

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.004

基于协同进化遗传算法的滨湖河网地区水资源优化配置

汪洪泽, 董增川, 赵焱

(河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 由于多个种群可以更好地对应实际问题中性质差异较大的不同对象, 因此基于多个种群同时进化的协同进化遗传算法更适用于解决复杂的实际优化问题。针对滨湖河网地区河道交织、水源众多、供水关系复杂、水资源优化配置难度较大的问题, 将协同进化遗传算法引入滨湖河网地区水资源优化配置研究, 结合需水缩减系数, 建立了水资源优化配置模型, 并对毗邻洪泽湖的泗洪县进行了水资源优化配置, 模拟结果合理, 证明基于协同进化遗传算法的适用性好, 可实现研究区水资源高效利用。

关键词: 协同进化遗传算法; 滨湖河网; 水资源; 优化配置

中图分类号: TV 213; TP 18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2014)02-0015-05

Optimal Water Resources Allocation of Lakefront River Network Region Based on Coevolutionary Genetic Algorithm

WANG Hong ze, DONG Zeng chuan, ZHAO Yan

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Coevolutionary genetic algorithm is a kind of GA based on multi population's concurrent evolution, which is more suitable for solving the complex optimization problems because multi population can better correspond to objects of different nature. Lakefront river network region has the patterns of interlaced streams, multiple water sources, and complex water supply relationship, which brings more difficulties to the optimal water resources allocation. An optimal water resources allocation model was established based on the coevolutionary genetic algorithm combined with water demand coefficients to allocate water resources in Sihong County near the Hongze Lake. The results showed that the multi population pattern of coevolutionary genetic algorithm can handle the difficulties in the optimal water resources allocation of lakefront river network region. The results were reasonable, indicating good applicability of coevolutionary genetic algorithm and therefore realizing the highly efficient utilization of water resources.

Key words: coevolutionary genetic algorithm; lakefront river network; water resources; optimal allocation

协同进化遗传算法是传统遗传算法的一种改进, 其对实际问题的模拟从单个种群的进化提升为基于多个种群的协同进化^[1]。由于协同进化遗传算法涵盖了生物进化中相互受益与相互制约两类机制, 所以相比单纯强调种群内优胜劣汰的传统遗传算法来说, 前者能够更真实地模拟种群进化过程。此外, 多个种群可以更好地对应实际问题中性质差异较大的不同对象, 因此在解决复杂优化问题时, 协同进化遗传算法较传统遗传算法具有显著的优越性。

本文的研究区泗洪县毗邻洪泽湖, 县内水道交错, 河网复杂, 六条流域性河流在此注入洪泽湖, 南水北调东线工程

也经过县境, 再加上各类当地水源, 使得水资源优化配置十分复杂。根据泗洪的实际情况, 本文拟将考虑需水缩减系数的协同进化遗传算法应用于该区域水资源优化配置研究中, 其中需水缩减系数用于科学抑制供水需求, 协同进化遗传算法用于较好地适应河水与湖水联合调配供水的复杂情况。

1 需水预测

需水预测基于社会经济发展预测结果, 采用定额法^[2]进行计算。社会经济的近期(2015年)增长率, 以近5年发展情况进行外延预测^[3]; 中期、远期(2020年、2030年)经济增长

收稿日期: 2013-06-28 修回日期: 2014-02-14 网络出版时间: 2014-03-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.001.html>

基金项目: 江苏省水利科技项目“临洪水利枢纽闸泵系统联合调度研究”(2011550812)

作者简介: 汪洪泽(1987-), 男, 吉林长春人, 硕士, 主要从事水资源系统规划与管理方面研究。E-mail: whz2412@126.com

通讯作者: 董增川(1963-), 男, 山西芮城人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: dongzengchuan@163.com

