

## 基于萤火虫算法的滴灌管网优化设计研究

陈际旭, 徐淑琴\*, 周豪

(东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:**传统滴灌工程设计过度依赖设计人员经验,同时管网系统投资较大。**【目的】**探索滴灌管网的优化设计方法,节约工程投资。**【方法】**以投资最小为目标函数、工作压力及管内流速为主要约束条件建立滴灌管网优化模型,并利用萤火虫算法进行求解,优化不同管网布置形式下的各级管道的管径及投资。选取约87 hm<sup>2</sup>旱田(玉米)滴灌工程为实例研究对象,针对骨干管道的3种布置方案(梳型、丰型、π型)优化研究,综合附属工程投资额得出最优方案。**【结果】**方案一“梳”型布置投资额为12 443.08元/hm<sup>2</sup>;方案二“丰”型布置投资额为12 263.17元/hm<sup>2</sup>;方案三“π”型布置投资额为13 698.20元/hm<sup>2</sup>;方案二投资最小,分别较方案一与方案三节约投资1.45%与10.48%。**【结论】**基于萤火虫算法求解的滴灌管网优化模型可以对管径及管网布置模式进行优化,能够应用到滴灌管网的优化设计当中,是一种可行方法。将附属工程投资独立考虑,并纳入滴灌系统总投资可简化问题。骨干管道“丰”型布置为最优方案。

**关键词:**滴灌; 管网布置; 萤火虫算法; 优化组合

中图分类号:S274.2

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180057

陈际旭,徐淑琴,周豪.基于萤火虫算法的滴灌管网优化设计研究[J].灌溉排水学报,2018,37(9):48-55.

### 0 引言

近年来,随着农业用水形势越来越严峻以及节水灌溉理念的大力推广,滴灌越来越受到人们的重视<sup>[1-3]</sup>。滴灌是利用管道输、配水的灌水方法,是目前干旱缺水地区最有效的一种节水灌溉方式,水资源的利用率高达95%。滴灌系统由首部枢纽、输配水管网(管材及配件)、田间灌水器部分组成。由于管材投资比重较大<sup>[6]</sup>,优化此部分投资有助于降低滴灌工程的应用成本。利用优化算法研究滴灌管网的布置方案,寻求最优管径及布置模式,降低工程投资。得出合理可行的滴灌管网设计方法,有利于管道输水的滴灌方式应用到生产实践中,提高灌溉水利用率,促进农业生产的发展。

近年管网优化研究主要集中在:①管网优化智能算法,如基于枚举法和遗传算法对农田有压管道进行优化设计<sup>[7]</sup>;②无其他因素影响下单一管道直径优化,如通过分析毛管管径与投资关系对管径进行优化研究<sup>[8]</sup>;③利用图论原理进行管网的布置研究<sup>[9]</sup>等。由于研究内容缺少对管径及布置模式同时优化,并且未考虑如管材配件、土建等附属工程投资因素,而此部分投资在滴灌管网系统中占一定的比重,若忽略此部分工程投资额进行优化研究,所得结果不够全面,不能为滴灌管网优化设计提供方法思路。

根据以上情况,兹以黑龙江省某丘陵区旱田(玉米)滴灌工程管网布置为研究对象,综合分析应用条件进行工程布置,针对每种方案分别拟定轮灌方式,以投资最小为目标函数,工作压力及管内流速为主要约束条件,建立模型进行优化研究,得到不同管网布置方式下的滴灌工程最优化组合方案,以期类似地区工程建设提供一定参考依据。

收稿日期:2018-01-18

基金项目:东北农业大学农业水土工程创新团队项目

作者简介:陈际旭(1990-),男,黑龙江齐齐哈尔人。硕士研究生,主要从事灌排工程优化模式研究。E-mail: 2606724145@qq.com

通信作者:徐淑琴(1964-),女,黑龙江桦南人。教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术方面研究。E-mail: 1279306234@qq.com

# 1 材料与方法

## 1.1 基础理论

管网工程骨干管道有多种布置形式,根据不同布置形式<sup>[10]</sup>,利用模型优化各形式下的管材及加压装置投资,并确定每种方案的附属工程投资,以系统总投资最小为原则确定最终方案。具体实现过程为:以管材及加压装置投资最小为目标函数,工作压力及管内流速为主要约束条件,基于萤火虫算法求解出不同布置形式的最优管道管径和加压装置最优组合,然后根据优化出的管径及加压装置计算附属工程投资,最终得出每种布置形式下的工程总投资进行比较,并分析合理性与指导意义。

