$$Z_{\min} \leq Z_t \leq Z_{\max} \circ \tag{11}$$

式中: $Z_{\min}$ 为水库死水位(m), Z_t 为时段水库水位(m), $Z_{\max}$ 为水库防洪水位(m)。

2.5 微分进化算法的计算流程

水电站水库优化调度的微分进化算法计算流程如下。

Step1: 算法参数初始设置。确定目标函数, 确定变量的上、下界, 输入问题解空间的维数 D ; 设置种群规模 $NP=100$ 、最大迭代次数 $gen=100$ 及差分向量的放大系数 $F=0.5$ 和交叉概率 $CR=0.4$ 。

Step2: 种群初始化。在变量定义域内随机产生

一个规模为 NP 的初始种群。并设当前迭代次数 m 为 1。

Step3: 个体评价。直接以目标函数作为适应度函数来标识个体的优劣, 并按式(5)计算当前种群中每个个体的适应度值, 取其中具有最大适应度的个体作为种群的最优解。

Step4: 对种群个体进行变异操作, 从当前种群中选取 2 个个体进行差值运算, 并乘以系数得到新种群。

Step5: 在种群中选择个体进行交叉操作得到新种群。

Step6: 采用贪婪策略进行选择操作, 计算个体的适应度, 如果试验个体的适应度优于目标个体, 那么试验个体替代目标个体到下一代, 否则保留目标个体。

Step7: 终止检验。判断当前迭代次数 m 是否到达最大迭代次数 gen , 若不满足条件, 置迭代次数 $m=m+1$, 转入 Step3; 若满足条件, 输出最优解, 算法结束。

2.6 不同算法计算结果的比较与分析

为了验证微分进化算法在水电站水库优化调度的可行性和高效性, 采用 Matlab 语言编程, 对实例进行计算, 并与相同代数下基于遗传算法得到的结果进行比较。

2.6.1 计算结果比较 利用微分进化算法和遗传算法对同一水库的优化调度进行计算, 结果如表 1、2 所示。

表 1 基于微分进化算法的某一水电站水库优化调度的计算结果($Gen=100$)

Table 1 Calculation results of the optimal operation of a hydropower station based on DE ($Gen=100$)

月份 Month	入库流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Reservoir inflow	月初水位/m Water level at the beginning of the month	月末水位/m Water level at the end of the month	发电流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Power discharge	弃水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Abandon water discharge	电站出力/kW Output of power station	月发电量/ ($\times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$) Monthly power generation
5	290	685.00	695.00	251.597 0	0	15.717 2	1.147 4
6	319	695.00	685.00	357.403 0	0	22.189 5	1.619 8
7	553	685.00	695.00	487.302 9	27.294 0	30.000 0	2.190 0
8	364	695.00	695.00	364.000 0	0	24.016 9	1.753 2
9	411	695.00	704.00	365.372 6	0	25.547 6	1.865 0
10	338	704.00	704.00	338.000 0	0	24.916 6	1.818 9
11	208	704.00	704.00	208.000 0	0	15.450 0	1.127 8
12	139	704.00	704.00	139.000 0	0	10.376 7	0.757 5
1	117	704.00	704.00	117.000 0	0	8.748 5	0.638 6
2	105	704.00	704.00	105.000 0	0	7.859 2	0.573 7
3	103	704.00	703.76	104.341 9	0	7.800 0	0.569 4
4	150	703.76	685.00	232.688 5	0	15.625 1	1.140 6
合计 Sum				3 069.706	27.294 0	208.247 3	15.201 9

表 2 基于遗传算法的某一水电站水库优化调度的计算结果(Gen=100)

Table 2 Calculation results of the optimal operation of a hydropower station based on GA (Gen=100)