率,则综合《宿迁市水资源综合规划(2010年—2030年)》相关数据和泗洪县的实际情况后选用指标法进行预测;生活、生产以及河道外生态需水的需水定额,参照《泗洪县节水型社会建设规划》中的用水指标确定;河道内需水量,依据 Temant 方法^[4],按多年平均天然径流量的 10% 计算河道内生态环境需水量。需水量预测结果见表 1。

表 1 泗洪县各规划水平年需水预测

		in every planning level year		
		万 m ³		
水平年		2015 年	2020 年	2030 年
城镇生活需水量		2 890.5	3 764.4	5 035.5
农村生活需水量		2 106.1	2 027.0	1 635.9
第一产业需水量	$P = 75\%$	65 412.3	61 278.7	56 022.6
	$P = 95\%$	81 278.6	76 121.4	69 555.7
第二产业需水量		4 317.4	6 383.3	9 104.3
第三产业需水量		2 478.0	3 987.3	6 894.7
生态环境需水量		492.6	617.0	961.4
总需水量	$P = 75\%$	77 696.9	78 057.8	79 654.3
	$P = 95\%$	93 563.2	92 900.5	93 187.4

2 水源划分

滨湖河网地区水源关系复杂,所以供水模型中将水源分成独立水源与公共水源两部分^[5]。独立水源只供给水源所在乡镇,公共水源为多个乡镇供水,需要考虑供水上下游关系。独立水源与公共水源关系见图 1。

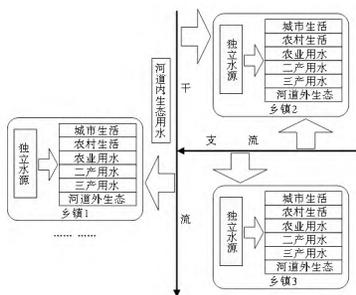


图 1 水源分析图解

Fig. 1 Diagram of water source analysis

2.1 独立水源

因为独立水源供水通道单一,所以不对其进行优化配置计算,而是在公共水源优化配置之前先完成各乡镇独立水源的供水分配计算。这样计算符合当地供水情况,同时可以降低优化配置模型的复杂程度。

2.1.1 独立水源水量

(1) 水库。泗洪县共有小水库 39 处,累计集水面积 105.53 km²,总库容 4 865.2 万 m³,兴利库容 2 515.8 万 m³。

(2) 塘坝。全县共有塘坝 1 245 面,蓄水总量 1 690.3 万 m³, $P = 75\%$ 、 95% 年份复蓄指数为 1.14 和 0.8。

(3) 其余地表径流。各乡镇 $P = 75\%$ 和 $P = 95\%$ 年份的地表径流量分别为 3.02 亿 m³、2.41 亿 m³,并将扣除水库、塘坝的汇水总量。

(4) 地下水。根据《宿迁市水资源规划》,泗洪县地下水

可开采量上限为 1 000 万 m³/a,各乡镇的地下水供水量不能超过可开采量上限。

(5) 中水。依据泗洪县水环境保护相关规划,近期、中期和远期全县中水回用总量将分别达到 1 165 万 m³、2 394 万 m³ 和 6 254 万 m³。

2.1.2 独立水源供水计算方法

独立水源中水库、塘坝具备调蓄能力,而其余地表径流量、地下水和中水则不具备调蓄能力。相应的,前者采用概化后的时间优化算法^[6] 计算,而后者则按需水量逐月计算。

2.2 公共水源

公共水源的优化配置计算是本文的重点,研究区内的主要公共水源包括过境河流、南水北调东线和洪泽湖水。

(1) 过境河流。主要有淮河、怀洪新河、新汴河、新濉河、老濉河、西民便河。淮河水流量虽大,但位于县域南界,直接供水量不大。

(2) 南水北调东线。为徐洪河河道,根据《宿迁市水资源综合规划》,南水北调东线开通后每年最多可为泗洪县增加供水 7 596 万 m³。

(3) 洪泽湖。依据 2001 年泗洪抗击特大干旱灾害共提洪泽湖水 2 亿 m³ 的记录,扣除南水北调东线供水量,干旱年份泗洪县最多可提取 1.24 亿 m³ 洪泽湖水抗旱。