首先进行布置形式及灌水顺序确定,然后可根据灌溉制度确定管道流量,进而分析讨论核心问题管材与加压装置的选用<sup>[11-12]</sup>。水流在管道中流动产生水头损失,微灌管道水头损失计算式为:

$$h_f = f \frac{Q^m}{D^b} L \quad (1)$$

式中: $h_f$ 为水头损失(m); $f$ 为摩阻系数; $Q$ 为管道流量( $m^3/h$ ); $m$ 为流量指数; $D$ 为管道直径(mm); $b$ 为管径指数( $b > 1$ ); $L$ 为管道长度(m)。

由水头损失、滴头工作压力和高程差可得加压装置水泵的扬程,同时综合流量确定水泵的功率选型,水泵功率计算式为:

$$N = \lambda A Q H \quad (2)$$

式中: $N$ 为水泵功率(kW); $\lambda$ 为功率折减系数; $Q$ 为设计流量( $m^3/s$ ); $A$ 为同种液体情况下与密度和重力加速度有关的常数; $H$ 为设计扬程(m)。

加压装置的投资由功率与投资的关系确定,该关系由研究区实际调研得到,调研资料见表1,通过回归分析拟合出功率与加压装置投资关系曲线,如图1所示,拟合公式为:

$$y = 440.12x + 647.83 \quad (x > 0) \quad (3)$$

式中: $x$ 为加压装置的功率(kW); $y$ 为加压装置及配电附属装置的投资价格(元)。

对拟合出的曲线进行检验分析,决定系数 $R^2 = 0.8904$ , $P = 1.3 \times 10^{-4}$ ,通过显著性检验,可以作为本研究加压装置的投资依据;并由拟合曲线可知,加压装置的投资随其功率的增加而提高,二者呈现正相关变动趋势。

表1 功率与加压装置投资统计表(研究区)

有效功率/kW	实际选取功率/kW	投资/元
12	15	11 900
24	30	13 800
36	45	20 200
44	55	23 900
48	60	26 700
60	75	24 000
64	80	36 000
72	90	39 400
88	110	56 400

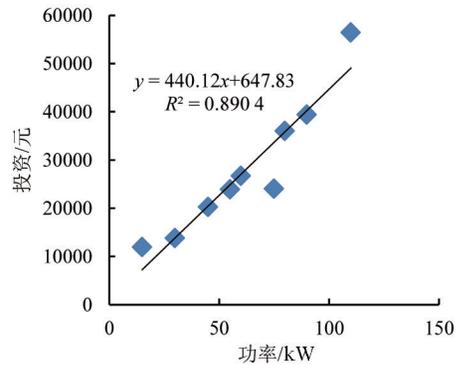


图1 功率与投资变动趋势线

## 1.2 优化模型

供水量一定的条件下,管径大、管材投资高,沿程水头损失小,加压装置投资低;管径小、管材投资低,沿程水头损失大,加压装置投资高<sup>[13]</sup>。为寻求每种管网布置形式下的最优管径与加压装置组合,以管材与加压装置投资最小为目标函数建立函数模型,:

$$T_k = \min \sum_{i=1}^n (l_i(t) d_i(t) + S(k)) \quad (4)$$

工作压力约束为:

$$H_s + H_d \geq \sum_{s=1}^n (H_{fs} + H_{js}) + H_g + H_m \quad (5)$$

管径约束为:

$$D_s \leq D_{s+1} \quad (6)$$

管内水流流速约束,根据输水管道的经济流速范围为:

$$V_{\min} \leq V_s \leq V_{\max} \quad (7)$$

$$V_s = \frac{4Q_s}{\pi D_s^2} \quad (8)$$

因此,可得:

$$V_{\min} \leq \frac{4Q_s}{\pi D_s^2} \leq V_{\max} \quad (9)$$

式中:  $T_k$  为投资最小的第  $k$  种组合方案投资额(元);  $l_i(t)$  为系统中第  $i$  种管材的总长度(m);  $d_i(t)$  为系统中第  $i$  种管材的单价(元);  $S(k)$  为投资最小的第  $k$  种组合方案加压装置费用和(元),由式(3)确定;  $H_s$  为加压水头(m);  $H_d$  为水源地面高程(m);  $H_{fs}$  为第  $s$  段管道的沿程水头损失(m);  $H_{fs}$  为第  $s$  段管道的局部水头损失(m);  $H_g$  为最不利点的最小工作水头(m);  $H_m$  为最不利点的地面高程(m);  $D_s$  为第  $s$  段管道管径(m);  $D_{s+1}$  为第  $s$  段管道上一级管道管径(m);  $V_s$  为第  $s$  段管道内的水流流速(m/s);  $Q_s$  为第  $s$  段管道内的流量(m<sup>3</sup>/s)。  $V_{\min}$  为管道经济流速下限值(m/s);  $V_{\max}$  为管道经济流速上限值(m/s)。

