

引用格式:

吕石磊, 卢思华, 魏志威, 李震, 吴奔雷. 基于双频蝙蝠算法的树状灌溉管网规划[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(1): 99-106.

LYU S L, LU S H, WEI Zhiwei, LI Z, WU B L. Planning of Tree-type irrigation pipe network based on the dual-frequency bat algorithm[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2020, 46(1): 99-106.

投稿网址: http://xb.hunau.edu.cn



## 基于双频蝙蝠算法的树状灌溉管网规划

吕石磊<sup>1,2</sup>, 卢思华<sup>1</sup>, 魏志威<sup>1</sup>, 李震<sup>1,2\*</sup>, 吴奔雷<sup>1</sup>

(1.华南农业大学电子工程学院, 广东 广州 510642; 2.国家柑橘产业技术体系机械化研究室, 广东 广州 510642)

**摘要:**以管网投资费用最低为目标,建立了改进的自压树状灌溉管网规划模型,通过定义管网用水节点的上层水节点来保证管道连通性;同时,提出了改进的双频蝙蝠算法,通过使用双脉冲频率策略均衡算法多样性与收敛性。基于12个100维度测试函数的寻优结果表明,与遗传算法、粒子群算法及蝙蝠算法相比,双频蝙蝠算法能够有效提高全局搜索能力;应用双频蝙蝠算法分别对10节点和34节点的管网进行规划设计,管网投资费用均值较蝙蝠算法可分别减少23.60%和31.03%。

**关键词:**自压树状灌溉管网;管网部署;双频蝙蝠算法

中图分类号: TP301.6; S274.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2020)01-0099-08

## Planning of tree-type irrigation pipe network based on the dual-frequency bat algorithm

LYU Shilei<sup>1,2</sup>, LU Sihua<sup>1</sup>, WEI Zhiwei<sup>1</sup>, LI Zhen<sup>1,2\*</sup>, WU Benlei<sup>1</sup>

(1.College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 2.Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

**Abstract:** An improved planning model of tree-type irrigation pipe network is proposed with the purpose of minimizing the expenditure of construction. Pipeline connectivity is guaranteed by using the concept of high-level nodes. Meanwhile, an improved dual-frequency bat algorithm(DFBA) is proposed to balance the diversity and convergence of the proposed algorithm by dual-frequency strategy. The optimization 100 dimension results of 12 test functions indicate that the DFBA can enhance global search capability effectively in comparison to the genetic algorithm, the particle swarm optimization algorithm and the original bat algorithm. Finally, planning experiments are performed on 2 pipe network cases, which consist of 10 nodes and 34 nodes respectively. Compared to the original bat algorithm, the mean values of investment cost obtained using the DFBA can be reduced by 23.60% in the pipe network of 10 nodes, and 31.03% in the pipe network of 34 nodes, respectively.

**Keywords:** tree-type pipe network; pipe network layout; dual-frequency bat algorithm

灌溉管网是农业节水工程的重要组成部分<sup>[1]</sup>。树状管网结构简单、节省管材,是灌溉管网的主要部署形式,规划设计以管网投资费用最低为目标,

包括管网部署规划和管道管径优化<sup>[2]</sup>。其中,管网部署规划以用水节点之间的管道部署为决策变量,寻求满足管网管道连通性的解决方案<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2019-08-22

修回日期: 2019-10-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(61601189, 31971797); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-26); 广东省科技计划项目(2016A020210088); 广州市科技计划项目(201803020037)

作者简介: 吕石磊(1984—),男,河北石家庄人,博士,副教授,主要从事农业信息化研究,lvshilei@scau.edu.cn; \*通信作者,李震,博士,教授,主要从事机电一体化技术应用研究,lizhen@scau.edu.cn

业界曾探索应用神经网络<sup>[5]</sup>、图论<sup>[6]</sup>等方法来解决管网部署规划问题,并使用遗传算法(GA)<sup>[7]</sup>、粒子群算法(PSO)<sup>[8]</sup>等及其改进算法对管径进行优化设计。马孝义等<sup>[9]</sup>提出了基于整数编码 GA 算法的两级管网设计方法;杨建军等<sup>[10]</sup>基于环路方法生成了初始管网部署方案,使用 GA 算法对管道管径进行设计。这些研究本质上是对树状灌溉管网依次进行管网部署规划和管道管径优化设计,但未考虑二者之间的协调关系。现阶段,业界将管网规划设计问题描述为以用水节点之间的管网部署和管径尺寸为决策变量的离散组合优化问题,并使用智能优化算法对管网进行综合设计。李海滨等<sup>[11]</sup>提出了管网部署与管道管径同步设计的管网规划模型。在此基础上,IBRAHIM 等<sup>[12]</sup>使用 PSO 算法求解了该管网规划模型;邱金亮等<sup>[13]</sup>研究了灌溉作业制度对管网设计的影响;朱成立等<sup>[14]</sup>使用蚁群算法对管网部署和管径优化进行了综合设计;AFSHAR 等<sup>[15]</sup>使用了启发策略来解决给水管网的规划设计问题。这些研究多使用智能优化算法对管网规划进行同步设计,但是使用的管网规划模型未考虑用水节点之间的连通性问题,需要工程人员结合设计经验,事先提供管网的初步连接图,降低了管网规划模型的通用性。

