

基于自由搜索算法的灌渠配水优化模型

张国华¹, 谢崇宝¹, 皮晓宇², 王斌³

(1. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054; 2. 北京市朝阳区水务局, 北京 210098;
3. 东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 国内外现有的渠道配水模型是建立在下级渠道流量相等、上级渠道断面均匀水力参数相同的基础上, 无疑限制了模型的应用范围。针对该种不足, 该文建立了考虑下级渠道流量不等和上级渠道断面变化的精细化配水模型。在模型求解方面, 通过构建合理的适应度函数和对约束条件的高效处理, 应用自由搜索算法对模型进行了求解。应用结果表明, 采用本模型和算法得到的配水方案与原配水方案相比, 输水渗漏损失减少了 8.26%; 配水过程也更加均匀, 有效减少了闸门调节次数。

关键词: 渠道, 模型, 算法, 自由搜索, 精细化配水

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.10.014

中图分类号: S274.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-10-0086-05

张国华, 谢崇宝, 皮晓宇, 等. 基于自由搜索算法的灌渠配水优化模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 86-90.
Zhang Guohua, Xie Chongbao, Pi Xiaoyu, et al. Optimization model for discharge distribution of irrigation channels based on free search algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(10): 86-90. (in Chinese with English abstract)

0 引言

灌区水量配置主要是通过灌区的渠道工程、管道工程和控制工程实现的, 其中以满足农田灌溉用水需求的水量优化配置为灌区水量优化配置的主要内容。编制配水计划, 就是在全灌区的灌溉面积、取水时间、取水水量和流量已确定的条件下拟定每次灌水向配水点分配的水量、配水方式、配水流量(续灌时)或是配水顺序及时间(轮灌时)。目前大多数灌区凭借经验编制灌溉渠道配水计划, 造成了较大的渠系输水渗漏损失和频繁的闸门调节, 随着农业水资源供需矛盾的日益突出, 对灌区配水计划提出了更高的要求, 因此建立合理的灌溉渠系配水模型, 运用现代科技、信息和管理技术, 编制精细化灌区配水计划, 优化渠系的配水时间和配水流量具有重要意义。

针对配水渠道的轮灌组合优化, 前人提出了较多的模型^[1-6], 尽管在算法上也有一些突破, 但多是在目标函数上的相互改进, 提出了基于遗传算法^[7-8]、自适应遗传算法^[9-13]、粒子群优化算法^[14]等两级渠系条件下的优化配水模型, 有的开发了相应计算软件^[10], 也有学者基于分解协调思想建立了多级渠系配水优化模型^[11-12], 研究表明, 这些模型在解决特定配水问题具有一定的适用性。

但这些研究大多局限在配水渠道设计流量单一的情况, 未能解决实际渠道设计流量和实际配水流量不等情况下的配水问题^[4-7], 或仅仅解决了下级渠道流量不等时的配水问题^[9-13], 事实上经过调查发现绝大多数较长的渠道都是上游渠道断面比较宽, 下游断面比较窄, 也就是渠道断面呈现阶梯式变化; 在模型求解算法方面, 基本遗传算法和自适应遗传算法涉及的参数较多, 均需经验确定, 可能出现局部收敛, 使得其不一定总能获得全局最优解; 粒子群优化算法涉及的参数虽少, 但变量较多情况下的粒子编码较为复杂, 应用基本粒子群优化算法求解多变量模型时也可能收敛到局部最优解^[15-17]; 在算法编码方面, 一方面大多数研究成果采用二进制方法对变量进行编码, 需要在二进制数和实数之间进行频繁的解码转换, 耗费大量时间, 另一方面编码方法与约束函数处理紧密联系, 编码优劣直接关系到求解的速度和求解的质量, 而在多约束情况下的渠道配水问题, 现有的编码方法将产生许多的无用个体, 且计算结果不稳定、程序运行时间较长等。

为此, 本文建立了下级渠道流量不等、上级渠道断面变化时的精细化配水模型, 并应用自由搜索(free search, FS)算法^[18-20]对模型进行了求解, 以期解决多决策变量的精细化配水模型求解问题。