### 1.3 模型求解

本研究优化模型基于萤火虫算法进行求解,萤火虫算法是2008年由YANG创立的一种新型仿生智能优化算法<sup>[14]</sup>,利用萤火虫发光特性在搜索空间中寻找伙伴,并向位置最优的萤火虫移动,从而达到优化的目的<sup>[15]</sup>。萤火虫算法包含2个要素,即亮度和吸引度;亮度体现了萤火虫所处位置的优劣程度,并决定其移动的方向,吸引度决定了萤火虫移动的距离。通过亮度和吸引度的不断更新从而实现目标优化。具体求解步骤为:

1)编码:由于将整个实数集作为萤火虫寻找最优管径解的区间并不合理,且计算量大,本研究根据经济管径原则,将管径从国家标准规格的微灌管道直径中取值,选取经济管径周边若干值作为备选管径,管长、管段数及价格集合同理确定。由于各变量均为整数,故采用整数编码,编码长度为  $K$ ,编码范围是  $[1, n+0.99]$ ,其中:  $K$  为管段数,  $n$  为每个管段可以选择的管径数。对于任意一个编码  $p$ ,对  $p$  下取整,得到一个整数序列  $M$ ,  $M$  就是表示管段的选择方案,如  $p=[1.2, 3.4, 2.1]$  下取整后得到  $M=[1, 3, 2]$  表示管道1选择管径1,管段2选择管径3,管段3选择管径2,进而计算各种数据得到目标函数。

2)目标函数:建立萤火虫  $i$  的绝对亮度  $I$  和目标函数值之间的联系,将式(4)所示目标函数工程投资代表萤火虫的绝对亮度;在给定的管径、管长、价格等集合中进行最优目标函数替代与求解。

3)迭代寻优:根据文献[14]所述萤火虫算法优化原理,在式(5)至式(9)的约束条件下计算目标函数值,并根据荧光亮度  $I$  与吸引度  $\beta$  进行移动,进而在给定管径、管长及价格等集合中多次寻优最终得到目标函数最优的解。

优化针对轮灌单元进行,以最不利灌溉点求出加压水泵扬程,进而得出加压装置投资,并根据约束条件以轮灌组中所有管道求出管材投资。当不同轮灌组优化结果出现差异时,以满足整体最优为原则进行选择,记录每一次优化结果并进行整理,得到每个方案中整体最优的管径与加压装置组合。

## 2 算例应用

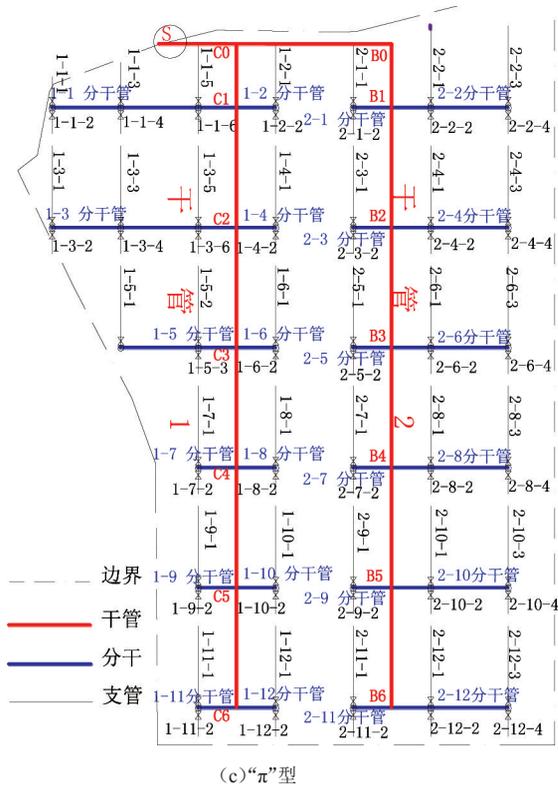
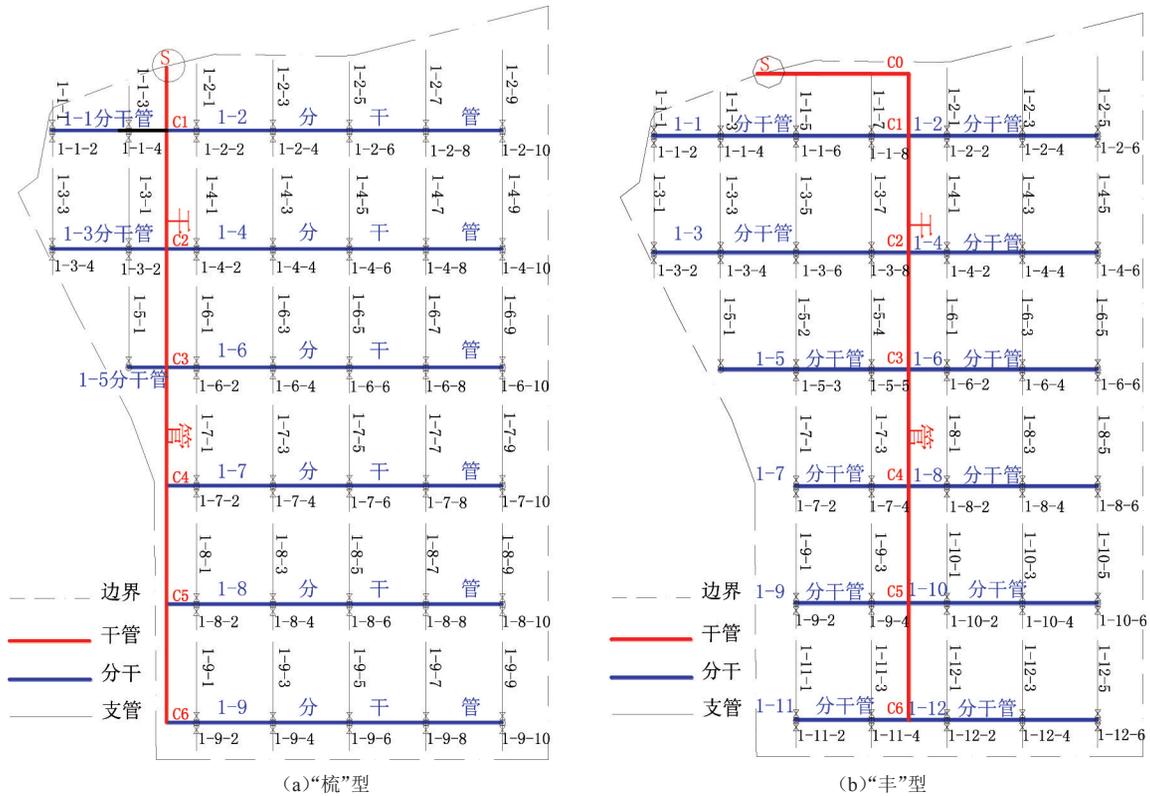
### 2.1 研究区概况