笔者以自压树状灌溉管网为研究对象,以管网投资费用最低为目标,综合考虑管道部署和管径优化问题,寻求满足管网特定约束条件和管道连通性的最小应用成本方案,提出基于上层水节点的树状管网规划模型,并且提出改进智能优化算法对规划模型进行求解,以此来得到高效实用的树状管网规划设计方法。

## 1 自压树状管网规划模型的设计

### 1.1 管网规划模型

自压树状灌溉管网由水源点、用水节点及与节点之间的连接管道组成。在已知用水节点位置的情况下,管网设计可被描述为以管道长度为边、求解满足目标条件的加权有向图问题。以管网投资费用最低为目标,依据文献[8-13],建立管网规划模型。

$$\min Ic = \sum_{i=1}^N f(D_i, L_i) = \sum_{i=1}^N (\alpha + \beta D_i^\gamma) L_i \quad (1)$$

式中:  $Ic$  为管网投资费用(元);  $N$  为用水节点

之间的连接管道数量;  $D_i$  和  $L_i$  分别是管道  $i$  的管径(mm)和管长(m);  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  分别为管道造价系数和指数。

管网用水节点压力约束、管道流速约束和管径约束分别如式(2)、式(3)、式(4)所示。

$$E_w - \sum_{k=1}^{k(i)} \omega \theta \frac{Q_i^m}{D_i^n} L_i - G_i - P_i = 0 \quad (2)$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (3)$$

$$D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max} \quad (4)$$

式中:  $E_w$  为水源点的水面标高(m);  $k(i)$  为水源点与管道  $i$  之间的连接管道数量( $i=1,2,\dots,N$ );  $\omega$  为管网局部水头损失系数;  $\theta$ 、 $m$ 、 $n$  表示与管材有关的管道水头损失系数;  $Q_i$  为管道  $i$  流量( $\text{m}^3/\text{h}$ );  $G_i$  为管道  $i$  流入的用水节点地面高程(m),  $P_i$  为该用水节点允许的最低水压(m);  $V_{\max}$  和  $V_{\min}$  分别为管道  $i$  允许的最大和最小流速(m/s);  $D_{\max}$  和  $D_{\min}$  分别为管道  $i$  可使用的最大和最小管径(mm)。

### 1.2 模型分析与改进

现有的解决方法均需要根据工程设计经验生成管网初步连接图<sup>[9-13]</sup>来保证管道连通性。通过引入上层水节点,笔者将最小管网投资费用问题转换为对用水节点及其对应不同上层水节点的选择组合问题,以此来保证管道连通性,无需管网初步连接图,以提高管网规划模型的扩展性。

1) 根据树状灌溉管网的单点供水原则<sup>[9]</sup>,若管网除水源点外存在  $N$  个用水节点,则一定存在  $N$  条连接管道,因此,为保证管网的管道连通性,对于任一用水节点  $N_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ),有且只有 1 条连接管道  $i$  与之相连,并向其供水。

2) 记与管道  $i$  另一端相连的节点为  $N_h$  ( $h \neq i$ ),则节点  $N_h$  为节点  $N_i$  的上层水节点,即水流通过管道  $i$ ,由节点  $N_h$  流向  $N_i$ 。若节点  $N_h$  为水源点,则根据管网的节点压力约束可知,自压树状灌溉管网水源点的水面标高  $E_w$  应大于节点  $N_i$  的地面高程  $G_i$ ,如式(2)所示;若节点  $N_h$  不为水源点,从增加管网鲁棒性角度出发,令  $G_h > G_i$ ,则使得在水源点不作业或发生故障的情况下,管网分支仍有可能独立工作:因此,为保证管道连通性,对于任一用水节点  $N_i$ ,有且只有 1 个上层水节点  $N_h$  通过管道  $i$  向其供水,并且  $G_h > G_i$ 。

以用水节点为决策变量,综合考虑管道长度和

管径尺寸,保证管网的管道连通性,提高管网的作业鲁棒性。记树状灌溉管网的水源点  $N_0$  参数为  $(x_0, y_0, E_w)$ , 用水节点  $N_i$  参数为  $(x_i, y_i, G_i)$  ( $i=1, 2, \dots, N$ )。其中,  $(x_i, y_i)$  为节点地面坐标,  $G_i$  为节点地面高程。对于任一用水节点  $N_i$ , 其可用的上层水节点集合  $S_i$  如式(5)所示。

$$S_i = \{N_0, N_h | G_h \geq G_i\} \quad (h=1, 2, \dots, N, h \neq i) \quad (5)$$

则对于该节点  $N_i$ , 一定存在 1 个上层水节点  $N_h \in S_i$  二者连接管道  $i$  的长度  $L_{ih}$  可通过式(6)得到。

$$L_{ih} = \sqrt{(x_i - x_h)^2 + (y_i - y_h)^2 + (G_i - G_h)^2} \quad (6)$$

记管道  $i$  的管径为  $D_{ih}$ , 则改进的管网规划模型如式(7)所示。

$$\min Ic = \sum_{i=1}^N f(D_{ih}, L_{ih}) = \sum_{i=1}^N (\alpha + \beta \times D_{ih}^\gamma) \times L_{ih} \quad (7)$$