1 精细化配水模型的建立

精细化配水模型需要解决的主要问题是: 在灌溉周期一定的条件下, 确定上下级每条渠道的最优配水流量和配水时间, 使得每一时刻配水流量尽可能接近设计流量, 并保持上级渠道配水流量均匀, 以尽可能减少闸门调节次数和水量损失。

收稿日期: 2011-07-20 修订日期: 2011-04-20

基金项目: “十二五”国家科技支撑课题“灌溉用水实时调控技术与方法(2011BAD25B03)”; 水利部公益性行业科研专项“淮河平原区浅层地下水高效利用关键技术研究(201101010)”

作者简介: 张国华(1980-), 男, 汉族, 江苏盐城人, 高级工程师, 博士, 从事农业水土工程方面的研究。北京 中国灌溉排水发展中心, 100054。

Email: zgh311133@163.com

1.1 目标函数

设有 K 段上级渠道的设计流量和实际配水流量分别为 q_{sk} 、 q_{auik} ， $i=1, 2, \dots, T$ ， $k=1, 2, \dots, K$ ， i 为时段； N 条下级渠道的设计流量和实际配水流量分别为 q_j 、 q_{aj} ， $i=1, 2, \dots, T$ ， $j=1, 2, \dots, N$ 。以轮期 T 内所有配水时段上下两级渠道的输水渗漏损失量最小为目标建模，即

$$\text{Min}(loss) = loss_u + loss_d \quad (1)$$

$$loss_u = \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^K \left[A_{uk} \cdot L_{uk} \cdot q_{auik}^{(1-m_{uk})} \cdot t_{auik} \right] / 100 \quad (2)$$

$$loss_d = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N \left[A_j \cdot L_j \cdot q_{aj}^{(1-m_j)} \cdot t_{aj} \right] / 100 \quad (3)$$

式中， $loss_u$ 、 $loss_d$ 分别为轮期内上下两级渠道的输水渗漏损失量， m^3 ； q_{auik} 、 q_{aj} 分别为上下级渠道在 i 时段的实际配水流量， m^3/s ； A_{uk} 、 A_j 、 m_{uk} 、 m_j 分别为上下级渠道的渠床透水系数和指数； L_{uk} 、 L_j 分别为上下级渠道长度， km ； t_{auik} 、 t_{aj} 分别为上下级渠道在 i 时段的实际配水时间， s 。

1.2 约束条件

1) 时间约束：各下级渠道的配水时间应在轮期 T 内，即

$$0 \leq t_{1j} \quad (4)$$

$$t_{2j} \leq T \quad (5)$$

$$t_{aj} = t_{2j} - t_{1j} \quad (6)$$

式中， t_{1j} 、 t_{2j} 分别为第 j 条下级渠道配水开始和结束时间；其它符合意义同前。

2) 流量约束：上下级渠道的配水流量应符合渠道设计流量和最大允许流量的要求，即

$$q_{auik} \leq q_{k \max} \quad (7)$$

$$q_{auik} \approx q_{sk} \quad (8)$$

$$q_{auik} = \sum_{j=1}^N q_{aj} \cdot xx_{ij} \quad (9)$$

$$q_{aj} = \alpha_{ij} q_j \quad (10)$$

式中， $q_{k \max}$ 为第 k 段上级渠道最大允许流量，一般取 $1.2q_{sk}$ m^3/s ；为上级渠道的设计流量， m^3/s ； xx_{ij} 为开关变量，当第 j 条下级渠道第 i 时段有配水时取 1，否则取 0； α_j 为第 j 条下级渠道实际配水流量与设计配水流量的比值， $0.6 \leq \alpha_j \leq 1.0$ 。

