

基于记忆梯度混合遗传算法的灌区水资源优化配置

陈卫宾¹, 董增川¹, 张运凤²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;
2. 华北水利水电学院研究生处, 郑州 450008)

摘要: 针对灌区水资源优化配置模型中目标函数高度非线性特点, 该文提出基于记忆梯度混合遗传算法用于灌区水资源优化配置, 并提出了有条件的随机生成的初始种群生成方式来处理线性约束条件的策略。实例研究表明算法用于灌区水资源优化配置比基本遗传算法计算精度有了明显提高。

关键词: 记忆梯度法; 遗传算法; 优化配置

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-6-0010-04

陈卫宾, 董增川, 张运凤. 基于记忆梯度混合遗传算法的灌区水资源优化配置[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 10-13.
Chen Weibin, Dong Zengchuan, Zhang Yunfeng. Optimization the allocation of irrigated areas water resources based on memory gradient hybrid genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 10-13. (in Chinese with English abstract)

0 引言

灌区水资源系统是一个多水源、多目标、多用户的复杂系统。在灌区水资源优化配置研究方面, 常用的有动态规划渐近法(DPSA)、线性规划(LP)、非线性规划(NLP)及网络模型、多目标决策理论、大系统理论和可靠性分析^[1]等理论方法, 但是DPSA法并不能保证在任何情况下都收敛到真正的最优解, 而NLP法求解要将非线性目标线性化, 因而应用难度较大^[2]。另外一般的动态规划法计算工作量大, 尚存在“维数灾”问题。

遗传算法(genetic algorithm, 简称GA)作为一种新的全局优化搜索算法, 具有鲁棒性强、适于并行处理以及高效适用等显著特点, 有效地解决了最优化问题的求解^[3]。但是传统遗传算法不能保证全局收敛性^[4, 5]。遗传算法中的选择操作、交叉操作的搜索寻优功能随进化代数的增加而逐渐减弱, 在实际应用中常出现早熟现象, 并且寻优的精度常常不尽人意。国内外有学者利用遗传算法对作物灌溉制度进行优化设计^[6-8], 但是都没有克服遗传算法的局部收敛速度慢的问题。针对这些问题, 本文提出了基于记忆梯度混合遗传算法的灌区水资源优化配置方法, 实例计算证明了此法用于灌区水资源优化配置的可行性和高效性。

1 灌区水资源优化配置数学模型

灌区水资源优化配置是一个复杂系统, 为了降低系统求解难度, 将灌区水资源优化配置分解为两层递阶结构模型进行求解, 模型结构如图1所示。

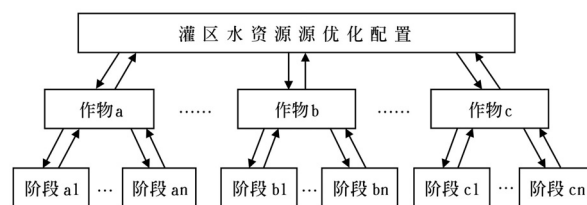


图1 灌区水资源优化配置分解协调模型结构图
Fig.1 Decomposition and coordination model of irrigation water resource optimizing the allocation

1.1 作物间水资源的优化分配

在种植结构一定的条件下, 将有限的水量在多种作物全生育期之间进行分配。目标函数: 设 $F^*(Q)$ 为以总水量 Q 分配给 N 种作物而获得的最大产值, 则:

$$F^*(Q) = \max \left(\sum_{i=1}^n (\sigma_i r_i(x_i) \omega_i) \right) \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq Q \quad \text{且} \quad x_i \geq 0; \quad \sum_{i=1}^j x_i \leq q_j$$

式中 $r_i(x_i)$ ——第 i 种作物的全生育期的水分生产函数; x_i ——第 i 种作物全生育期内分得的水量, q_j ——可能供给 $j(0 < j \leq n)$ 种作物的可供水量, σ_i ——第 i 种作物价格; ω_i ——第 i 种作物的灌溉效益分摊系数。

1.2 单一作物生育期内水资源的优化配置

以整个生育期的产量最大为目标, 优化各生育期的灌溉水量。作物水分生产函数采用 Jensen 提出的在供水不足条件下, 水量和农作物实际产量的连乘模型^[9], 则目标函数为单位面积的实际产量 y_a 与最高产量 y_m 的比值最大, 即:

$$F = \max \left(\frac{y_a}{y_m} \right) = \max \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \right)^{\lambda_i} \quad (2)$$

式中 F ——全生育期的实际产量与最高产量的最大比

收稿日期: 2007-05-20 修订日期: 2008-05-15

基金项目: 2005 江西省重大关键技术攻关计划项目 (200501A0500101)

作者简介: 陈卫宾 (1976—), 男, 河南开封人, 博士生, 主要研究方向为水资源高效利用及管理。南京 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 210098。Email: tougaoyong@sohu.com