研究区面积约87 hm<sup>2</sup>,位于八五—农场。八五—农场坐落在密山、虎林、宝清交界处,地理坐标为东经131°47'—132°20',北纬45°37'—46°12',研究区由西北向东南形成了低山丘陵,山前漫岗,地形趋势是西北高,东南低。研究区种植作物主要为玉米,水源位于西北方向低势处,为水库水,由渠道引至滴灌系统首部。

### 2.2 滴灌布置方案

研究区骨干管道采用“梳”型、“丰”型、“π”型3种布置形式,3种形式中干管均垂直等高线、分干管平行等高线、支管垂直等高线布置,具体形式见图2。每种形式中的灌水小区即支管单元内的灌水器流量偏差率均满足  $q_v \leq 20\%$  的要求,具体支管的设计长度和流量分别为:顺坡支管长140 m,流量  $Q_s=98\ 431.2$  L/h;逆坡支

管长 60 m, 流量  $Q_n=41\ 924.4\ \text{L/h}$ 。3 种形式中的毛管均沿支管二侧对称等长布置, 毛管设计长度为  $L_m=65\ \text{m}$ , 滴头设计流量为  $q_d=2.1\ \text{L/h}$ , 滴头间距为  $S_c=0.3\ \text{m}$ , 1 条毛管上有 217 个滴头, 单条毛管设计流量为:  $Q_m=q_d \times 217=2.1 \times 217=455.7\ \text{L/h}$ 。



注 图中 1-1-1 表示干管 1 中 1-1 分干管上编号为 1 的支管, 下同。

图 2 骨干管道布置图

### 2.3 滴灌系统主要设计参数

经资料查询及计算<sup>[16]</sup>, 所需参数值如表 2 所示。

表2 研究区滴灌主要设计参数

序号	参数	单位	数值	序号	参数	单位	数值
1	土壤体积质量 $\gamma$	$g/cm^3$	1.3	9	设计净灌水定额 $m_j$	mm	20
2	设计土壤湿润比 $p$	%	60	10	设计毛灌水定额 $m_m$	mm	22.2
3	田间持水率 $\theta$ (体积)	%	28	11	计算灌水周期 $T_i$	d	5
4	适宜土壤体积含水率上限 $\theta_{max}$	%	25.2	12	设计灌水周期 $T_s$	d	5
5	适宜土壤体积含水率下限 $\theta_{min}$	%	16.8	13	灌水器间距 $S_s$	m	0.3
6	设计日耗水量 $I_d$	mm/d	4	14	毛管间距 $S_m$	m	1.3
7	灌溉水利用系数 $\eta$		0.9	15	灌水器流量 $q$	L/h	2.1
8	计算一次灌水延续时间 $t$	h	3.7	16	滴头工作水头	m	10