3 河网矩阵

明确河道计算次序是真实完整地模拟河网供水过程的前提。本文对河道分级方法^[7] 进行改进,使用河网矩阵确定河道计算次序。根据河流交汇情况构造的河流交汇矩阵^[8],以 1 和 0 表征河流交汇关系,0 表示两河无交汇关系,1 表示两河存在交汇关系,如河流 4 汇入河流 1,则矩阵元素 (1, 4) 的值为 1。对于分叉的河流则依据河流分水比确定矩阵元素。

河网计算顺序为,每一轮计算取河网矩阵 $A_{m \times m}$ 中所有 $\sum_{j=1}^m A_{i,j} = 0$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 的行所对应的河流进行自上游到下游的供水计算。计算生成新的河网矩阵 $A_{n \times n}$ 进入下一轮计算, $A_{n \times n}$ 的计算公式如下:

$$A_{n \times n} = C_{n \times m} A_{m \times m} C_{n \times m}^T \quad (1)$$

式中: n 为 $A_{m \times m}$ 中所有 $\sum_{j=1}^m A_{i,j} \neq 0$ 的行的个数 ($i = 1, 2, \dots, m$); $C_{n \times m}$ 中的元素

$$C_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当 } j \text{ 为第 } r \text{ 个 } \sum_{j=1}^m A_{i,j} \neq 0 \text{ 的行号时} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (r = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

以此为例,逐步迭代下去,直到河网矩阵 $A_{n \times n} = [0]$

依据泗洪实际河网概化图^[9] (图 2),对河流进行编号(表 2)后构造其河网交汇矩阵(图 3)。利民河汇入濉河,拦早北河以分水比 4:6 分别汇入老汴河与濉河,故河网矩阵 (7,6)、(5,4)、(7,4) 分别取 1、0.4 与 0.6。其他河流无交汇关系。

根据河网计算顺序,可知首先应计算西民便河、安东河、徐洪河、拦早北、利民河、老濉河、新濉河、新汴河、怀洪新河、溧西引河、淮河,然后计算老汴河、濉河。

表2 泗洪县主要河流编号

Table 2 Coding of main rivers in Sihong County

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
河流	西民便河	安东河	徐洪河	拦早北	老汴河	利民河	濉河	老濉河	新濉河	新汴河	怀洪新河	溧西引河	淮河

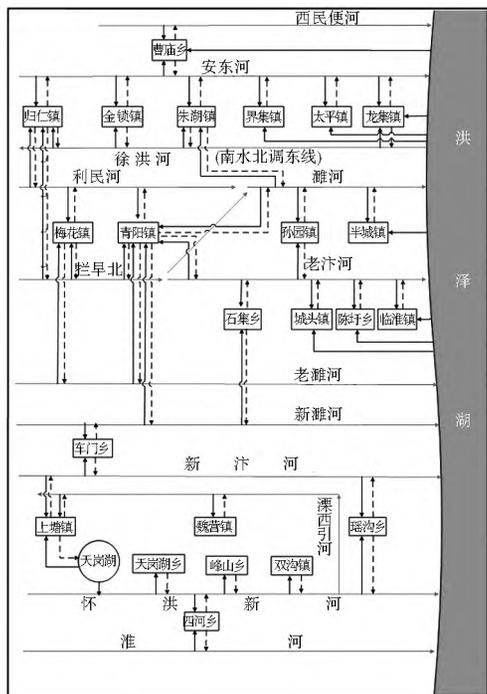


图2 泗洪县河网概化图

Fig. 2 Schematic diagram of river network in Sihong County

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0.6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图3 泗洪县河网交汇矩阵

