

渠道轮灌配水优化模型与复合智能算法求解

高伟增¹, 赵明富¹, 汪志农², 古乐声¹

(1. 河南科技学院, 河南 新乡 430000; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 依据遗传算法理论, 在配水求解中, 摒弃传统的二进制编码, 采用了和人们处理问题思路一致的十进制编码, 针对遗传算法的某些局限性, 采用自由搜索算法克服了传统基因编码方法容易陷入局部最优解的缺陷, 扩大了算法的搜索空间, 从而提高了基因序列的质量; 同时由于对各个渠道流量调节采用了自由搜索算法, 使各渠道的流量在其允许的范围内调节到最佳值, 从而使各个渠道在同一时间关闭, 不但减少了渠道弃水, 而且在目前灌区的管理条件下还减少了人工管理的劳动时间。

关键词: 渠道配水; 遗传算法; 自由搜索算法; 优化配置模型

中图分类号: S274.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)06-0038-05

渠道配水是灌溉调度管理的重要内容之一, 科学合理的配水过程可以大大提高灌溉水的利用率, 减少无效弃水。灌溉渠系的优化配水问题可分为两类: 一是以增产效益最优为目标的灌溉水量分配^[1]; 二是以弃水或水量损失最小为目标的灌区各级渠道流量的优化调度。由于灌区某次配水的增产效益受作物种植制度、降雨、前期灌水、土壤水分、农产品价格等众多因素的影响, 前一类方法需要参数多, 确定上述参数难度很大, 且模型复杂难以在灌区推广使用。实际上目前大多数灌区在实际渠系配水过程中, 根据下级渠道申报的用水量, 在满足各种限制条件下, 由上级灌溉管理部门根据经验, 以渠系水量损失小或配水时间最短为目标进行水量调配的。因此第二类模型具有符合灌区配水实际情况, 相对简单, 所需参数少, 便于在灌区推广。

吕宏兴和宋松柏对此作了深入研究^[2,3], 但二者的编码基础为二进制编码, 采用二进制编码会不可避免地涉及量化误差和编码长度的权衡, 如同将连续系统离散化时采样频率会导致失真, 将连续的优化空间离散化时也会导致目标函数的失真, 不能直接反映所求问题的结构特征, 因此很难满足生成有意义积木块编码原则^[4]。当码长越大时, 量化误差越小, 但会导致收敛速度变慢。本文用自然编码, 即用渠道号编码, 符合人们的思维习惯, 并采用遗传算法和自由搜索算法的有机结合, 使渠道同时关闭, 从理论上实现了渠道弃水为零极限优化。

1 配水数学模型的建立

该优化模型旨在解决配水渠道各出水口按“定流量、变历时、不同优先级”运行时流量调度的最优组合方案。假设上级渠道的设计流量为 Q ; 其有 N 条下级渠道, 其设计流量和实配流量分别为 Q_{sj} 、 $Q_j (j = 1, 2, \dots, N)$, 考虑到渠道实际配水要求和减小渠道配水损失, Q_j 可在渠道设计流量的 $0.8 \sim 1.2$ 倍之间变化。 T 为轮期, t_j 、 t_{1j} 、 t_{2j} 、 V_j 分别为第 j 条下级渠道的配水时间、配水开始和结束时间、需配水量; $t_{2j} - t_{1j} = t_j$ 。在满足各级渠道配水流量约束的条件下, 以轮期内所有配水时段的上、下级渠道的输水渗漏损失总量最小和总配水时间最少及配水时间差最小为目标建模。

目标函数

$$Z_1 = \min(V_{su} + V_{sd}) \quad (1)$$

式中, V_{su} 、 V_{sd} 分别为轮期内上下两级渠道的输水损失总量(m^3);

据文献[5, 6],
$$V_{su} = \frac{A_u L_u V_u Q_u^{-mu}}{100} \quad (2)$$

式中, A_u 、 mu 分别为上级渠道的渠床透水系数和指数, 随着渠床土壤性质及衬砌方式、地下水埋深等变化, A_u 取值范围为 $[0.7 \sim 3.4]$, mu 取值范围为 $[0.3 \sim 0.5]$; L_u 为上级渠道输水长度(km); V_u 为上级配水渠道输水总量(m^3); Q_u 为上级配水渠道的流量(m^3/s)。

$$V_{sd} = \frac{\sum_{j=1}^N f(A_j, L_j, V_j, Q_j^{-mdj})}{100} = \frac{\sum_{j=1}^N A_j L_j V_j Q_j^{-mdj}}{100} \quad (3)$$