## 2 双频蝙蝠算法

### 2.1 双脉冲频率策略

笔者提出在蝙蝠算法(BA)<sup>[16]</sup>全局搜索操作中加入双脉冲频率策略,即双频蝙蝠算法(DFBA)。DFBA 算法使用双脉冲频率,即  $f_1$  和  $f_2$  分别表征个体最优解和群体最优解对蝙蝠  $i$  位置更新过程的影响;同时,  $f_1$  和  $f_2$  随当前目标函数的适应值和算法的迭代进程进行参数自适应学习。DFBA 算法的全局搜索操作如式(8)、式(9)、式(10)所示。

$$v_i^t = \omega_b v_i^{t-1} + f_1 r_1 (h_* - x_i^{t-1}) + f_2 r_2 (x_* - x_i^{t-1}) \quad (8)$$

$$f_1 = \alpha_b (1 - e^{-|F_1 - F_2|}) + \gamma_b (1 - k) + f_{\min} \quad (9)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + \mu v_i^t \quad (10)$$

式(8)中:  $t$  为当前迭代次数;  $v_i^t$ 、 $x_i^t$  分别表示蝙蝠  $i$  更新后的速度参数与位置参数;  $\omega_b$  为速度参数的递减权重系数,  $\omega_b$  较大,保证了算法前期具有较强的全局搜索能力,  $\omega_b$  较小,使算法后期具有较强的局部搜索能力;  $h_*$  为蝙蝠  $i$  的当前个体最优解;  $x_*$  为蝙蝠群体的当前全局最优解;  $r_1$  和  $r_2$  为(0.5, 1.5)范围内的随机数。

式(9)中:  $F_1$  为蝙蝠群体的当前函数适应值均值;  $F_2$  为当前最优蝙蝠个体的函数适应值;  $k = t/t_{\max}$  为算法迭代进程的评价指数,  $t_{\max}$  为算法最大迭代次数, 则  $k \in (0, 1]$ ;  $f_{\min}$  为常数,用于约束参数  $f_1$  的最小值;参数  $f_1$  主要受目标函数适应值和算法迭代进程的影响,二者权重系数分别为正常数  $\alpha_b$  和  $\gamma_b$ ;若记参数  $f_1$  与  $f_2$  之和为常数  $A$ , 则  $f_2 = A - f_1$ 。随着算法迭代进程变化,参数  $f_1$  取值将从  $A$  递减为  $f_{\min}$ ,

参数  $f_2$  取值将从 0 递增至  $A - f_{\min}$ 。在算法前期,参数  $f_1$  较大,能够增加蝙蝠群体的多样性,从而增强算法的全局搜索能力;在算法后期,  $f_2$  较大,能够保证算法具有较好的收敛性。

式(10)中:  $\mu$  为位置参数的递减权重系数,用于约束蝙蝠  $i$  全局搜索操作的更新步长,取值范围为(0, 1]。

### 2.2 自适应局部搜索策略

对于蝙蝠  $i$ ,生成随机数  $\beta_i \in [0, R_{\max}]$ ,若  $\beta_i < R_i^t$ , 则蝙蝠  $i$  将进行局部搜索操作,如式(11)、式(12)所示。因为脉冲发射频率  $R$  将随着算法迭代进程变化而增大,则蝙蝠群体在算法后期进行局部搜索操作的概率也将随之增大。

$$x_i^t = x_* + \delta V_r A' g(k) \quad (11)$$

$$g(k) = a_g e^{-\sum_{j=1}^J b_j k^j} \quad (12)$$

式(11)、式(12)中:  $x_*$  为蝙蝠群体的当前全局最优解;  $\delta \in [-1, 1]$  为随机向量;  $V_r$  为目标函数可行解域的边界距离与蝙蝠群体数量的比值向量,目的是使局部搜索步长随待求解问题的规模自适应变化;  $A'$  为蝙蝠群体的当前脉冲响度均值。  $g(k)$  为随算法迭代进程变化的指数递减函数,用于约束蝙蝠  $i$  局部搜索操作的更新步长,如式(12)所示。

记蝙蝠群体数量为  $N_b$ ,进行局部搜索操作的概率为  $\lambda$ ,则蝙蝠群体单次迭代计算的时间复杂度为  $O((1+\lambda) \times N_b)$ ,其中  $0 < \lambda < 1$ 。记算法迭代次数为  $M_b$ ,则 DFBA 算法的时间复杂度为  $O((1+\lambda) \times M_b \times N_b)$ 。

### 2.3 双频蝙蝠算法性能测试

使用 12 个测试函数来分析算法性能,如表 1 所示。其中,  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $\dots$ 、 $f_5$  为单峰函数,  $f_6$ 、 $f_7$ 、 $\dots$ 、 $f_{12}$  为多峰函数。测试环境: Microsoft Windows 7 Pro 64-bit, Intel® Core™ i7-7500U @ 2.70 GHz, 8.0 GB RAM, Matlab R2016b。对照 GA 算法<sup>[17]</sup>、PSO 算法<sup>[18]</sup>、BA 算法<sup>[16]</sup>、DBA 算法<sup>[19]</sup>、IBA 算法<sup>[20]</sup>的参数设置同原文献。