### 2.4 轮灌方案

为保证各地块均能及时灌溉,且农户用水均衡受益,结合当地的最优灌溉制度,在3种布置形式中,同一地块轮灌次序不变,划分轮灌组,制定轮灌顺序,每种方案的轮灌顺序如表3所示,以此轮灌顺序进行优化研究<sup>[17-18]</sup>。

表3 轮灌顺序

方案	第1天	第2天	第3天	第4天	第5天
方案一	1 1-1-3 1-1-4 1-9-9	1-2-2 1-2-4 1-9-6 1-9-8	1-2-1 1-8-1	1-4-3 1-7-3	1-6-9 1-6-10
	2 1-1-1 1-1-2 1-9-7	1-2-6 1-2-8 1-9-10	1-2-10 1-8-2 1-8-4	1-4-5 1-7-5	1-6-7
	3 1-3-1 1-9-5	1-2-9 1-8-9	1-4-2 1-4-4 1-8-6 1-8-8	1-4-7 1-7-7	1-6-5
	4 1-3-3 1-9-3	1-2-7 1-8-7	1-4-6 1-4-8 1-8-10	1-4-9 1-7-9	1-6-3
	5 1-3-2 1-3-4 1-9-1	1-2-5 1-8-5	1-4-10 1-7-2 1-7-4	1-7-6 1-7-8 1-6-2 1-6-4	1-6-1
	6 1-9-2 1-9-4	1-2-3 1-8-3	1-4-1 1-7-1	1-7-10 1-6-6 1-6-8	1-5-1
方案二	1 1-1-3 1-1-4 1-12-5	1-1-6 1-1-8 1-12-2 1-12-4	1-1-5 1-9-1	1-3-7 1-7-3	1-6-5 1-6-6
	2 1-1-1 1-1-2 1-12-3	1-2-2 1-2-4 1-12-6	1-2-6 1-9-2 1-9-4	1-4-1 1-8-1	1-6-3
	3 1-3-3 1-12-1	1-2-5 1-10-5	1-3-6 1-3-8 1-10-2 1-10-4	1-4-3 1-8-3	1-3-1
	4 1-3-1 1-11-3	1-2-3 1-10-3	1-4-2 1-4-4 1-10-6	1-4-5 1-8-5	1-5-4
	5 1-3-2 1-3-4 1-11-1	1-2-1 1-10-1	1-4-6 1-7-2 1-7-4	1-8-2 1-8-4 1-5-3 1-5-5	1-5-2
	6 1-11-2 1-11-4	1-1-7 1-9-3	1-3-5 1-7-1	1-8-6 1-6-2 1-6-4	1-5-1
方案三	1 1-1-3 1-1-4 2-12-3	1-1-6 1-2-2 2-11-2 2-12-2	1-1-5 1-9-1	1-4-1 1-8-1	2-6-3 2-6-4
	2 1-1-1 1-1-2 2-12-1	2-1-2 2-2-2 2-12-4	2-2-4 1-9-2 1-10-2	2-3-1 2-7-1	2-6-1
	3 1-3-3 1-11-1	2-2-3 2-10-3	1-3-6 1-4-2 2-9-2 2-10-2	2-4-1 2-8-1	2-5-1
	4 1-3-1 1-12-1	2-2-1 2-10-1	2-3-2 2-4-2 2-10-4	2-4-3 2-8-3	1-6-1
	5 1-3-2 1-3-4 1-11-1	2-1-1 2-9-1	2-4-4 1-7-2 1-8-4	2-7-2 2-8-2 1-5-3 1-6-2	1-5-2
	6 1-11-2 1-12-2	1-1-5 1-10-1	1-3-5 1-7-1	2-8-4 2-5-2 2-6-2	1-5-1

### 2.5 方案优化

根据经济管径原则选定管径集合,同时以此确定价格集合<sup>[9]</sup>,管长、管段等变量根据轮灌组实际情况确定。经济管径计算式为:

$$D = p\sqrt{Q}, \quad (10)$$

式中: $Q$ 为管道设计流量( $m^3/h$ ); $p$ 根据流量不同选取相应常数; $D$ 为管道直径(mm)。

确定轮灌方案、本节确定解的取值区间后,优化过程针对轮灌组进行,根据优化程序,将各部分数据带入模型求解,设定萤火虫算法参数,种群数  $P=20$ ,迭代次数  $M=100$ ,初始荧光素浓度  $\alpha=0.5$ ,吸收系数  $G=1$ 。

以某次优化为例展示优化过程如图3所示,利用萤火虫算法对管径进行优化,曲线逐渐下降,证明迭代过程目标函数逐渐减小,最终趋于平衡,证明收敛。

在给定的可选集合中,随着萤火虫位置更新,目标函数即工程投资迭代计算,并且逐渐趋于最优,说明模型参数设置正确,基于萤火虫算法求解的滴灌管网优化模型运行正常,能够对管道直径进行筛选、优化,得出满足约束条件的最优解。分析比较各次迭代过程,迭代次数为30次左右时,迭代结果趋于最优,说明本研究将管