Fig. 3 Intersection matrix of river network in Sihong County

4 需水缩减系数

为使供水需求抑制科学合理,需给每个乡镇设一个过境水需水缩减系数 G_i ($i=1, 2, \dots, 23$) 和一个湖水泵站补水需水缩减系数 H_i ($i=1, 2, \dots, 23$)。过境水供水计算中,各乡需水量 N_i 乘以过境水需水缩减系数 G_i 得到过境水需水量 N_{1i} ,然后过境水自上游到下游逐乡镇供水,即:

$$N_{1i} = N_i \times G_i \quad (i=1, 2, \dots, 23) \quad 0 < G_i \leq 1 \quad (3)$$

湖水泵站补水计算中,以湖水分配系数 F 乘以泗洪县可用湖水总量 H_z 得到泵站补水总量 B_z 进入县内河网,则:

$$B_z = H_z \times F \quad 0 < F \leq 1 \quad (4)$$

以各乡镇过境水供水后的需水缺口 N'_{1i} 乘以湖水泵站补水需水缩减系数 H_i 得到湖水泵站补水需水量 N_{2i} ,同样自上游到下游逐乡镇供水。

$$N_{2i} = N'_{1i} \times H_i \quad (i=1, 2, \dots, 23) \quad 0 < H_i \leq 1 \quad (5)$$

最后将剩余湖水依据沿湖7个乡镇的缺水情况进行分配。

5 协同进化遗传算法设计

5.1 算法设计

各乡镇的过境水需水缩减系数系列 G_i ($i=1, 2, \dots, 23$) 对应种群1,湖水分配系数 F 与各乡镇的湖水泵站补水需水缩减系数 H_i ($i=1, 2, \dots, 23$) 对应种群2。两个种群分别包涵30个个体,种群1中每个个体由23个元素组成,各元素承载各乡镇的过境水需水缩减系数 G_i ,种群2中每个个体由24个元素组成,前23个元素承载各乡镇的湖水泵站补水需水缩减系数 H_i ,第24个元素承载湖水分配系数 F 。

协同进化遗传算法具有较高的搜索效率,主要表现在搜索区域的动态变化上^[10]。记第 r 次搜索后决策变量中第 i 个决策分量为 x_i ,取值范围为 $[a_i, b_i]$,则该范围的上下限分别由公式(6)确定:

$$\begin{cases} a_i = \min_{p \in \{1, 2, \dots, N_p\}} \{x_i^{r-1, p}\} - \xi_i (k_i^{-1} - a_i^{r-1}) \\ b_i = \max_{p \in \{1, 2, \dots, N_p\}} \{x_i^{r-1, p}\} + \xi_i (b_i^{r-1} - a_i^{r-1}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\xi_i \in (0, 1]$, $x_i^{r-1, p}$ ($p=1, 2, \dots, N_p$) 为第 p 个进化种群第 i 个个体 $r-1$ 次搜索后的最优解; N_p 为种群总个数。

根据式(6)有:

$$b_i - a_i \leq k_i^{-1} a_i^{r-1} \quad (7)$$

不失一般性,设:

$$b_i - a_i = k_i' (b_i^{r-1} - a_i^{r-1}) \quad (8)$$

式中: $k_i' \in (0, 1]$, 则有:

$$b_i - a_i = k_i' (b_i^{r-1} - a_i^{r-1}) = k_i' k_i'^{-1} (b_i^{r-2} - a_i^{r-2}) = \dots = K_i' (b_i - a_i) \quad (9)$$

式中: $K_i' = \prod_{j=1}^r k_i' \leq \min\{k_i^1, k_i^2, \dots, k_i^r\} \in (0, 1)$

由公式(9)可知,每次搜索区域变化,均以 k_i' 倍缩小原来的搜索区域,因此经过多次变化,最终的搜索区域将比初始的搜索区域大大缩小。进化种群在小的搜索区域内搜索,其效率将大大提高。