值; ET_{ai} 、 ET_{mi} ——分别为第 i 生育阶段的实际蒸发蒸腾量与最大蒸发蒸腾量, mm, 最大蒸腾蒸发量可由当地的农业气象资料计算得出; λ_i ——第 i 生育阶段作物对缺水的敏感性指数, 由试验资料分析获得。

约束条件: 可供水量约束, 生育期各阶段供水量之和应等于全生育期可供水量。

$$\sum_{i=1}^T m_i = q \quad \text{且} \quad 0 \leq m_i \leq m_{i\max}$$

式中 m_i ——单一作物第 i 生育阶段分配的水量, mm;
 q ——单一作物整个生育期可供分配的水量, mm;
 T ——作物总生育阶段数; $m_{i\max}$ ——作物第 i 生育阶段最大允许灌水量。

单一作物各生育阶段实际腾发量 ET_a 可由式 (3) 计算^[10]:

$$ET_a = e_m t_1 + S_e [1 - \exp(-e_m \bullet t_2 / S_e)]$$

$$t_1 = [10\gamma H_i(\theta_a - \theta_e) + P_i + m_i + K_i] / e_m, t_2 = T_i - t_1 \quad (3)$$

式中 e_m ——潜在蒸腾蒸发强度, mm/d; S_e ——为凋萎系数至适宜土壤水分下限时计划湿润层的土壤有效水量, mm; γ ——土壤孔隙率; H_i ——第 i 生育阶段的计划湿润层深度, mm; θ_a 、 θ_e ——第 i 生育阶段初及蒸腾蒸发不受土壤含水率影响的下限所对应的土壤含水率 (占孔隙百分数); K_i ——第 i 生育阶段内地下水对计划湿润层的补给量, mm, 由观测资料获取; T_i ——第 i 生育阶段的天数; P_i ——第 i 生育阶段有效降雨量, mm。

生育阶段末计划湿润层的含水量可以下由水量平衡方程得到:

$$ET_{ai} = WZ_i + P_i + K_i + m_i - (S_i - S_{i-1}) \quad (4)$$

式中 WZ_i ——第 i 生育阶段由于计划湿润层增加而增加的水量, mm; S_i ——第 i 生育阶段末计划湿润层的含水量, mm, 生育期初始含水量已知。

2 基于记忆梯度的混合遗传算法及模型求解

2.1 基于记忆梯度的混合遗传算法

在传统的优化方法中, 常用的迭代公式形式如下:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (5)$$

式中 α_k ——通过某种线性搜索而得到的步长; d_k ——下降方向, 对 α_k 及 d_k 的不同选择就构成了不同的迭代公式。当 $d_k = -\nabla f(x_k)$ 时为最速下降算法, 这种方法计算简单, 但是在极值点收敛速度缓慢且容易产生拉锯现象; $d_k = -(\nabla^2 f(x_k))^{-1} \nabla f(x_k)$ 时为拟牛顿法, 这类方法克服了极值点附近收敛速度慢的缺陷^[11], 但是每次迭代都要计算矩阵的逆矩阵计算量大。因此本文利用具有极值点附近收敛速度快且计算量小的一种新的记忆梯度法构造一种新的混合遗传算法, 用来解决灌区水资源的优化配置问题。该算法的主要计算步骤如下:

1) 初始种群的生成: 在变量众多、约束复杂的系统的优化过程中, 初始种群的优良程度是重要的, 论文中参考王跃宣等^[12]探讨的种群生成方法。

2) 适应度评价: 根据实际情况本文以目标函数值作为个体的适应度。

3) 选择操作: 采用轮盘赌的方式实现, 并采用精英保留策略。

4) 交叉算子: 给定交叉概率 p_c , 随机地对被选择染色体配对。设 $v_k^{(1)}$, $v_k^{(2)}$ 是配对父代染色体中的两个基因, 参考文献^[13]通过杂交获得的两个后代基因为:

$$\alpha_k v_k^{(1)} + (1 - \alpha_k) v_k^{(2)}; \quad \alpha_k v_k^{(2)} + (1 - \alpha_k) v_k^{(1)} \quad (6)$$

5) 变异算子: 给定变异概率 p_m , 进行变异的染色体的原基因 v_k , 设其取值范围为 $[v_{\min}^k, v_{\max}^k]$, 产生一个在区间 $[0, 1]$ 之内的实数 α , 按照以下公式进行变异:

$$v_k' = v_{\min}^k + \alpha \times (v_{\max}^k - v_{\min}^k) \quad (7)$$

6) 利用记忆梯度法^[14]对变异后的群体进行局部优化。利用文献^[14]提出的超记忆梯度广义投影算法对变异后的种群中的个体进行局部优化, 以克服基本遗传算法由于局部收敛速度慢导致计算精度不高的缺陷。