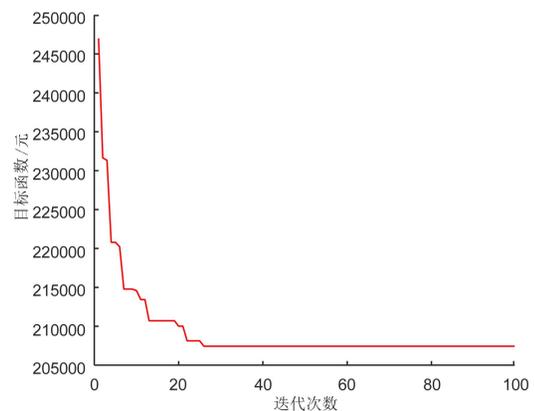


图3 萤火虫算法优化迭代曲线

径集合在经济管径周边若干值选取可行,能够得到最优解。记录各次优化结果,并整理分析。得到每一种布置形式下管材与加压装置投资最优方案,在3种布置形式最优方案的基础上计算相应附属工程投资。

### 3 结果与分析

#### 3.1 模型优化结果、附属工程投资和滴灌系统总投资

优化后各方案各级PE管道规格及水泵加压装置参数整理如表4所示。

表4 优化方案成果

设备	方案一(“梳”型)					方案二(“丰”型)					方案三(“π”型)				
	L/m	D/mm	d/mm	F/MPa	单价/(元·m <sup>-1</sup> )	L/m	D/mm	d/mm	F/MPa	单价/(元·m <sup>-1</sup> )	L/m	D/mm	d/mm	F/MPa	单价/(元·m <sup>-1</sup> )
干管	140	200	185.3	1.25	145.32	260	160	148.2	1.25	93.54	130	200	185.3	1.25	145.32
	600	160	150.5	1	76.68	340	160	150.5	1	76.68	740	160	150.5	1	76.68
	400	160	152.3	0.8	63	400	160	152.3	0.8	63	600	160	152.3	0.8	63
						400	160	153.8	0.6	55.86	600	160	153.8	0.6	55.86
分干	2 795	125	120.2	0.6	35.28	2 405	110	105.8	0.6	26.04	2 730	110	105.8	0.6	26.04
	585	125	119	0.8	43.32	1365	125	120.2	0.6	35.28	260	125	120.2	0.6	35.28
	585	110	105.8	0.6	26.04										
支管	6 940	110	105.8	0.6	26.04	6 940	110	105.8	0.6	26.04	6 940	110	105.8	0.6	26.04
	水泵扬程/m			92.14		水泵扬程/m			92.29		水泵扬程/m			85.8	
加压装置	流量/(L·h <sup>-1</sup> )			238 786.8		流量/(L·h <sup>-1</sup> )			238 786.8		流量/(L·h <sup>-1</sup> )			238 786.8	
	功率/kW			74.94		功率/kW			75.07		功率/kW			69.79	
	投资/元			33 632.04		投资/元			33 685.74		投资/元			31 362.46	
优化总投资/元				445 085.64		423 122.34					460 460.86				

注 表中L表示管段长度,D表示管道公称直径,d表示管道内径,F表示公称压力。

滴灌系统的附属工程投资主要包括:田间毛管(滴管带)投资、管道配件、排水及减压工程投资、管槽工程投资以及首部泵站土建、变电及配套等工程投资<sup>[20-21]</sup>。因同一地块面积相同,毛管滴管带规格长度相同<sup>[22-23]</sup>,其投资额相同;管道配件、排水减压工程及管槽工程投资在得到各方案最优管径与加压装置组合后即可确定;首部泵站土建、变电及配套等工程投资因变动细微视为固定投资纳入总投资。3种布置形式下最优管材与加压装置组合方案所对应的附属工程投资整理如表5所示。

表5 附属工程投资情况

项目	方案一		方案二		方案三	
	投资/元	占比/%	投资/元	占比/%	投资/元	占比/%
滴管带	145 740	22.86	145 740	22.64	145 740	19.93
配件	26 417.27	4.14	29 811.69	4.63	51 270.25	7.01
减压设备	8 800	1.38	8 800	1.36	22 000	3
闸阀井排水井	33 500	5.26	35 400	5.5	84 800	11.6
管槽工程	36 164.84	5.67	37 181.88	5.78	40 632	5.56
首部土建、变电及配套等工程	386 840	60.69	386 840	60.09	386 840	52.9
合计	637 462.11	100	643 773.57	100	731 282.25	100