协同进化遗传算法的关键是适应度值计算、选择运算、交叉运算、变异运算^[11]和优秀个体的保留,下面进行详细阐述。

5.2 个体适应度值计算

本次配置的适应度值计算目标是使全县水资源效益最大化^[12]。依据社会经济预测结果,可求出不同水平年保证100%供水可在各乡镇产生经济效益的大小,以此计算各乡镇的供水效益权重 W_i 。

在协同进化遗传计算中,将每次两个种群个体组合成的完整解代入研究区水资源供给模型,求出各乡镇的缺水率 S_i ;以各乡镇 $(1 - S_i)$ 与各乡镇供水效益权重分别作积后求和,所得结果即为该完整解的适应度值 Fit 。

$$Fit = \sum_{j=1}^{23} W_j \times (1 - S_j) \quad (10)$$

5.3 选择运算、交叉运算与变异运算

在对子种群1的30个个体进行评价时,每个个体要分

别与子种群 2 中的两个代表个体组合为一个完整解, 故此过程共产生 60 个完整解。选择运算以标准化几何分布规律随机对种群中的染色体进行选择, 所得选择结果种群规模为 30; 交叉运算采用均匀分布随机选择的方法从选择结果种群中选择交叉父代^[13], 父代以线性交叉的方式产生子代, 为提高种群多样化, 本次交叉次数确定为 30 次, 即所得交叉结果种群规模也为 30; 变异运算采用非均匀变异操作, 变异对象为选择结果种群。协同遗传算法的成功运行依赖于种群多样性的保持^[14], 而变异运算是提升种群多样性最重要的步骤, 模型设定所得变异结果种群规模为 30。

5.4 优秀个体保留

将以上计算所得的 3 个种群汇总为一个包含 90 个个体的综合结果种群, 对种群中的个体进行适应度值计算并排序: 如果适应度排名第一的个体适应度大于全局最优解, 则将其作为新的全局最优解; 把综合结果种群适应度值最高的前 30 个个体组成优化结果种群。最后, 截取种群中每个个体种群 1 对应部分形成新的种群 1。

对种群 2 进行同样的操作, 形成新的种群 2, 判断是否已满足程序终止条件, 如果满足则停止程序, 以当前的全局最优解为所求最优解; 如果不满足则将进化的种群 1 和种群 2 重新代入优化程序。

6 结果分析

本次泗洪县水资源优化配置设置最大进化代数 200 代, 为研究协同进化遗传算法的进化过程, 将各代运算结束后所得最优完整解的适应度与优化结果种群平均适应度作折线图进行分析, 见图 4。

分析图 4 可以发现, 协同进化遗传算法具有较快的进化速度和很好的进化稳定性, 优化结果种群的平均适应度值追赶最优解适应度值的速度很快, 说明优势基因在种群中得到保留且对进化方向的主导性很强。在平均适应度值接近最优适应度值之后, 平均适应度值便在一定范围内震荡, 这是种群多样性作用的体现, 其实质是种群内部通过自我调整, 跳出局部最优解的行为, 所以图中最优解适应度值往往在平均适应度值震荡一段后便再次提高。这种“种群平均适应度快速追赶最优解→平均适应度震荡调整→催生新的最优解”的良性循环进化方式是协同进化遗传算法相对于传统遗传算法最突出的优势。

每月的适应度值最高值为 100, 故全年适应度值满分为 1 200。经过水资源优化配置: 2015 年 $P=75%$ 情况下适应度值为 1 086.9, 2020 年 $P=75%$ 为 1 084.1, 2030 年 $P=75%$ 为 1 102.1, 分别为满分的 90.6%, 90.3% 和 91.8%; 2015 年 $P=95%$ 情况下适应度值为 997.1, 2020 年 $P=95%$

为 992.7, 2030 年 $P=95%$ 为 1 015.2, 分别为满分的 83.1%, 82.7% 和 84.6%。在干旱年, 乃至特殊干旱年, 配置计算都