3) 水量约束：各下级渠道的配水量应等于其配水流量与配水时间的乘积，即

$$w_j = q_{aj} \cdot t_{aj} \quad (11)$$

式中， w_j 为第 j 条下级渠道的配水量， m^3 ； t_{aj} 为下级渠道的实际配水时间， s 。

2 基于 FS 算法的模型求解

自由搜索 (free search, FS) 是由 Kalin Penev 和 Guy Littlefair 提出的一种新算法，也是一种基于群体的优化方法^[18]。Kalin Penev 和 Guy Littlefair 还通过试验对 GA、PSO、DE (differential evolution) 和 FS 四种算法的寻优能力进行了测试，对比分析结果表明 FS 具有更好的寻优

能力。本文所建立的灌溉渠系精细化配水模型变量和约束条件数达数百个，难以应用常规求解。为此，本文将 FS 算法引入到对本模型的求解中，以期快速有效的获得全局最优解。

2.1 编码设计

为减少模型约束条件数，本文第 j 条下级渠道实际配水流量与设计配水流量的比值 α_j 和第 j 条下级渠道配水结束时间 t_{2j} 为基本变量，则约束条件 (7)、(10)、(11) 自动满足要求。群体的编码结构为：

$$P = (\alpha_{i1}, \dots, \alpha_{ij}, \dots, \alpha_{iN}, t_{2i1}, \dots, t_{2ij}, \dots, t_{2iN})。$$

2.2 适应度函数构造

基于模型的目标函数 (1)，将约束条件 (8)、(9) 作为罚函数，构造模型的适应度函数

$$fit = \frac{1}{loss \cdot (cf_1 + cf_2)} \quad (12)$$

$$cf_1 = \chi \cdot \sum_{i=1}^T \left| \sum_{k=1}^K q_{sk} - \sum_{j=1}^N q_{aj} \cdot xx_{ij} \right| \quad (13)$$

$$cf_2 = \delta \cdot \sum_{i=1}^T \left| \sum_{k=k_1}^{k_2} q_{sk} - \sum_{j=j_1}^{j_2} q_{aj} \cdot xx_{ij} \right| \quad (14)$$

式中， fit 为适应度函数； cf_1 、 cf_2 为罚函数； χ 、 $\delta > 0$ 为惩罚函数作用强度系数； k_1 、 k_2 为上级渠道序号； j_1 、 j_2 为下级渠道序号。

2.3 约束条件处理

除约束条件 (4) 和 (5) 外，其他约束条件均已在编码设计和适应度函数中进行了处理。约束条件 (4) 和 (5) 的处理方法可选用以下 2 种之一

① 当 $t_{1j} < 0$ 或 $t_{2j} > T$ 时，令其适应度函数 $fit=0$ ；

② 当 $t_{1j} < 0$ ，令 $t_{1j} = 0$ ；当 $t_{2j} > T$ 时，令 $t_{2j} = T$ 。

2.4 自由搜索算法

FS 算法主要通过初始化、探查和终止 3 个步骤实现。如果满足设定的终止条件，则搜索行为结束并输出结果，具体计算过程见文献[20]。

实际计算发现，算法迭代早期 R_{II} 取较大值，后期取较小值能够提高算法的全局搜索能力。因此，本文提出每次迭代时动物群体 R_{IS} 的计算公式如下

$$R_{IS} = R_{\max} - ss(R_{\max} - R_{\min}) / SS \quad (15)$$

式中， ss 为当前迭代次数； SS 为迭代总次数； R_{\max} 、 R_{\min} 为最大和最小探索距离。

3 实例应用

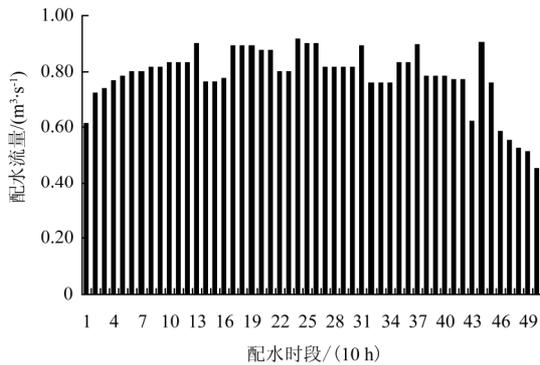
本文选用宁夏青铜峡灌区南支渠共 33 条斗渠冬灌的配水过程资料，见表 1、图 1 和图 2，对上述模型与算法进行验证，灌溉期为 21 d。