7) 若进化代数 t 等于最大进化代数则计算终止, 否这回步骤 2)。

2.2 模型求解及约束处理

对于作物间的水量分配, 采用作物全生育期的水分生产函数作为适应度评价函数, 具体可以由当地的灌溉试验资料获得。对于单一作物不同生育期内的水量分配, 采用式 (2) 作为适应度评价函数。设 m_0 表示需水量与可供水量中的较小者, 为了使生成的随机数满足约束条件, 令生成的作物分配水量的随机数位于 0 与 m_0 之间, 这样生成的随即变量就能够满足两个约束条件。

3 计算实例

某灌区土壤孔隙率为 50%, 田间持水率为孔隙率的 75%, 播种前土壤含水率为田间持水率的 80%, 由于地下水埋深较大, 因此不考虑地下水对计划湿润层的影响。蒸腾蒸发不受土壤含水率影响的下限按照田间持水率的 70% 计算, 凋萎系数按照田间持水量的 35% 计算, 生长初期土壤含水量按照田间持水率 80% 计算, 其他参数见表 1。全生育期水分生产函数通常采用二次抛物线的形式^[15], 由试验资料得冬小麦全、夏玉米、春播棉、夏播棉灌水量 x (m^3/hm^2) 与产量 y (kg/hm^2) 之间关系分别为:

$$y = -0.0026x^2 + 3.68x + 96.14$$

$$y = -0.0136x^2 + 10.49x + 286.11$$

$$y = -0.0019x^2 + 1.58x + 8.31$$

$$y = -0.0022x^2 + 5.1x + 16.88$$

生育期可供水量如表 2 所示。

利用改进后的遗传算法和基本遗传算法进行求解, 计算结果如表 3 及表 4 所示。

表 1 作物生育阶段基本资料表
Table 1 Data of different crop growth stages

作物	面积/hm ²	生育阶段	起止日期	$m_{\max}$	H_i/m	P/mm	e_m	λ_i
冬小麦	200	播种~越冬	10.22—12.20	60	0.4	15.4	1.3	0.26
		越冬~返青	12.21—3.10	60	0.4	6	1.3	0.06
		返青~拔节	3.11—4.10	60	0.5	10	3.2	0.38
		抽穗	4.11—4.30	60	0.6	35	3.9	0.6
		乳熟	5.1—5.20	60	0.7	29	5.8	0.6
		成熟	5.21—6.10	60	0.8	57	5.5	0.29
夏玉米	81.67	播种~拔节	6.20—7.22	60	0.4	115.1	5.3	0.19
		拔节~抽穗	7.23—8.14	60	0.6	33.5	4.4	0.25
		抽穗~灌浆	8.15—8.31	60	0.7	18.7	3.75	0.59
		灌浆~成熟	9.1—9.29	60	0.7	34.2	3.35	0.29
春播棉	81.67	苗期	4.26—6.10	60	0.4	56	5.55	0.31
		蕾期	6.11—7.13	60	0.6	109	5.3	0.22
		花铃期	7.14—9.9	60	0.8	105.5	3.9	0.12
		吐絮期	9.10—10.10	60	0.8	35.9	2.75	0.65
夏播棉	199.07	苗期	6.10—7.19	60	0.4	127.4	5.35	0.04
		蕾期	7.20—8.19	60	0.6	66.2	4.3	0.22
		花铃期	8.20—9.17	60	0.8	34.9	3.5	0.16
		吐絮期	9.18—10.13	60	0.8	30.9	2.7	0.08

表 2 作物全生育期可供水量
Table 2 Water quantity for supplying during whole crop growth time

多作物可供水量/10 ⁴ m ³		单一作物可供水量/10 ⁴ m ³		价格/元·kg ⁻¹	效益分摊系数
冬小麦一种作物	26	冬小麦	26	1.4	0.45
冬小麦、春播棉两种作物	52	夏玉米	15	1.1	0.4
冬小麦、春、夏播棉三作物	52	春播棉	10	6	0.4
四种作物	52	夏播棉	15	6	0.4

表 3 记忆梯度混合遗传算法优化配置结果
Table 3 Results of the optimization allocation in memory gradient hybrid genetic algorithm

作物	A	$A(1)$	$A(2)$	$A(3)$	$A(4)$	$A(5)$	$A(6)$	y_a 与 y_m 比值	产值/元·hm ⁻²
冬小麦	24	6.2	16.19	1.2	0.24	0.2	0	0.972	7845
夏玉米	6	3.94	1.5	0	0.14			0.999	12660
春播棉	12	8.09	2.9	0.82	0.16			0.953	13035
夏播棉	10	8.53	1.23	0	0.24			0.977	16665