月份 Month	入库流量/ (m ³ ·s ⁻¹) Reservoir inflow	月初水位/m Water level at the beginning of the month	月末水位/m Water level at the end of the month	发电流量/ (m ³ ·s ⁻¹) Power discharge	弃水流量/ (m ³ ·s ⁻¹) Abandon water discharge	电站出力/kW Output of power station	月发电量/ (×10 ⁹ kW·h) Monthly power generation
5	290	685.00	695.00	251.597 0	0	15.717 2	1.147 4
6	319	695.00	687.11	350.152 9	0	21.994 8	1.605 6
7	553	687.11	695.00	481.971 6	39.875 5	30.000 0	2.190 0
8	364	695.00	695.00	364.000 0	0	24.016 9	1.753 2
9	411	695.00	704.00	365.372 6	0	25.547 6	1.865 0
10	338	704.00	704.00	338.000 0	0	24.916 6	1.818 9
11	208	704.00	703.10	213.114 7	0	15.742 5	1.149 2
12	139	703.10	704.00	133.885 3	0	9.947 7	0.726 2
1	117	704.00	703.44	120.220 6	0	8.958 4	0.654 0
2	105	703.44	700.10	122.227 3	0	8.918 8	0.651 1
3	103	700.10	694.94	128.403 5	0	8.911 7	0.650 6
4	150	694.94	685.00	188.179 1	0	11.816 8	0.862 6
合计 Sum				3 057.124 6	39.875 5	206.489 0	15.073 8

比较表 1、2 可以看出,在相同的优化代数内,与遗传算法相比,微分进化算法计算所得的各方面数据都更优,目标函数值更接近最优解,遗传算法得到的年发电量为 $15.073\ 8\times10^9\ \text{kW}\cdot\text{h}$,而微分进化算法得到的年发电量为 $15.201\ 9\times10^9\ \text{kW}\cdot\text{h}$,年发电量可增加 $0.128\ 1\times10^9\ \text{kW}\cdot\text{h}$,可见微分进化算法的计算结果更优于遗传算法。

2.6.2 算法性能分析 利用微分进化算法和遗传算法对同一水库进行优化调度的寻优过程如图 2 所示,优化 1~5 次所得水电站水库的年发电量见表 3。从图 2 和表 3 可以看出,微分进化算法无论在寻优的快速性上、性能的稳定性上还是在结果的收敛效果上均优于遗传算法,并且比遗传算法具有更高的计算精度,全局优化能力更强。

表 3 微分进化算法(DE)与遗传算法(GA)多次优化水电站水库年发电量的比较

Table 3 Comparison of annual power generation of hydropower station in many times of optimization by DE and GA

算法 Algorithm	第 1 次 First	第 2 次 Second	第 3 次 Third	第 4 次 Fourth	第 5 次 Fifth	平均值 Average
GA	15.021 4	15.084 7	14.901 5	15.073 7	14.982 1	14.998 7
DE	15.202 1	15.201 9	15.202 0	15.202 1	15.202 1	15.202 1

3 结 论

微分进化算法是一种新颖的智能计算优化方法,与其他优化算法相比,其不仅具有全局寻优能力强、收敛速度快的优点,而且编程简单,使用方便。本研究将微分进化算法应用于水电站水库优化调度问题之中,实例计算表明,该算法理论简单,应用方便,搜索效率高,全局收敛性好,计算精度高。因此,微分进化算法在水电站水库优化调度中将发挥更大

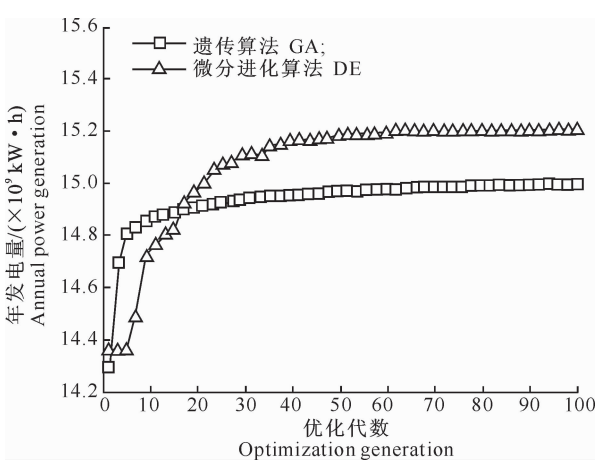


图 2 微分进化算法与遗传算法的寻优过程比较

Fig. 2 Comparison of optimization process of DE and GA

的作用。随着对微分进化算法的不断探索和尝试,该算法自身也在不断发展,可与遗传算法、神经网络算法、粒子群算法、模糊理论算法等新兴技术相结合,为处理复杂的优化问题提供新思路。

[参考文献]

[1] 畅建霞,黄强,王义民.水电站水库优化调度几种方法的探讨[J].水电能源科学,2000,18(3):19-22.
Chang J X,Huang Q,Wang Y M. A discussion on methods of single reservoir optimal operation [J]. Hydroelectric Energy,