收稿日期: 2011-03-28

基金项目: 国家科技部 863 计划“数字渠系平台建设与精准用水管理决策应用”(2003AA209040)

作者简介: 高伟增(1968—), 博士, 副教授, 研究方向为计算机应用, 水资源优化。

* 通讯作者: 汪志农(1948—), 浙江杭州人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程方面的研究。

式中, N 为配水渠道总数; j 为配水渠道序号; A_j 、 md_j 分别为某下级渠道的渠床透水系数和指数; L_j 为某下级渠道输水长度(km); V_j 为某下级配水渠道输水总量(m^3); Q_j 为某下级配水渠道的流量(m^3/s)。

由式(1), (2), (3) 变为:

$$Z_1 = \min(V_{su} + V_{sd})$$

$$= \frac{\min(A_u L_u V_u Q_u^{-mu} + \sum_{j=1}^N A_j L_j V_j Q_j^{-md_j})}{100} \quad (4)$$

从式(4) 知, A_u 、 mu 、 V_u 、 L_u 、 A_j 、 md_j 、 L_j 、 V_j 为定值, 由此可以近似认为: 在渠道输水总量、输水工作长度、渠床土壤性质及衬砌方式、地下水埋深及出流条件确定情况下, 渠道输水损失水量随渠道流量增大而减小。要想减少渠道输水损失, 必须在满足渠道流量安全约束条件下(在渠道设计流量的 0.8 ~ 1.2 倍之间变化时^[2]), 增大上下级渠道的流量, 流量越大, 输水损失就越小。

渠道水量的损失, 不但包含输水损失, 还包括渠道弃水损失。因此, 调度者一般希望总的配水时间越短越好, 最好配水渠道能在同一时间关闭, 这样不但节省了人力, 也减少了渠道弃水。因渠道参数条件不变, 以配水渠道总输水时间最小的目标函数为:

$$Z_2 = \min(\max_{1 \leq j \leq N} t_{2j} - \min_{1 \leq j \leq N} t_{1j}) \quad (5)$$

式中, $\max t_{2j}$ 为所有配水渠道中最晚结束时间, $\min t_{1j}$ 为所有配水渠道中最早开始时间, 每个配水方案的配水时间为渠道的配水最晚时间减去最早时间。

设在时刻 t , 最后一条渠道开始引水, 同时配水还有 $k-1$ 个渠道, 这 k 条最后配水的渠道的配水结束的时间最晚的为 T_2 。以配水渠道配水时间差异最小的目标函数为:

$$Z_3 = \min(\sum_{j=k}^N (T_2 - t_{2j})) \quad (6)$$

即在众多的配水方案中, 找到各配水方案中最后配水渠道闸门关闭时间差值之和的最小值。

式中, N 为下级配水渠道总数; j 为配水渠道序号。

2 模型约束条件

上述两个模型的不同之处只是它们的优化目标不同, 它们的前提条件即约束条件是一致的, 具体有以下约束:

(1) 配水优先级约束: 配水时先对配水级别高的渠道配水, 1 级渠道完全配水完后再对 0 级渠道配水, 同理 0 级配完配 -1 级。同级别渠道配水不分

先后。

(2) 轮期约束: 设配水渠道最大允许输水时间为 T , 则每一配水方案渠道的轮流引水时间之和不大于轮期 T 。

(3) 上级渠道引水流量约束: 各下级渠道在同一时段净流量之和不大于上级渠道引水流量。

(4) 水量约束: 任一下级渠道的配水流量与引水时间之积应等于该渠道的需配水量。

(5) 下级渠道配水流量约束: 任一下级渠道的配水流量应在其设计流量的 0.8 ~ 1.2 倍^[2] 以内。

(6) 水量平衡约束: 任一时段上级渠道流量等于该时段内配水的各下级渠道配水流量之和。

3 配水遗传算法的构造过程

(1) 确定决策变量和各种约束条件即确定决策变量 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 , 约束条件为第二节所述; (2) 建立优化模型, 确定目标函数类型和数学描述形式; (3) 确定表示可行解的染色体编码方法, 即把渠道的配水方案用染色体进行表示; (4) 确定解码方法, 确定出由基因型到表现型的对应关系和方法即确定怎样把染色体配水方案表示成真实配水方案; (5) 确定出由目标函数值 $f(X)$ 到个体适应度值 $F(X)$ 的转换规则; (6) 确定出选择运算、交叉运算、变异运算、等遗传算子的具体操作方法; (7) 确定出配水遗传算法初始条件: T (终止进化代数)、 M (初始群体大小)、 P_c (交叉概率)。