注 表中滴管带因3种方案规格相同,投资额相同;配件投资包括管道间连接的直通、三通、四通、弯头、堵头及各种闸阀等,在得出方案优化结果后即可确定;管槽工程投资包括土方开挖及砂石回填;减压设备及减压井、排水井投资按数量计算;首部泵站土建、变电及配套工程等投资视为不变投资在前文介绍;以上投资因篇幅原因只列出投资总额,价格来源为项目区实地调研。

综合管材、加压装置投资与附属工程投资,得出滴灌系统总投资,以系统总投资最小的布置形式作为最优方案。按田间工程、输配水工程和首部工程分项整理出系统总投资如表6所示。

#### 3.2 方案比较

由表4可知,方案一“梳”型布置投资为445 085.64元,方案二“丰”型布置投资为423 122.34元,方案三“π”型布置投资为460 460.86元。方案二“丰”型布置的滴灌管网系统最优,分别较方案一“梳”型布置与方案三“π”型布置节约投资4.93%和8.11%。由表5可知,方案一为637 462.11元,方案二为643 773.57元,方案三为731 282.25元。3种方案附属工程投资出现差别,方案一最小,方案二次之,方案三最高;分析原因为主干管分支多,所需管道配件增加,在管道规格上经优化出现不同的同时,管道配件也会随之变化,从而导致结果出现差异,这也是本研究将附属工程投资纳入研究的原因。分析表6可知,3种方案依次为1 082 548元、1 066 896

元和1 191 743元。方案一单位投资额为12 443.08元/hm<sup>2</sup>，方案二单位投资额为12 263.17元/hm<sup>2</sup>，方案三单位投资额为13 698.20元/hm<sup>2</sup>。方案二方案为3种方案中最优方案，分别较方案一与方案三节约1.45%与10.48%。

表6 总投资明细

项目	方案一		方案二		方案三		
	投资/元	占比/%	投资/元	占比/%	投资/元	占比/%	
田间工程							
	滴管带	145 740	13.46	145 740	13.66	145 740	12.23
	管道	411 453.6	38.00	389 436.6	36.5	429 098.4	36.01
	配件	26 417.27	2.45	29 811.69	2.79	51 270.25	4.30
输配水工程	减压设备	8 800	0.82	8 800	0.82	22 000	1.84
	闸阀井排水井	33 500	3.09	35 400	3.32	84 800	7.12
	管槽工程	36 164.84	3.34	37 181.88	3.49	40 632	3.41
	输配水合计	516 335.71	47.7	500 630.17	46.92	627 800.65	52.68
首部工程	加压装置	33 632.04	3.11	33 685.74	3.16	31 362.46	2.63
	首部土建及变电工程	386 840	35.73	386 840	36.26	386 840	32.46
	首部合计	420 472.04	38.84	420 525.74	39.42	418 202.46	35.09
	总投资/元	1 082 548		1 066 896		1 191 743	
	单位投资/(元·hm <sup>2</sup> )	12 443.08		12 263.17		13 698.20	

## 4 讨论

兹对滴灌管网的设计方法进行初步研究，所得结果基于萤火虫算法求解的滴灌管网优化模型优化，分别得到3种布置方案的最优管径与加压装置组合，3种方案投资结果存在差异，造成差异的主要原因为各方案管道长度以及经优化后管道规格不同，加压装置也不相同。优化后所得3种方案均为各布置形式下的最优组合方案，整理各方案对应的附属工程投资可得滴灌系统工程总投资，得出骨干管道“丰”型布置形式最优，可以有效节约系统总投资，在大面积滴灌工程中节约效果显著，同时证明本研究所采用萤火虫算法求解的滴灌管网工程设计方法合理可行，所得结果与相关工程研究<sup>[24]</sup>相近。同时，与前人学者单纯研究管网布置形式或单一管径优化相比<sup>[7-8]</sup>，进行了更全面的考量。由优化结果可看出，附属工程如管材配件及减压井、排水井等投资存在差异且在工程总投资中占有一定比重，对工程系统总投资产生影响，因此将此部分工程投资纳入总投资比合理，在工程实践中确定设计方案时应考虑此部分投资带来的影响。

## 5 结论

1)滴灌管网布设时，骨干管道“丰”型布设方案较优。以黑龙江省八五一一农场约87 hm<sup>2</sup>丘陵区旱田滴灌工程为例进行研究，得出“丰”型布置形式下工程单位投资约为12 263.17元/hm<sup>2</sup>，较“梳”型布置和“π”型布置分别节约1.45%与10.48%。本研究中骨干管道“丰”型布置与“梳”型布置投资接近，明显优于“π”型布置。

2)滴灌管网的优化问题研究中，应考虑附属工程投资差异对方案比较带来的影响，将总投资划分为管材与加压装置投资和附属工程投资分项研究，并明确各部分所占比重，可得出管径与加压装置组合最优、附属工程投资更为合理的系统总投资最小的管网布置方案。