- 2000,18(3):19-22. (in Chinese)
- [2] 马光文,王 黎. 遗传算法在水电站优化调度中的应用 [J]. 水科学进展,1997,18(3):275-280.
- Ma G W,Wang L. Application of genetic algorithm to optimal operation of hydropower station [J]. Advances in Water Science,1997,18(3):275-280. (in Chinese)
- [3] 罗云霞,周慕逊,王万良. 基于遗传模拟退火算法的水库优化调度 [J]. 华北水利水电学院学报,2004,25(3):20-22.
- Luo Y X,Zhou M X,Wang W L. Single reservoir optimal operation based on Genetic Algorithms and Simulated Annealing [J]. Journal of North China of Water Conservancy and Hydroelectric Power,2004,25(3):20-22. (in Chinese)
- [4] 马玉新,解建仓,罗军刚. 基于组织进化粒子群算法的水电站水库优化调度研究 [J]. 西安理工大学学报,2009,25(3):256-262.
- Ma Y X,Xie J C,Luo J G. Study on optimum operation based on organizational evolutionary particle swarm algorithm for hydropower station reservoir [J]. Journal of Xi'an University of Technology,2009,25(3):256-262. (in Chinese)
- [5] 徐 刚,马光文,梁武湖,等. 蚁群算法在水库优化调度中的应用 [J]. 水科学进展,2005,16(3):397-400.
- Xu G,Ma G W,Liang W H,et al. Application of antcolony algorithm to reservoir optimal operation [J]. Advances in Water Science,2005,16(3):397-400. (in Chinese)
- [6] Kumar D N,Reddy M J. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization [J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2007,133(3):192-201.
- [7] 马玉新,解建仓,罗军刚. 基于方向自学习遗传算法的水库优化调度 [J]. 水力发电学报,2009,28(4):43-48.
- Ma Y X,Xie J C,Luo J G. Study on optimal operation of reservoir based on directional self-learning genetic algorithm [J]. Journal of hydroelectric engineering,2009,28(4):43-48. (in Chinese)
- [8] Storn R,Price K. Minimizing the real functions of the ICEC 96 contest by differential evolution [C]//IEEE Conference on Evolutionary Computation,Nagoya,1996:842-844.
- [9] Storn R,Price K. Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization,1997,11(4):341-359.
- [10] 苏海军,杨煜普,王宇嘉. 微分进化算法的研究综述 [J]. 系统工程与电子技术,2008,30(9):1793-1797.
- Su H J,Yang Y P,Wang Y J. Research on differential evolution algorithm;A survey [J]. Systems Engineering and Electronics,2008,30(9):1793-1797. (in Chinese)
- [11] 黎 杰,周猛军,祝吾杰,等. 基于自适应微分进化算法的供水调度优化 [J]. 仪器仪表学报,2010,31(8):188-191.
- Li J,Zhou M J,Zhu W J,et al. Optimal control of urban water supply scheduling by self-adaptive differential evolution algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2010,31(8):188-191. (in Chinese)
- [12] 刘自发,张建华. 一种求解电力经济负荷分配问题的改进微分进化算法 [J]. 中国电机工程学报,2008,28(5):100-105.
- Liu Z F,Zhang J H. An Improved Differential Evolution Algorithm for economic dispatch of power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(5):100-105. (in Chinese)
- [13] 王培崇,钱 旭,王 月,等. 差分进化计算研究综述 [J]. 计算机工程及应用,2009,45(28):13-16.
- Wang P C,Qian X,Wang Y,et al. Overview of differential evolution algorithm [J]. Computer Engineering and Applications,2009,45(28):13-16. (in Chinese)
- [14] 王小安,李承军. 遗传算法在短期发电优化调度中的研究与应用 [J]. 长江科学院院报,2003,20(2):13-15.
- Wang X A,Li C J. Research and application of genetic algorithm to cascade hydroelectric stations' short-term optimization scheduling [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2003,20(2):13-15. (in Chinese)
- [15] 张 俊,程春田,廖胜利,等. 改进粒子群优化算法在水电站优化调度中的应用研究 [J]. 水利学报,2009,40(4):435-441.
- Zhang J,Cheng C T,Liao S L,et al. Application of improved particle swarm optimization algorithm to operation of hydropower station group [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(4):435-441. (in Chinese)