4 配水遗传算法的实现

遗传算法应用于不同的问题中算法原理是一样的, 实现步骤也极为类似, 所不同的是针对不同的问题人们所用的编码方法各异, 交叉算子和变异算子也各具特色, 而正是由于这些差异, 决定遗传算法实现的难易程度。本文的创新之处在于编码和变异。

4.1 基因编码

在配水求解中, 如果采用二进制编码, 因配水渠道众多, 编码长度太长, 将会出现上文所提到的问题, 另外二进制编码和人们处理问题的思路也不一致, 这为设计程序增加了难度。因此, 在配水优化问题的求解方法中, 本文用所依次配水的顺序排列来表示各个个体的编码串, 其中等位基因为 n 个整数值或 n 个记号。

假定将所有待配水渠道所组成的列表记为 w_1 , 给每个渠道分配一个 1 ~ n 之间的编码序号, 将这个序号的排列也表示为 w_2 , 即:

$$\begin{aligned} w_1 &= (v_1, v_2, v_3, \dots, v_n) \\ w_2 &= (1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (7)$$

这样每个渠道都有对应的编码序号, 如用如下的编码串:

$$T_1: 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots, n$$

可以表示这样的配水方案, 从渠道 v_1 开始, 依次对 v_2, v_3, \dots, v_n 进行配水, 直到把所有渠道配水完毕。

4.2 解码方法

对于一个确定的渠道配水方案, 如 $T: 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots, n$, 当 $\sum_{j=1}^k Q_j \leq Q$ 且 $\sum_{j=1}^{k+1} Q_j > Q$ 时, 对前 k 个渠道同时配水, 如 k 个渠道中有某渠道配水完毕, 检验第 $k+1$ 个渠道的流量是否不大于这个刚刚配水完毕的渠道, 是, 开始对第 $k+1$ 个渠道配水, 否, 等前 k 个渠道中第二条渠道配水完毕, 检验第 $k+1$ 个渠道的流量是否不大于这两个刚刚配水完毕的渠道流量之和, 是, 开始对第 $k+1$ 个渠道配水。同理, 可对下面渠道依次配水。

基因算法的优点之一是在进化计算过程中无需更多的外部信息, 只依靠适应度函数来评估染色体的优劣, 并将结果作为进一步进化的标准, 构造适应度函数。

4.3 适应度函数

构造配水适应度函数, 有 3 个参考函数, Z_1, Z_2, Z_3 。满足 Z_1 , 只需要上下级渠道流量均为其设计流量的最大值即可。本文以 $f = Z_2$ 构造适应度函数 (最小最优), Z_3 为参考适应度函数, 即两个配水方案在 Z_2 值相同的情况下, 比较 Z_3 (最小最优)。

在配水过程中, 有许多的约束条件, 除了轮期约束和优先级约束, 其它的约束都可以在编码和解码的过程中得到自然满足。染色体解码后, 当配水方案不满足上述其中某一个约束时, $f = Z_2 \times 2$, 两个约束全不满足, $f = Z_2 \times 4$ 。这样的惩罚计算就扩大了个体间差异, 有利于算法收敛。

4.4 基因操作

与传统的基因算法相似, 本文应用的算法有基因运算和进化运算, 与传统的基因算法中的变异不同, 本文的基因组变异是多层次的。不仅考虑基因组间的变异, 即单个基因组间位置的变换, 还考虑基因组内部的变异, 即渠道配水流量的变异。

(1) 交叉算子设计。交叉算子的设计 requirements 是: 对于任意两个配水方案进行交叉操作以后, 都能够得到另外两个新的并且具有实际意义的配水方案。

(2) 变异算子设计

A: 基因组间变异。变异算子在遗传算法中起着双重作用, 一方面它在群体中提供和保持多样性, 以使其它的算子可以继续起作用; 另一方面它本身也可起到一个搜索算子的作用。变异总是作用在单个染色体上, 变异有许多种, 如倒位变异、交换变异、插入变异, 本文采用倒位变异, 倒位变异是指将个体编码串中随机选取的两个基因座之间的基因异序排列, 从而产生一条新的组合。如 T_x 基因选取在第四和第八基因座之间进行倒位变换得到 T'_x :

$$T_x = (BCA \mid DEJHI \mid FG)$$

$$T'_x = (BCA \mid IHJED \mid FG)$$

B: 基因组内变异。各个渠道配水流量在其各自运行的范围内变化 (变异), 对于一个确定顺序的配水方案来说, 求解变成了对多个随机变化的离散型数值进行处理, 而自由搜索算法恰恰对多参数、离散型的数值有较高的适应性。