在 DFBA 算法中,速度参数权重系数随算法迭代进程变化线性递减,  $\omega_{b\max}=0.9$ ,  $\omega_{b\min}=0.1$ ;脉冲频率权重系数  $\alpha_b=1$ ,  $\gamma_b=1.5$ ;双脉冲频率之和  $SF=3$ ,  $f_{\min}=0.5$ ,  $f_{\max}=2.5$ ;位置参数权重系数随算法迭代进程变化线性递减,  $\mu_{\max}=0.7$ ,  $\mu_{\min}=0.3$ ;局部搜索操作函数  $g(k)$  的系数为  $J=2$ ,  $a_g=2.1766$ ,  $b_1=-2.0886$ ,  $b_2=27.3349$ ;算法其余控制参数为  $A_{\min}=0.3$ ,  $R_{\max}=0.7$ 。

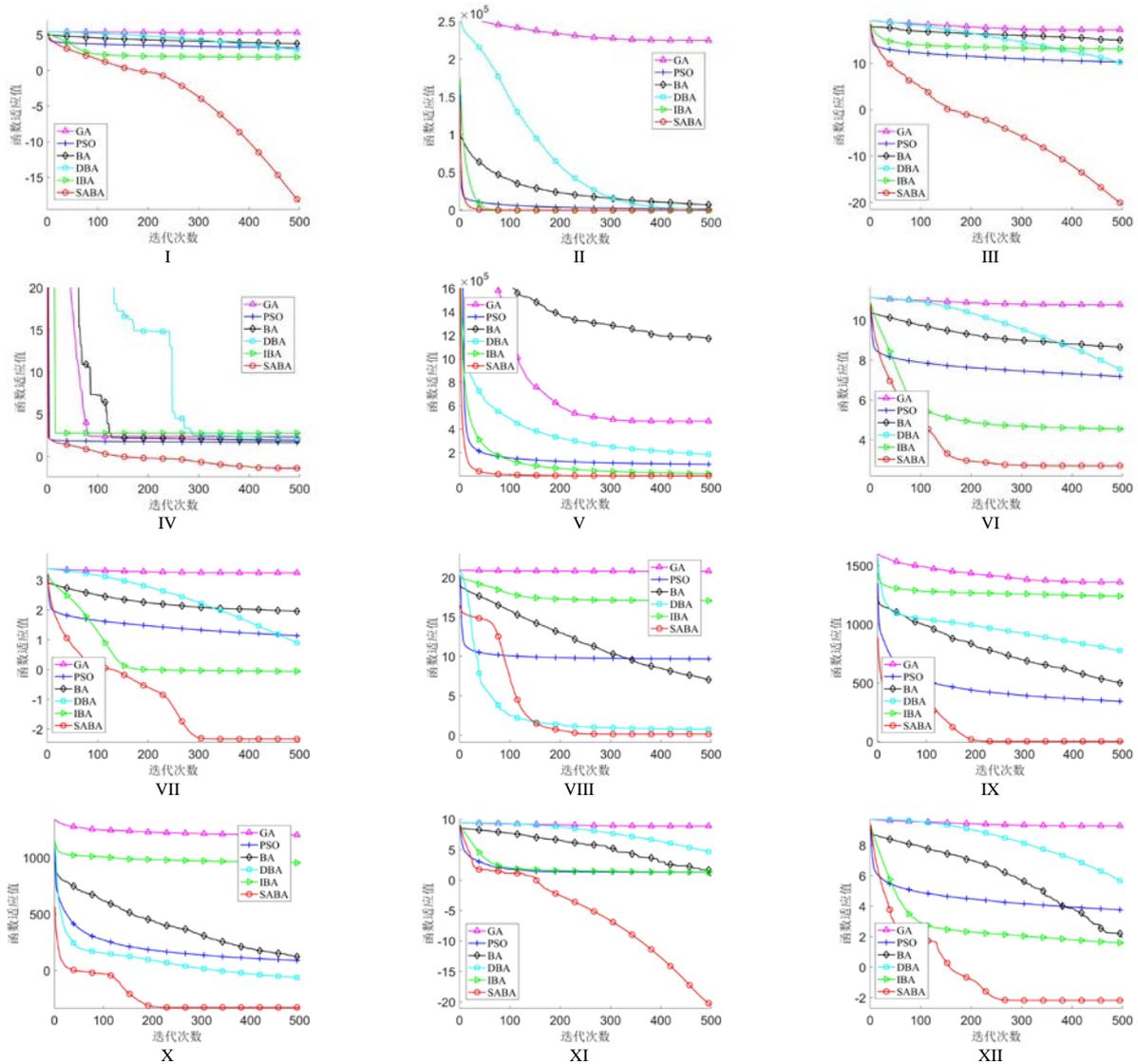
各算法种群规模均为 50,最大迭代次数均为

500 次，独立运行 50 次。基于 100 维度函数适应值均值的迭代曲线如图 1 所示，部分结果使用了对数化处理。在单峰函数( $f_1 \sim f_5$ )中，PSO 算法优于 BA 算法和 GA 算法；在多峰函数( $f_6 \sim f_{12}$ )中，BA 算法和 PSO 算法的寻优结果互有优劣。DBA 算法在单峰函数中有较好的求解精度，IBA 算法在多峰函数( $f_{11} \sim f_{12}$ )中表现出一定优势。与对照算法相比，DFBA 算法的求解精度和收敛速度均具有较大优势。在多峰函数( $f_6 \sim f_{12}$ )中，DFBA 算法曲线出现了不同程度的“陡降”，这主要是因为 DFBA 算法后期增加了局部搜索操作概率，并且使用较小步长在蝙蝠群体的当前全局最优解附近进行搜索，因而有助于提高算法的求解精度。