3)以工作压力和管内流速为主要约束条件，投资最小为目标函数建立的基于萤火虫算法求解的滴灌管网优化模型，能够应用到滴灌管网优化设计中，可以减轻在滴灌工程设计过程中对设计人员经验的过度依赖，得出“丰”型布置为最优布置方案的同时，可得到最优的支、分干、干管管径和加压装置组合，为滴灌管网优化设计提供了一种新的有效的方法和途径。

### 参考文献：

- [1] 胡廷贤. 红桥山高效节水灌溉工程树状管网优化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [2] 吴玉芹, 杨鹏, 刘思若. 关于我国微灌技术发展的几点思考[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(12):1-4.
- [3] 中国灌溉排水发展中心. 全国“十三五”高效节水灌溉规划思路报告[R]. 北京: 灌溉排水发展中心, 2015.
- [4] 李援农, 朱锋. 基于最大控制面积和最低费用的微灌小区管网优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23):80-87.
- [5] 宋江涛, 何武全. 泵站加压条件下规模化灌溉管网优化方法研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(11):145-148,152.
- [6] 王新坤. 微灌管网水力解析及优化设计研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [7] 刘波, 刘福胜, 刘栋梁, 等. 基于枚举法和遗传算法的农田有压管道系统优化设计[J]. 节水灌溉, 2017(8):92-95,100.
- [8] 丁苏疆, 李宝珠, 刘庆, 等. 滴灌毛管管径优化研究[J]. 陕西水利, 2014(4):157-159.

- [9] 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.
- [10] 宋江涛. 规模化管道输水灌溉管网系统优化设计方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- [11] 赵月芬, 李光永, 赵和锋. 手动与自动控制滴灌系统管网布置方案比较[J]. 节水灌溉, 2004(6):15-17, 20.
- [12] 许文斌, 王颖. 树状给水管网布置形式优化设计[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(6):226-230.
- [13] 白丹. 树状给水管网的优化[J]. 水利学报, 1996(11):52-56.
- [14] YANG Xinshe. Nature-inspired metaheuristic algorithms[M]. Beckington: Luniver Press, 2008:83-96.
- [15] 龙文, 蔡绍洪, 焦建军, 等. 求解约束优化问题的萤火虫算法及其工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4):1 260-1 267.
- [16] 微灌工程技术规范:GB/T 50485—2009[S].
- [17] 付玉娟. 轮灌条件下树状灌溉管网优化设计[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2006.
- [18] 郭元裕. 农田水利学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1990:74-83.
- [19] 给水用聚乙烯管材规范:ISO 4427—1996[S].
- [20] 李援农, 马朋辉, 胡亚瑾, 等. 灌区自压微灌独立管网系统优化设计研究[J]. 水利学报, 2016, 47(11):1 371-1 379.
- [21] 石喜, 孙斌, 柴媛媛, 等. 灌溉管网非恒定流计算机实现方法[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(11):79-85.
- [22] 郭铭. 基于遗传算法的滴灌支管轮灌小区管网优化布置研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2):72-76
- [23] 吴蒙. 基于农田灌溉系统水能关系的农业节水管理分区研究:以上海为例[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2):116-122, 128
- [24] 黑龙江省农垦总局. 水利部黑龙江省农垦总局牡丹江管理局节水增粮报告[R]. 哈尔滨:黑龙江省农垦总局, 2015.

## Optimal Design of Drip Irrigation Pipe Network Using the Firefly Algorithm

CHEN Jixu, XU Shuqin\*, ZHOU Hao

(College of Water Resources & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** **【Objective】** Traditional drip irrigation design largely relies on experience and this paper presents a optimal method to help design drip irrigation pipe network aiming to reduce its costs. **【Method】** An optimization model was established for drip irrigation pipe network, with minimum investment as the objective function, working pressure and flow rate in the pipe as the main constraints. The optimization was solved using the fireflies algorithm for the pipe diameters and the costs for different pipe network layouts. An 87 hm<sup>2</sup> of maize field was selected as an example to study the optimization of the three layouts: comb type, Feng type, and  $\pi$  type of the backbone pipeline. The optimal results were obtained by integrating the costs of the auxiliary projects associated with the pipe networks. **【Result】** The case showed that the costs for the “comb” type, the “Feng” type and the “ $\pi$ ” type were 12 443.08 yuan/hm<sup>2</sup>, 12 263.17 yuan/hm<sup>2</sup>, and 13 698.20 yuan/hm<sup>2</sup> respectively. **【Conclusion】** The optimization of the drip irrigation pipe network can be effectively solved by the firefly algorithm to obtain the pipe diameter and pipe network layouts. Separately considering the costs of the accessory projects from the costs of the drip irrigation project can further simplify the optimization problem. For the cast study, the “Feng” type of the backbone pipe was found to be most economical.

**Key words:** irrigation; pipe network arrangement; firefly algorithm; optimization.

责任编辑:陆红飞