Free Search (FS) 是由 Penev 和 Littlefair 提出的一种新的进化计算方法^[7]。自然界中, 一些高等群居动物, 如马、羊等, 此类动物在平时活动中, 如迁徙或寻找食物中, 从整个种群来看, 是处于一种有序的进程之中, 但其中的个体又存在着与整体进程相协调的个体随意行为, 这些群居动物个体间相互联系而又互相独立支撑着整个寻觅过程。个体与群体之间存在着协调一致性。主要依靠以下两种动物本能: 直觉 (sense) 和运动 (mobile)。直觉使个体在搜索域内具有辨别能力。寻优过程中, 个体会依照不断改变的直觉不断调整搜索方向, 这一点类似于自然界中的人们学习和掌握知识的过程。在整个寻优搜索过程中, 个体考虑过去的经验、知识, 但不受制于此, 每个个体可以有两种运动: 在邻域附近的小步幅搜索和在全局范围的大步幅勘测。这是 FS 算法的创新。FS 的优势在于局部寻优, GA 的优势在于全局寻优, 因此, 本文采用 GA 给出全局较优解, 再用自由搜索算法对配水流量变异进行处理, 从而获得全局极限最优解。

本文对配水流量搜索方向三个: 同向变异 (同增、同减); 异向变异 (配水渠道单数增, 偶数减或单数减, 偶数增); 随机变异。搜索起始步长为配水设计最大流量的 0.001 倍, 采用倍增惩罚性搜索方法, 搜索起始点为计划配水流量。

4.5 停止准则

可以设定最大进化代数, 例如可设 $n=2000$; 也可设定代间差异率 (上一代适应度函数值和下一代函数值之差的绝对值和下一代函数值之商) 小于一定值。本文设定代间差异率小于 0.01 时, 算法结束。

表 1 冯家山灌区北干十一支下段斗渠轮灌时间表

Table 1 The rotational irrigation schedule of lateral canals in Fengjiashan ID (No. 11 Branch Canal in North Main Channel)

项目 Item	斗口号 Name of canal								
	1	2	3	4	5	6	7	新 7 New 7	8
面积 Area(hm ²)	82.93	33.93	102.33	112.53	34.13	96.67	46.07	74.27	62.73
时间 Time(h)	138	47	132	98	48	161	65	102	98
项目 Item	斗口号 Name of canal								
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
面积 Area(hm ²)	28	60.53	52.6	103.33	53.33	213.33	26.13	183.3	35
时间 Time(h)	40	89	94	155	75	281	36	267	47
项目 Item	斗口号 Name of canal								
	18	19	20	新 20 New 20	21	22	23	退水斗 Sink	
面积 Area(hm ²)	23.67	171.2	201.13	36	109.33	33.8	7.93	47.87	
时间 Time(h)	33	264	333	49	171	51	11	76	

表 2 配水结果

Table 2 The results of water distribution

配水参数 Parameters of water distribution	斗口号 Name of canal								
	1	2	3	4	5	6	7	新 7 New 7	8
起始 Time begin(h)	0	0	0	141	0	0	0	126.612	67.248
终止 Time up(h)	141	49.245	126.612	241.131	50.615	153.09	67.248	224.449	168.638
时长 Lasting time(h)	141	49.245	126.612	100.131	50.615	153.09	67.248	97.837	101.390
流量 Flow rate(m ³ /s)	0.196	0.191	0.209	0.196	0.190	0.210	0.193	0.209	0.193
调节率 Adjust rate(%)	2.123	4.56	4.26	2.123	5.167	5.17	3.344	4.255	3.343
配水参数 Parameters of water distribution	斗口号 Name of canal								
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
起始 Time begin(h)	153.090	0	191.124	168.638	241.131	0	84.873	49.245	281.857
终止 Time up(h)	191.124	84.873	280.506	329	317.761	281.857	119.203	329	329
时长 Lasting time(h)	38.035	84.873	89.382	160.362	76.630	281.857	34.330	279.755	47.143
流量 Flow rate(m ³ /s)	0.210	0.210	0.210	0.193	0.196	0.199	0.210	0.191	0.199
调节率 Adjust rate(%)	5.167	4.863	5.167	3.344	2.123	0.304	4.863	4.560	0.304
配水参数 Parameters of water distribution	斗口号 Name of canal								
	18	19	20	新 20 New 20	21	22	23	退水斗 Sink	
起始 Time begin(h)	224.449	50.615	0	119.203	165.931	280.506	317.761	256.102	
终止 Time up(h)	256.102	329	329	165.930	329	329	329	329	
时长 Lasting time(h)	31.653	278.385	329	46.728	163.070	48.494	11.24	72.90	
流量 Flow rate(m ³ /s)	0.209	0.190	0.202	0.210	0.210	0.210	0.196	0.209	
调节率 Adjust rate(%)	4.255	5.167	1.216	4.863	4.863	5.167	2.123	4.255	