表 1 测试函数

Table 1 Test functions

序号	测试函数	理论最优值	可行解域
$f_1$	Sphere	0	$[-100,100]$
$f_2$	Shifted Sphere	-450	$[-100,100]$
$f_3$	Zakharov	0	$[-10,10]$
$f_4$	Schwefel	0	$[-10,10]$
$f_5$	Shifted Schwefel	-450	$[-100,100]$
$f_6$	Shifted Rosenbrock	390	$[-100,100]$
$f_7$	Griewank	0	$[-600,600]$
$f_8$	Ackley	0	$[-32,32]$
$f_9$	Rastrigin	0	$[-5.12,5.12]$
$f_{10}$	Shifted Rastrigin	-330	$[-5,5]$
$f_{11}$	Penalized 1	0	$[-50,50]$
$f_{12}$	Penalized 2	0	$[-50,50]$



I~XII分别表示函数 $f_1, f_2, \dots, f_{12}$

图 1 100 维度测试函数适应值曲线

Fig.1 Fitness curves of 100D test functions

### 3 基于双频蝙蝠算法的树状管网设计

#### 3.1 构建规划模型解空间

管网规划模型决策变量包括用水节点  $N_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ )与上层水节点  $N_h$  ( $h=1,2,\dots,N, h\neq i$ )之间的连接管道长度  $L_{ih}$ 和管道管径  $D_{ih}$ ,因此,规划模型的解空间为  $\{L_{ih},D_{ih}\}$ 。若管网存在  $N$  个用水节点,则解空间维度为  $2N$ 。由式(5)、式(6)可知,管道长度  $L_{ih}$  为离散变量,受市场标准限制,管道管径  $D_{ih}$  也为离散变量。由于 DFBA 算法的变量为连续参数,因此需对算法解空间进行离散化处理。

对于连接管道长度  $L_{ih}$ ,需在用水节点  $N_i$  的上层水节点集合  $S_i$  中选择上层水节点  $N_h$ ,则在算法解空间中存在对应解  $x_l \in [0,1]$ ,  $x_l$  与  $N_h$  在集合  $S_i$  中序号  $T_L$  的对应关系如式(13)所示。对于管道管径  $D_{ih}$ ,在算法解空间中存在对应解  $x_d \in [0,1]$ ,根据式(13)可确定管道管径集合  $R$  中序号  $T_D$ 。

$$\begin{cases} 0 & x_l < \sum_{m=1}^{T_L} \frac{1}{|S_i|} & T_L = 1 \\ \sum_{m=1}^{T_L-1} \frac{1}{|S_i|} & x_l < \sum_{m=1}^{T_L} \frac{1}{|S_i|} & T_L = 2,3,\dots,|S_i| \\ 0 & x_d < \sum_{m=1}^{T_D} \frac{1}{|R|} & T_D = 1 \\ \sum_{m=1}^{T_D-1} \frac{1}{|R|} & x_d < \sum_{m=1}^{T_D} \frac{1}{|R|} & T_D = 2,3,\dots,|R| \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $|S_i|$  表示集合  $S_i$  中元素数量,  $|R|$  表示集合  $R$  中元素数量。

由于管网中所有的用水节点均需满足节点压力约束条件,笔者使用罚函数将管网规划模型和约束条件转换为无约束的目标函数,如式(14)所示。

$$\min F = \sum_{i=1}^N (\alpha + \beta \times D_{ih}^{\gamma}) \times L_{ih} + h(t) \times H \quad (14)$$

式中:  $h(t) = \varphi \sqrt{t}$ ,  $\varphi$  为随算法迭代进程变化的

递增权重系数,  $\varphi_{\max}=5\ 000$ ,  $\varphi_{\min}=1$ ;  $H$  为根据节点压力约束条件构建的罚函数因子,参数设置同文献[21]。基于 DFBA 算法的管网设计流程如下。

步骤 1: 初始化树状灌溉管网的节点参数,根据式(5)构建各用水节点的上层水节点集合。若管网中存在多个地面高程相等的用水节点,则分别计算各用水节点与其上层水节点集合的距离均值,均值最小的用水节点将优先成为其他用水节点的上层水节点。

步骤 2: 初始化 DFBA 算法参数,构建基于 DFBA 算法的可行解空间。

步骤 3: 根据式(8)、式(9)、式(10)计算 DFBA 算法迭代解;若蝙蝠个体满足局部搜索条件,根据式(11)、式(12)进行算法局部搜索操作。

步骤 4: 根据式(13),对 DFBA 算法的可行解空间进行离散化处理,确定各用水节点的上层水节点及管道管径;根据式(6),计算连接管道长度,构建管网规划模型可行解空间。