将基本资料输入本文建立的配水模型，其中，渠床透水系数 A 取 3.4，透水指数 m 取 0.5，灌水轮期为 21 d；群体规模取 500，迭代次数为 100，配水时段取 10 h；采用改进后的 FS 算法求解得到的斗渠和支渠配水过程见图 7 和图 9。应用本模型和算法后，可得到以下 3 个结论：

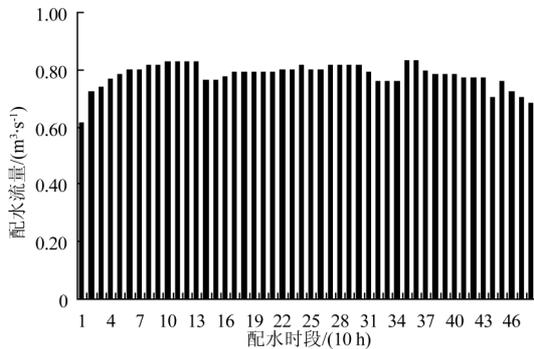
表 1 南支渠基本参数
Table 1 Basic Parameters of a Southern Branch Canal

斗渠 序号	下级渠道 (斗渠)		上级渠道 (支渠)		斗渠 序号	下级渠道 (斗渠)		上级渠道 (支渠)	
	设计流量 ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	长度/km	不同断面设计 流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	长度/km		设计流量 ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	长度/km	不同断面设计 流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	长度/km
1	0.13	0.5			12	0.016	0.5		
2	0.016	0.5	0.9	1.041	13	0.096	0.565	0.5	0.339
3	0.016	0.5			14	0.135	0.75		
4	0.38	0.216			21	0.016	0.5		
5	0.134	0.286	0.8	0.659	22	0.016	0.5		
6	0.016	0.5			23	0.016	0.5	0.2	0.493
7	0.016	0.5			24	0.016	0.5		
8	0.016	0.5			25	0.135	0.186		
9	0.089	0.485	0.7	0.394	26	0.016	0.5		
10	0.082	0.125			27	0.016	0.5		
11	0.085	0.175			28	0.016	0.5		
15	0.112	0.362			29	0.016	0.5		
16	0.016	0.5			30	0.016	0.5	0.1	0.386
17	0.016	0.5			31	0.016	0.5		
18	0.016	0.5	0.5	0.592	32	0.016	0.5		
19	0.082	0.15			33	0.016	0.5		
20	0.164	0.306							