注：表中 A 代表全生育期分配的水量， $A(i)$ 代表第 i 阶段所分水量，下同。

表 4 基本遗传算法优化配置结果
Table 4 Results of the optimization allocation in simple genetic algorithm

作物	A	$A(1)$	$A(2)$	$A(3)$	$A(4)$	$A(5)$	$A(6)$	y_a 与 y_m 比值	产值/元·hm ⁻²
冬小麦	28	3.2	16.19	3.2	2.24	2.2	1	0.937	8760
夏玉米	4	1.94	1.52	0.4	0.14			0.962	10140
春播棉	13	8.09	0.9	3.82	0.16			0.905	13920
夏播棉	7	4.76	1.3	0.78	0.19			0.875	12165

由表 3、4 及表 1 种各作物的种植面积可以得出，利用改进的混合遗传算法总产值为 6987175 元，而利用基本遗传算法（simple genetic algorithm, SGA）配置水资源总产值为 6137742 元，另外从各个作物生育阶段间的配水结果也可以看出，利用本文提出的混合遗传算法配置结果所得出的实际产量和最大产量的比值要比基本遗传算法高。因此，该算法配水结果与基本遗传算法计算结果产值明显提高，证明了该算法的高效性和优越性。

4 结论与讨论

传统遗传算法虽然应用广泛，但计算结果的精度常常不尽人意，不但精度低、易早熟，而且也不能保证结果严格满足等式约束。本文针对这些问题，提出了基于记忆梯度的混合遗传算法，采用伪随机方式来保证解的可行性，并将其应用在灌区水资源优化配置求解中，实例证明该算法用于灌区水资源优化配置比基本遗传算法

在计算精度上有了明显提高, 显示了算法的高效性、优越性。另外, 该算法可避免动态规划等确定性算法由于维数灾而引起的计算困难, 因此更适合于高度非线性函数问题的求解。但是本问题出的灌区水资源优化配置模型, 仅仅配置到作物生长的各个阶段, 还没有具体到灌溉日期, 这是本模型有待进一步研究的之处。

[参 考 文 献]

- [1] 崔远来, 李远华, 李新建, 等. 非充分灌溉条件下稻田优化灌溉制度的研究[J]. 水利学报, 1995, 29—34.
- [2] Kurata K, Takakura T. Underground storage of solar energy for greenhouse heating. I: analysis of seasonal storage system by scale and numerical models[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34 (5): 563—569.
- [3] 张 兵, 袁寿其, 李 红, 等. 玉米灌溉模型及遗传算法的优化求解[J]. 农业机械学报, 2006, 37(9): 104—106.
- [4] 曲中水, 刘淑兰. 基本遗传算法的收敛性分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2003, 8(1): 42—45.
- [5] 王丽薇, 洪 勇, 洪家荣. 遗传算法收敛性分析[J]. 计算机学报, 1996, 19(10): 794—797.
- [6] 付 强, 金菊良, 梁 川. 基于实码加速遗传算法的投影寻踪分类模型在水稻灌溉制度优化中的应用[J]. 水利学报, 2002: 39—45.
- [7] 宋朝红, 崔远来, 罗 强. 基于遗传算法的非充分灌溉下最优灌溉制度设计[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24 (6): 4—48.
- [8] 段春青, 邱 林, 黄 强, 等. 基于超平面实码遗传算法的灌溉制度优化设计[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 36—39.
- [9] 李远华. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1998.
- [10] 汤广民, 王友贞. 安徽淮北平原主要农作物的优化灌溉制度与经济灌溉定额[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(2): 24—29.
- [11] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [12] 王跃宣, 刘连臣, 牟盛静, 等. 处理带约束的多目标优化进化算法[J]. 清华大学学报, 2005, 45(1): 103—106.
- [13] 周 明, 等. 遗传算法原理与应用[M]. 国防工业出版社, 2001.
- [14] 孙清滢, 张秀珍. 解带非线性和不等式约束优化问题的超记忆梯度广义投影算法[J]. 石油大学学报, 2003, 27(2): 119—123.
- [15] 徐建新. 区域水资源规划及灌区节水增产灌溉专家系统软件研制[D]. 西安: 西安理工大学, 2001.

Optimization the allocation of irrigated areas water resources based on memory gradient hybrid genetic algorithm

Chen Weibin¹, Dong Zengchuan¹, Zhang Yunfeng²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources And Hydraulic Engineering, Hohai University, Nan jing 210098, China;

2. Graduate department of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: Irrigation water resource allocation model is highly nonlinear programming model, for the reason a hybrid genetic algorithm based on memory gradient which is used in irrigation water resource allocation is introduced. For the much linear constraints, a stochastic generated method under certain conditions for original population is developed. Case study show that the algorithm and the handle strategy of constraints are superior to the simple genetic algorithm in irrigation water resource optimization allocation application.

Key words: memory gradient method; genetic algorithm (GA); optimization allocation