步骤 5: 根据式(14),计算管网投资费用,基于函数适应值更新算法的全局最优解。

步骤 6: 判断是否达到终止条件,如不满足终止条件,则转至步骤 3。

#### 3.2 设计案例

分别使用 GA 算法、PSO 算法、BA 算法和 DFBA 算法对管网案例进行设计。管网包括 1 个水源点和 9 个用水节点,节点架构同文献<sup>[6,9,11-12]</sup>。由于提出的管网设计方法通过选择用水节点的上层水节点来保证管网部署的管道连通性,并且使用节点参数自行计算管道连接长度,因而无需使用管网初步连接图。管网节点参数与管道单价如表 2 所示。在目标函数式(14)中,管道造价参数可通过表 3 数据的拟合计算

表 2 10 节点管网参数

Table 2 The parameters of pipe network with 10 nodes

节点序号	坐标 x/m	坐标 y/m	地面高程 G/m	节点流量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	管径/mm	单价/(元·m <sup>-1</sup> )
0	737	1 305	220	-245	50	2.5
1	272	1 147	190	25	75	3.6
2	863	899	193	30	90	4.5
3	1 459	1 168	191	30	110	6.2
4	1 831	741	190	30	125	7.0
5	460	656	191	30	140	8.6
6	1 219	664	190	25	160	11.0
7	1 534	118	189	25	180	13.0
8	287	281	189	25	200	15.6
9	1 001	347	189	25	225	19.2

得到,即管道造价系数  $\alpha=1.5, \beta=5.37 \times 10^{-4}$ ,管道造价指数  $\gamma=1.92^{[9,11]}$ ;在管网用水节点压力约束式(2)中,局部水头损失系数  $\omega=1.1$ ,以硬质塑料管材为标准,管道水头损失系数  $\theta=9.48 \times 10^4, m=1.77, n=4.77$ ;各节点的最低水压  $P=10 \text{ m}$ ;在管道流速约束式(3)中,  $V_{\max}=3 \text{ m/s}, V_{\min}=0.5 \text{ m/s}$ 。

各算法的种群规模均为 50,最大迭代次数均为 500 次,独立运行 50 次。各算法基于目标函数式(14)的设计结果,包括管网投资费用最优解、均值和最差解,如表 3 所示。结果表明,基于 PSO 算法的设计结果优于 GA 算法;BA 算法在离散组合优化过程中存在易于陷入局部最优的问题。与之相比,基于 DFBA 算法的管网设计可得到稳定的最优结果,管网投资费用的最优解为 20 900 元,其均值较 BA 算法均值减少了 23.60%。设计结果表明 DFBA 算法有效减少了算法陷入局部最优的概率,从而具有良好的算法性能;因此,基于 DFBA 算法的管网设计方法具有较好的精准性。

表 3 10 节点管网各算法的投资费用

Table 3 The investment cost of various algorithms in for 10 nodes network

算法	最优解/元	均值/元	最差解/元
GA	21 017	23 755	27 827
PSO	21 489	22 914	25 586
BA	23 585	28 798	31 663
DFBA	20 900	22 001	23 959

使用 DFBA 算法可得到若干管网最优设计结果,其中之一如图 2 所示,图中节点架构表明,各用水节点及其对应上层水节点的组合关系,如节点 6 7 表示节点 6 为节点 7 的上层水节点。节点 2 3、节点 6 4 之间的水流流向与原文献<sup>[6,9,11-12]</sup>中管网节点的初步连接关系不同,这是因为笔者提出的管网规划模型能够根据节点参数自行计算连接关系,设计结果不受管网初步连接图的限制。在计算过程中,得到符合文献管网节点初步连接关系的最优设计结果(图 2)所示,管网投资费用最优解为 21 585 元,均值为 24 227 元,均值较 DFBA 算法增加了 9.19%。由此说明,笔者提出的设计方法具有更好的通用性。

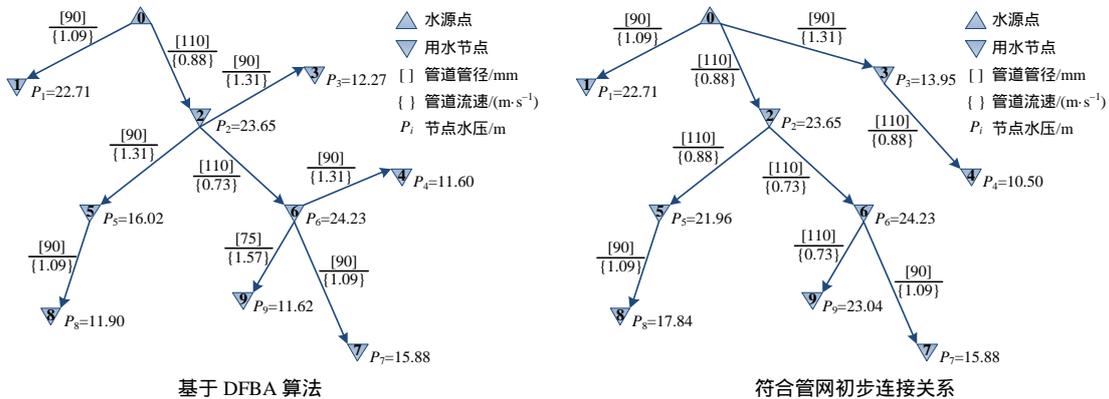


图 2 10 节点管网最优设计结果

Fig.2 Pipe network planning results with 10 nodes

### 3.3 扩展案例

由于现有解决方法需使用管网初步连接图,随着管网规模的扩大,即增加管网节点,该项准备工作的难度将随之增大;同时,增加节点使得规划模

型的可行解空间呈指数式增大,从而对模型最优解的搜索难度也将随之增大。为进一步验证设计方法的扩展性,扩展案例使用的管网包括 1 个水源点和 33 个用水节点,各节点参数如表 4 所示。