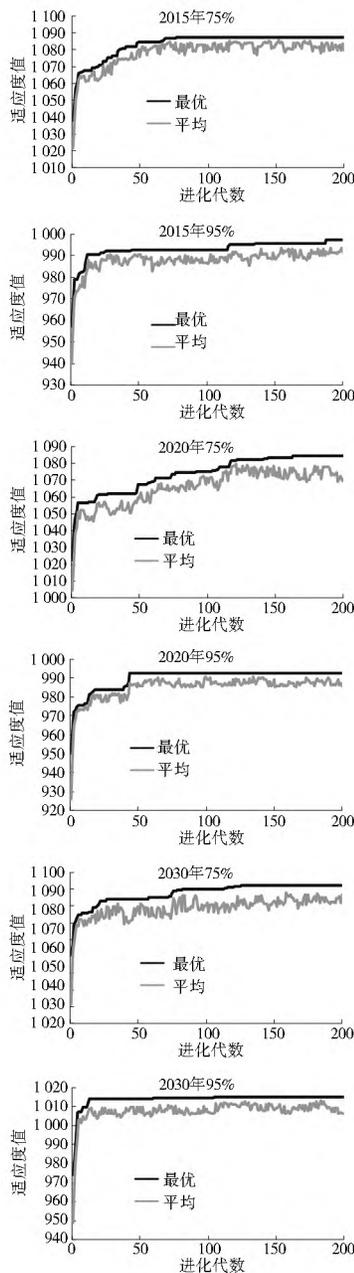


图 4 逐代种群适应度值变化过程

Fig. 4 Evolution process of the population's fitness value 取得了水资源的高效利用。

由于供水结构不断优化, 缺水率也逐渐降低, 到远期规划年(2030年), 在 $P=75%$ 和 $P=95%$ 的情况下, 缺水率将分别控制在 5% 和 15%, 各乡镇需水满足程度比较均衡(表 3)。

表 3 各规划年泗洪县水资源优化配置结果

Table 3 Results of optimal water resources allocation for Sihong County in every planning level year

规划年		独立水源/万 m ³					公共水源/万 m ³			供水量 / 万 m ³	需水量 / 万 m ³	缺水率 (%)
		水库	塘坝	其余径流	中水	地下水	河水	湖水	南水北调			
2015 年	75%	1 671	1 734	18 437	1 166	1 000	30 994	12 356	4 577	71 936	77 697	7.41
	95%	1 332	1 217	16 859	1 166	1 000	37 178	12 404	5 162	76 318	93 563	18.43
2020 年	75%	1 671	1 734	17 647	2 394	1 000	31 365	12 542	4 328	72 681	78 058	6.89
	95%	1 332	1 217	16 069	2 394	1 000	37 643	12 404	5 216	77 275	92 901	16.82
2030 年	75%	1 670	1 734	15 820	6 254	1 000	32 494	12 404	4 234	75 609	79 654	5.08
	95%	1 332	1 217	13 965	6 822	1 000	37 283	12 449	5 133	79 201	93 187	15.01

7 结语

通过对泗洪县水资源优化配置研究,发现将协同进化遗传算法引入滨湖河网地区水资源优化配置研究具有可行性。协同进化遗传算法的多子种群特性能够很好地应对滨湖河网地区水源众多,关系复杂的情况,并且具有较快的进化速度和很好的进化稳定性,能够有效避免供水问题陷入局部最优解,因此是解决复杂滨湖河网地区水资源优化配置问题的一种有效方法。

参考文献(References):