1) 与经验配水计划相比, 斗渠配水过程搭配合理, 配水时间为 48 个时段, 即 20 d, 配水时间减少了 1 d, 见图 1。



a. 经验配水过程



b. 精细化配水过程

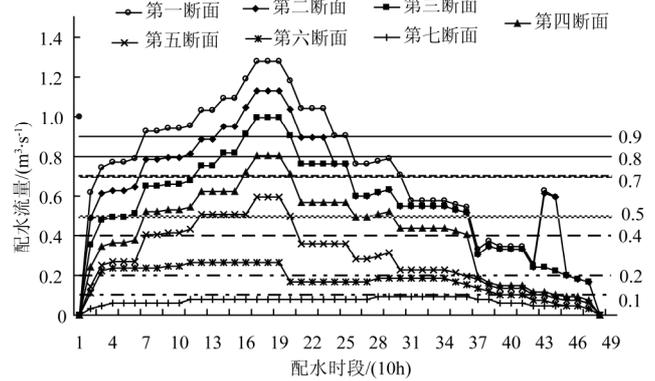
图 1 斗渠优化配水过程

Fig.1 Optimized water-distribution process of branch canal

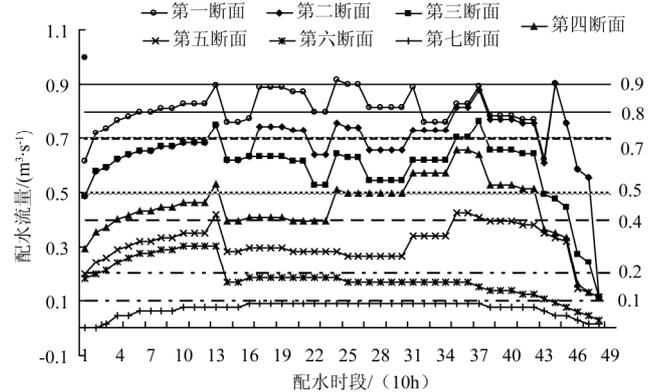
2) 与经验配水计划相比, 支渠配水流量均匀且基本在设计流量附近, 减少了支渠闸门的调节次数, 便于实际配水, 见图 2。