表 4 34 节点的管网参数

Table 4 The parameters of pipe network with 34 nodes

节点序号	坐标 x/m	坐标 y/m	地面高程 G/m	节点流量 Q/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	节点序号	坐标 x/m	坐标 y/m	地面高程 G/m	节点流量 Q/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
0	2 085	1 320	250	-790	17	1 411	1 703	225	30
1	1 810	1 470	238	30	18	2 184	521	224	25
2	2 586	1 510	237	30	19	575	734	223	20

表 4(续)

节点序号	坐标 x/m	坐标 y/m	地面高程 G/m	节点流量 Q/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	节点序号	坐标 x/m	坐标 y/m	地面高程 G/m	节点流量 Q/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
3	1 535	431	236	25	20	2 420	1 150	221	25
4	2 210	1 165	235	30	21	611	1 335	221	25
5	1 570	689	235	25	22	1 363	1 511	221	25
6	2 681	1 570	235	30	23	2 681	377	220	20
7	1 727	920	234	20	24	2 339	1 652	220	20
8	427	1 765	234	25	25	1 121	1 250	219	20
9	1 649	1 389	232	30	26	1 435	1 359	219	25
10	1 906	899	231	25	27	2 071	1 143	218	25
11	373	1 209	231	25	28	2 408	851	217	25
12	976	1 455	230	25	29	964	1 637	216	20
13	1 008	725	227	25	30	2 259	925	216	20
14	2 190	1 031	227	20	31	1 785	1 098	216	20
15	1 230	1 373	226	20	32	1 329	769	215	20
16	870	1 922	225	20	33	2 018	421	214	20

基于各算法的管网投资费用列于表 5。基于 PSO 算法的设计结果优于 GA 算法和 BA 算法。与之相比,基于 DFBA 算法的管网设计仍可得到稳定的最优结果,管网投资费用的最优解为 107 091 元,其均值较 BA 算法均值减少了 31.03%。表明基于 DFBA 算法的管网设计方法具有较好的扩展性。为进一步提高设计方法的实用性,笔者设计了一套基于 DFBA 算法的树状灌溉管网设计软件系统,在输入管网节点参数并设置相关算法参数后,该系统将自动完成管网智能设计过程并输出结果。基于 DFBA 算法的扩展案例设计结果如图 3 所示。

表 5 34 节点管网各算法的投资费用

Table 5 The investment cost of various algorithms for pipe network with 34 nodes

算法	最优解/元	均值/元	最差解/元
GA	122 725	145 951	177 794
PSO	120 743	140 391	167 204
BA	169 991	185 806	203 343
DFBA	107 091	128 158	148 015

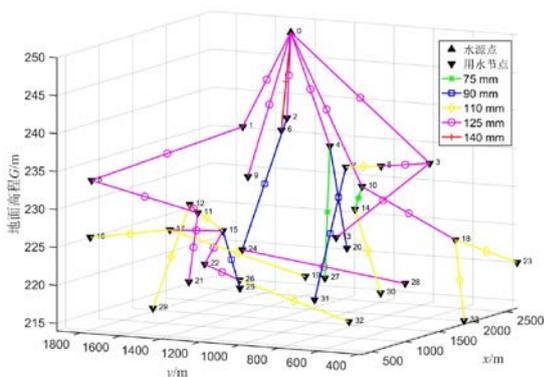


图 3 基于 DFBA 算法的 34 节点树状灌溉管网

Fig.3 The tree-type irrigation pipe network planning with 34 nodes using the DFBA

### 4 结论

笔者提出了改进的自压树状灌溉管网规划模型,并通过 2 个不同拓扑结构的管网案例验证了基于 DFBA 算法的管网设计方法的有效性。研究结果表明:改进管网规划模型,能够通过对比用水节点与上层水节点的不同组合来保证树状灌溉管网的管道连通性,不需要使用管网初步连接图,具有较好的通用性与扩展性。

测试函数验证了基于双频脉冲策略的 DFBA 算法具有较好的全局搜索能力和寻优精度,管网案例验证了基于 DFBA 算法的管网设计方法能够有效减少管网投资费用,具有较好的实用性。

树状灌溉管网规划设计问题较为复杂,单一模型难以全面描述管网的多变性特点。提出的设计方法能够在使用不同规划模型的情况下,应用 DFBA 算法,通过寻找用水节点及其对应上层水节点的最佳组合来自行完成设计过程。后续将进一步研究基于不同部署形式的规模化灌溉管网智能规划作业方法。