- [1] 巩敦卫,孙晓燕.协同进化遗传算法理论及应用[G].北京:科学出版社,2009.(GONG Dunwei,SUN Xiaoyan.Principle and Application of Coevolutionary Genetic Algorithm[G].Beijing: Science Press,2009.(in Chinese))
- [2] 刘卫林.几种需水量预测模型比较研究[J].人民长江,2011,(13):19-22.(LIU Weilin.Comparative Research on Several Models for Water Demand Forecast[J].Yangtze River,2011,(13):19-22.(in Chinese))
- [3] 许叔明,乔家君.区域经济发展预测的理论研究[J].聊城师院学报(自然科学版),2002,(1):63-67.(XU Shuming,QIAO Jiajun.Theory on Forecast of Regional Economic Development[J].Journal of Liaocheng Teachers University(Nat.Sci.),2002,(1):63-67.(in Chinese))
- [4] 田景环,王轶,茹松楠,等.基于河流功能的Tennant法改进及其应用[J].人民黄河,2011,(11):100-102.(TIAN Jinghuan,WANG Zhi,RU Songnan,et al.Improvement Tennant Method Based on River Function and Its Application[J].Yellow River,2011,(11):100-102.(in Chinese))
- [5] 常福宣,张洲英,陈进.适合长江流域的水资源合理配置模型研究[J].人民长江,2010,(7):5-9.(CHANG Fuxuan,ZHANG Zhouying,CHEN Jin.Study on Optimal Model of Water Resources Rational Allocation in Yangtze River Basin[J].Yangtze River,2010,(7):5-9.(in Chinese))
- [6] 吴爱华.水库优化调度中随机动态规划方法的研究与应用[J].计算机仿真,2003,(10):39-42.(WU Aihua.Research And Application of Stochastic Dynamic Programming Method for Hydroelectric Station Optimal Operation[J].Computer Simulation,2003,(10):39-42.(in Chinese))
- [7] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004.(RUI Xiaofang.Principle of Hydrology[M].Beijing:China WaterPower Press,2004.(in Chinese))
- [8] 李莉,郑孝宇,段志强.河网水流模拟编程计算研究[J].中国农村水利水电,2003,(10):66-67,72.(LI Li,Zheng Xiaoyu,DUAN Zhiqiang.Study on River Network Water Flow Simulation Programming Calculation[J].China Rural Water and Hydropower,2003,(10):66-67,72.(in Chinese))
- [9] 吴旭.淮河流域防洪调度概化图的编制与研究[J].治淮,2005,(1):16-17.(WU Xu.Compilation and Study on Flood Control Operation Schematic of Huaihe River Basin[J].The Huaihe River,2005,(1):16-17.(in Chinese))
- [10] 袁勇,梁永全.基于协同进化遗传算法的多议题谈判[J].计算机工程,2009,(4):187-189.(YUAN Yong,LIANG Yongquan.Multitissue Negotiation Based on Coevolutionary Genetic Algorithm[J].Computer Engineering,2009,(4):187-189.(in Chinese))
- [11] 苑希民,李鸿雁,刘树坤,等.神经网络和遗传算法在水科学领域的应用[M].中国水利水电出版社,2002.(YUAN Ximin,LI Hongyan,LIU Shukun,et al.Application of Artificial Neural Network and Genetic Algorithm in Water Science[G].China WaterPower Press,2002.(in Chinese))
- [12] 许士国,吕素冰,刘建卫,等.白城地区用水结构演变与用水效益分析[J].水电能源科学,2012,(4):106-108.(XU Shiguo,LV Suling,LIU Jianwei,et al.Analysis of Water Consumed Structure Evolution and Benefit in Baicheng region[J].Water Resources and Power,2012,(4):106-108.(in Chinese))
- [13] 卢厚清.一种遗传算法交叉算子的改进算法[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2007,(3):250-253.(LU Houqing.An Improved Crossover Operator of Genetic Algorithm[J].Journal of PLA University of Science and Technology,2007,(3):250-253.(in Chinese))
- [14] 张运凯.协同进化遗传算法及其应用[J].计算机工程,2004,(15):38-40,43.(ZHANG Yunkai.Coevolutionary Genetic Algorithm and Its Applications[J].Computer Engineering,2004,(15):38-40,43.(in Chinese))