3) 通过计算, 比经验配水计划下的输水渗漏损失减

少了 8.26%, 表明通过本模型制定的配水方案更优。



a. 经验配水过程



b. 精细化配水过程

图 2 支渠配水过程

Fig.2 Water-distribution process of lateral canal

4 结 论

(1) 与已有成果相比, 本文建立的精细化配水模型考虑了上级渠道上下游断面水力参数的不同问题, 进一步拓宽了模型的应用范围。

(2) 并从编码设计、适应度函数构造和约束条件处理方面,建立了基于改进后的自有搜索算法的模型求解方法,为解决多变量和多约束条件下的灌溉配水优化问题提供参考。

(3) 应用结果表明,采用本文的模型和算法得到的配水方案,配水过程均匀,减少了闸门调节次数,能获得较好的配水质量,可为下级渠道流量不等、上级渠道上下游断面不同情况下的渠系精细化配水提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] Suryavanshi A R, Reddy J M. Optimal operating schedule of irrigation distribution system[J]. *Agricultural Water Management*, 1986, 11(1): 23—30.
- [2] Reddy J M, Wilamowski B, Cassel-Sharmasarkar F C. Optimal scheduling of irrigation for lateral canal[J]. *ICID*, 1999, 48(3): 1—12.
- [3] Anwar A A, Clarke D. Irrigation scheduling using mixed-integer linear programming[J]. *J Irrig Drain En*, 2001, 127(2): 63—69.
- [4] 王智, 朱凤书. 灌溉渠系流量最优调配的 0-1 规划模型[J]. *灌溉排水*, 1992, 11(3): 8—13.
Wang Zhi, Zhu Fenshu. 0-1 programming model for optimal flow regulation in irrigation canal systems[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1992, 11(3): 8—13. (in Chinese with English abstract)
- [5] 吕宏兴, 熊运章, 汪志农. 灌溉渠道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.
Lü Hongxing, Xiong Yunzhang, Wang Zhinong. Optimal model of rotation irrigation distribution channel and branch canal and delivery time[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2000, 16(6): 43—46. (in Chinese with English abstract)
- [6] 康绍忠, 蔡焕杰. 农业水管理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 303—305.
- [7] 骆莉, 袁宏源. 配水渠道轮灌组合优化模型及其遗传算法[J]. *中国农村水利水电*, 2000, 10: 11—13.
Luo Li, Yuan Hongyuan. Rotation irrigation optimization model of channel distribution and solution with genetic algorithm[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2000, 10: 11—13. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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.
Song Songbai; Lü Hongxing. Optimization model of rotation irrigation channel distribution and solution with genetic algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2004, 20(2): 40—44. (in Chinese with English abstract)
- [9] 马孝义, 刘哲, 甘学涛. 下级渠道流量不等时渠系优化配水模型与算法研究[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(5): 17—20.
Ma Xiaoyi, Liu Zhe, Gan Xuetao. Optimal water delivery scheduling model and algorithm under unequal discharges lateral channels[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(5): 17—20. (in Chinese with English abstract)
- [10] 马孝义, 于国丰, 李安强, 等. 渠系配水优化编组通用化软件的研发与应用[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(1): 119—123.
Ma Xiaoyi, Yu Guofeng, Li Anqiang, et al. Research and development of general software for optimal irrigation water distribution and its application[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(1): 119—123. (in Chinese with English abstract)
- [11] 赵文举, 马孝义, 张兴建, 等. 基于模拟退火遗传算法的渠系配水优化编组模型研究[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(5): 210—214.
Zhao Wenju, Ma Xiaoyi, Zhang Jianxing, et al. Optimal water delivery marshalling model based on simulated annealing genetic algorithm[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(5): 210—214. (in Chinese with English abstract)
- [12] 赵文举, 马孝义, 刘哲, 等. 多级灌溉渠系配水优化编组模型与算法研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 11—16.
Zhao Wenju, Ma Xiaoyi, Liu Zhe, et al. Optimal water allocation marshalling model of multilevel irrigation canal system and model Solution[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(2): 11—16. (in Chinese with English abstract)
- [13] 赵文举, 马孝义, 刘哲, 等. 基于自适应遗传算法的渠系优化配水模型研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(22): 5137—5140.
Zhao Wenju, Ma Xiaoyi, Liu Zhe, et al. Study of optimal water delivery scheduling models based on adaptive genetic algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(22): 5137—5140. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张国华, 张展羽, 邵光成, 等. 基于粒子群优化算法的灌溉渠道配水优化模型研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(8): 1004—1008.
Zhang Guohua, Zhang Zhanyu, Shao Guangcheng, et al. Optimization model for discharge distribution of irrigation channels based on particle swarm optimizer[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(8): 1004—1008. (in Chinese with English abstract)
- [15] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[C]//*IEEE Int 1 Conf on Neural Networks*. Perth Ausrealia, 1995: 1942—1948.
- [16] Eberhart R C, Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources[C]// *Proc. Congress on evolutionary computation 2001 IEEE service center*. Piscataway, NJ, Seoul, Korea, 2001: 86—93.
- [17] Eberhart R C, Shi Y. Evolving artificial neural network[A]. *Proc. 1998 Int'l Conf. on neural networks and brain*[C]// Beijing, P. R. China, 1998: 5—13.
- [18] Kalin P, GUYL1 Free search2a comparative analysis[J]. *1Information Sciences*, 2005, 172: 173—1931.
- [19] 周晖, 李丹美, 邵世煌. 一种新的群集智能算法: 自由搜索[J]. *东华大学学报: 自然科学版*, 2007, 33(5): 580—583.
Zhou Hui, Li Danmei, Shao Shihuan, et al. A novel swarm intelligent algorithm: free searc[J]. *Journal of Donghua University: natural science*, 2007, 33(5): 580—583. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王斌, 张展羽, 张国华, 等. 基于自由搜索的灌区优化配水模型研究[J]. *水利学报*, 2008, 39(11): 1239—1243.
Wang Bin, Zhang Zhanyu, Zhang Guohua, et al. Optimized water rationing model based on Free Search for irrigation

Optimization model for discharge distribution of irrigation channels based on free search algorithm

Zhang Guohua¹, Xie Chongbao¹, Pi Xiaoyu², Wang Bin³

(1. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China; 2. Water Service Bureau of Chaoyang of Beijing City, Beijing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Building Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The existing water-distribution models in irrigation canal system are established on the basis that the water discharge of the lower-level canals are equal and the cross sections of upper-level canals are unchanging with equal hydraulic power parameters, which limited the application of models. A new-type refined water-distribution model was developed, which took into account such factors as variations of water discharge of the lower canals and the conditions of section changes of the upper canals. By means of constructing reasonable fitness functions and through high-efficiency processing with the limited conditions, the model was solved based on free search algorithm. The application result showed that compared with the original way of water-distribution, water loss by this model reduced by 8.26%. As a result, the course of water-distribution was more regular and the regulating frequency of sluice gates was effectively reduced.

Key words: canals, model, algorithm, free search, refined water-distribution