### 参考文献:

[1] ALEXIOU D, TSOUROS C . Design of an irrigation network system in terms of canal capacity using graph theory[J/OL] . Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2017, 143(6) : 06017002 .  
 [2] 杨建军,战红,丁玉成 . 基于圈的单水源树状管网优化改进遗传算法[J] . 排灌机械工程学报, 2010, 28(2) : 164-168 .  
 YANG J J, ZHAN H, DING Y C . Improved genetic

- algorithm for optimization of single source tree-type pipe network based on cycle[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28(2): 164-168.
- [3] 马雪琴, 吕宏兴, 朱德兰, 等. 基于遗传算法的树状灌溉管网优化设计[J]. *中国农村水利水电*, 2013(4): 50-52.
- MA X Q, LYU H X, ZHU D L, et al. Tree-type pipe network optimization design based on genetic algorithm[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013 (4): 50-52.
- [4] 马朋辉, 李援农, 胡亚瑾, 等. 基于和声搜索算法的自压式树状管网优化设计[J]. *中国农村水利水电*, 2016(6): 14-18.
- MA P H, LI Y N, HU Y J, et al. Optimal design of gravity tree-type pipe network based on harmony search algorithm[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016 (6): 14-18.
- [5] 周荣敏, 林性粹. 压力输水树状管网遗传优化布置和神经网络优化设计[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 41-44.
- ZHOU R M, LIN X C. Genetic optimization layout and artificial neural networks optimal design of pressurized tree water-pipe network[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(1): 41-44.
- [6] 周荣敏, 雷延峰. 基于改进单亲遗传算法的树状管网布置优化[J]. *水利学报*, 2012, 43(10): 1243-1247.
- ZHOU R M, LEI Y F. Optimal layout of tree pipe networks based on improved single parent genetic algorithm[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(10): 1243-1247.
- [7] 王新坤. 基于不可行度的机压树状管网退火遗传算法优化[J]. *农业机械学报*, 2009(9): 63-67.
- WANG X K. Optimization of pumping tree pipe network by using annealing-genetic algorithms based on infeasible degree[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2009 (9): 63-67.
- [8] BABU K S J, VIJAYALAKSHMI D P. Self-adaptive PSO-GA hybrid model for combinatorial water distribution network design[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2012, 4(1): 57-67.
- [9] 马孝义, 范兴业, 赵文举, 等. 基于整数编码遗传算法的树状灌溉管网优化设计方法[J]. *水利学报*, 2008, 39(3): 373-379.
- MA X Y, FAN X Y, ZHAO W J, et al. Tree-type pipe network optimization design method based on integer coding genetic algorithm[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(3): 373-379.
- [10] 杨建军, 丁玉成, 赵万华. 基于双重编码遗传算法和图论的自压树状管网优化[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(1): 81-85.
- YANG J J, DING Y C, ZHAO W H. Optimization of Gravity tree-type pipe network based on dual coding genetic algorithm and graph theory[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2010, 41(1): 81-85.
- [11] 李海滨, 马孝义, 赵文举, 等. 树状管网布置与管径同步优化方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(11): 3180-3183.
- LI H B, MA X Y, ZHAO W J, et al. Layout and diameter simultaneous optimization method of tree pipe network[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(11): 3180-3183.
- [12] IBRAHIM M, LI H B, LIU Y, et al. Optimization of tree pipe networks layout and size, using particle swarm optimization[J]. *Wseas Transactions on Computers*, 2014, 13: 219-230.
- [13] 邱金亮, 王静, 左传英, 等. 基于组合遗传算法的树状管网整体优化设计模型[J]. *中国农村水利水电*, 2013(9): 26-28, 32, 36.
- QIU J L, WANG J J, ZUO C Y, et al. Tree pipe network optimization design method based on combined genetic algorithm[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013 (9): 26-28, 32, 36.
- [14] 朱成立, 谢志远, 柳智鹏. 基于蚁群算法的灌溉管网布置与管径优化设计研究[J]. *江西农业学报*, 2015, 27(3): 93-96.
- ZHU C L, XIE Z Y, LIU Z P. Research on layout of irrigation pipe network and optimized design of pipe diameter based on ant colony algorithm[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2015, 27(3): 93-96.
- [15] AFSHAR M H, AKBARI M, MARIÑO M A. Simultaneous layout and size optimization of water distribution networks: engineering approach[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2005, 11(4): 221-230.
- [16] YANG X S, HOSSEIN G A. Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization[J]. *Engineering Computations*, 2012, 29(5): 464-483.
- [17] PARSOPOULOS K E, VRAHATIS M N. Particle swarm optimization method for constrained optimization problems[J]. *Intelligent Technologies-Theory and Application: New Trends in Intelligent Technologies*, 2002, 76(1): 214-220.
- [18] DAMOUSIS I G, BAKIRTZIS A G, DOKOPOULOS P S. Network-constrained economic dispatch using real-coded genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(1): 198-205.
- [19] CHAKRI A, YANG X S, KHELIF R, et al. Reliability-based design optimization using the directional bat algorithm[J]. *Neural Computing and Applications*, 2018, 30(8): 2381-2402.
- [20] WANG G G, CHU H C E, MIRJALILI S. Three-dimensional path planning for UCAV using an improved bat algorithm[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 49: 231-238.
- [21] ROBINSON J, RAHMAT-SAMII Y. Particle swarm optimization in electromagnetics[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52(2): 397-407.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立