5 运行实例

引用文献^[3,4]数据,冯家山灌区北干十一支为一斗口数目较多的支渠,十一支分两段管理,下段为法门段,上段城关段。法门段共有斗 26 条,十一支正常流量为 2.0~2.8 m³/s,其中法门段允许引水流量为 1.8 m³/s,各斗口正常引水流量为 0.2 m³/s。根据配水计划,该支渠段本次灌溉轮期为 14 d(336

h),各斗口按控制面积和流量确定的引水时间见表 1。

6 结论

1) 文中没有采用轮灌组的思想,而是统一采用基因编码的方法对所有渠道统一调配,文中的优化结果基因编码为:(1,2,3,5,6,7,11,15,21,17,20,9,16,22,8,4,10,23,13,12,19,14,26,24,18,25),对应

的渠道名称为(1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 14, 20, 16, 19, 8, 15, 新 20, 新 7, 4, 9, 21, 12, 11, 18, 13, 退水斗, 22, 17, 23), 即在满足上下级流量约束的条件下, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 14, 20 渠道同时开始配水, 在 2 渠道配水完毕后, 16 渠道配水开始, 然后为 19 渠道配水, 依次配水完毕。整个配水过程为: 即在满足上下级流量约束的条件下, 对前 k 个渠道同时配水, 如 k 个渠道中有某渠道配水完毕, 依据渠道基因编码, 检验第 $k+1$ 个渠道的流量是否不大于这个刚刚配水完毕的渠道, 是, 开始对第 $k+1$ 个渠道配水, 否, 等前 k 个渠道中第二条渠道配水完毕, 检验第 $k+1$ 个渠道的流量是否不大于这两个刚刚配水完毕的渠道流量之和, 是, 开始对第 $k+1$ 个渠道配水。同理, 可对下面渠道依次配水。

2) 本文采用自然编码, 符合人们的思维习惯, 与面向对象的软件工程思想不谋而合, 从而使编程和求解变得方便。且文中采用自由搜索算法克服了传统基因算法容易陷入局部最优解的缺陷, 扩大了算法的搜索空间, 从而提高了基因序列的质量。

3) 自由搜索算法不仅表现在提高基因序列的

和最终结果的质量上, 由于对各个渠道流量调节采用了自由搜索算法, 使各渠道的流量在其允许的范围内调至最佳值, 从而使各个渠道在同一时间关闭, 不但减少了渠道弃水, 在目前灌区管理条件下还减少了人工管理的劳动时间, 这对简化整个渠系的水量流量调控与调度具有现实意义。

参考文献:

- [1] 汪志农. 适用于半干旱灌区某次配水的优化模型[J]. 海河水利, 1993, 108(2): 19-22.
- [2] 吕宏兴, 熊运章, 汪志农. 灌溉渠道轮支斗渠轮灌配水与引水时间优化模型[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6): 43-46.
- [3] 宋松柏, 吕宏兴. 灌溉渠道轮灌配水优化模型与遗传算法求解[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 40-44.
- [4] 张文修, 梁 怡. 遗传算法的数学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [5] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 5.
- [6] N. Bruns. 水资源科学分配[M]. 戴国瑞, 冯尚友, 等译. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [7] Kalin P, Guy L. Free search: a comparative analysis[J]. Information Sciences, 2005, 122: 173-193.

Optimization model of canal water distribution with GA and FS in rotation irrigation

GAO Wei-zeng¹, ZHAO Ming-fu¹, WANG Zhi-nong², GU Yue-sheng¹

(1. Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 430000, China;

2. Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: According to the genetic theory, it is essential to discard the traditional binary system coding for solving water distribution. Considering GA sinking into the partial solution easily, free search algorithm is introduced. It extends the search space for algorithm, enhancing the quality of gene coding, adjusting the discharge of canal, making every canal close at the same time, decreasing the discarding water of canal, and reducing the time of manual work.

Keywords: distributing water in channel; genetic algorithm; free search algorithm; the model of optimal distribution