

自压滴灌系统田间管网工程建设规模优化研究

段晓宁¹, 何武全^{1,2*}, 李 渤³, 石晓悟¹, 田雨丰¹

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065)

摘 要:【目的】合理划分多级枢纽自压滴灌系统田间管网工程建设规模, 使工程综合成本费用最小化。【方法】以考虑工程使用年限的单位面积综合成本费用最低为目标, 以管网布置、管径、流量、压力为约束条件, 建立了多级枢纽自压滴灌系统田间管网工程建设规模优化数学模型, 并采用原子搜索优化算法进行求解。【结果】以新疆某两级枢纽自压滴灌工程为例, 采用该方法对其田间管网工程规模进行优化, 当田间管网工程规模为 89 hm² 时, 单位面积综合成本费用最低, 田间管网工程规模为 74~98 hm² 范围时较优。同时, 计算分析不同灌水器间距、毛管间距及灌水器设计流量下的最优工程规模, 三者组合方式不同最优规模不同, 对应的田间长宽比范围为 1.00~1.30, 且最优规模对应的单位面积综合成本费用随着灌水器间距或毛管间距的增大而减小, 随着灌水器设计流量的增大而增大。

【结论】该方法可对多级枢纽自压滴灌系统的田间管网工程规模进行优化, 另外, 原子搜索优化算法稳定, 计算速度较快, 计算精度高, 该方法对自压滴灌系统的优化设计具有一定的应用价值。

关键词: 多级枢纽; 自压滴灌; 田间管网工程; 建设规模优化; 原子搜索优化算法

中图分类号: TV93

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2022038

OSID:



段晓宁, 何武全, 李渤, 等. 自压滴灌系统田间管网工程建设规模优化研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 64-71.

DUAN Xiaoning, HE Wuquan, LI Bo, et al. Optimizing Construction Scale of Field Pipe Network Project in Gravity-driven Drip Irrigation System[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 64-71.

0 引 言

【研究意义】滴灌作为目前节水效果最好的灌溉技术^[1], 具有最大限度地减少土壤蒸发、田间径流和深层渗漏造成的灌溉损失, 提高灌溉效率, 提高作物产量, 对地形和土壤的适应性强等优点^[2-3], 在世界各国得到广泛应用。近年来, 滴灌工程建设规模越来越大, 已由过去的小规模滴灌系统发展到目前的大规模多级枢纽滴灌系统^[4-5]。多级枢纽滴灌系统通常以一级首部枢纽为水源, 经输配水主管网系统输送到田间滴灌系统首部枢纽, 然后再经田间滴灌系统管网进行灌溉。然而, 目前确定田间滴灌系统规模时, 一般是根据田块分布、工程特点以及经验进行划分, 而没有考虑到田间系统规模对于工程投资的影响。因此, 迫切需要开展规模化的多级枢纽滴灌系统田间管网工程建设规模优化研究, 提出田间管网工程最优规模计算方法, 以降低滴灌工程投资, 提高工程效益。

【研究进展】管网布置及管径选择对滴灌工程的投资影响较大。因此, 国内外针对微灌管网优化设计

进行了大量的研究。传统的管网优化方法有微分法^[6]、线性规划法^[7]、非线性规划法^[8]和动态规划法^[9]。20 世纪 70 年代以来, 随着群体智能优化算法的出现, 人们开始采用群体智能优化算法进行求解。如洪涛等^[10]基于模拟退火遗传算法优化了自压微灌主干管网; 陈际旭等^[11]基于萤火虫算法求解了不同管网布置形式下的最优管径和加压装置组合; 魏志莉^[12]基于遗传算法提出了山地自压滴灌系统树状管网的优化设计方法; 田新苗等^[13]以微喷灌田间管网总投资最低为目标, 以毛管长度和支管管径为决策变量建立了优化模型, 并选用遗传算法进行了求解; 胡宇祥等^[14]以单位面积最低为目标函数提出了双向布置田间管网优化设计模型, 并应用遗传算法进行了计算; Zhao 等^[15]将滴灌管网分为骨干管网和田间管网, 基于遗传算法提出了自压滴灌管网优化设计方法; 尚洪彬等^[16]将骨干管网和田间管网作为整体, 基于混合蛙跳算法提出了自压微灌管网优化设计方法。【切入点】滴灌控制面积对滴灌系统的投资成本和运行费用有明显的决定作用^[17], 然而关于多级枢纽滴灌系统田间管网工程建设规模的优化研究较少。肖璐^[18]从亩均投资和亩均净现值 2 个角度分析得出滴灌工程管网建设规模为 133 hm² 左右时, 工程投资最为合理。但其只是利用工程实例理论进行了分析而未提出一种适用性广泛

收稿日期: 2022-01-18

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2015BAD24B02)

作者简介: 段晓宁 (1997-), 女。硕士研究生, 主要从事节水灌溉工程研究。E-mail: 460383543@qq.com

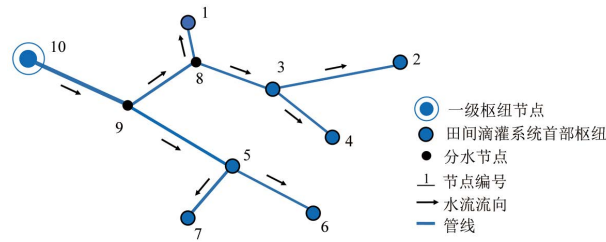
通信作者: 何武全 (1967-), 男。副研究员, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: hewuq@nwfufu.edu.cn

的工程建设规模优化方法。此外, Zhao 等^[19]于 2019 年提出了一种新型物理元启发式算法—原子搜索优化算法 (Atom search optimization), 相比于其他优化算法展现出了更好的优化性能, 并在实际工程中得到了很好的应用。比如水文参数估计^[19]、地下水弥散系数估算^[20]、水轮机调速器 PID 参数优化^[21]、结构参数识别^[22]等工程优化问题。【拟解决的关键问题】因此, 本研究针对多级枢纽自压滴灌系统建立田间管网工程建设规模优化计算模型, 并采用原子搜索优化算法进行求解, 所提出的优化方法可以针对实际工程计算出最优的工程建设规模。

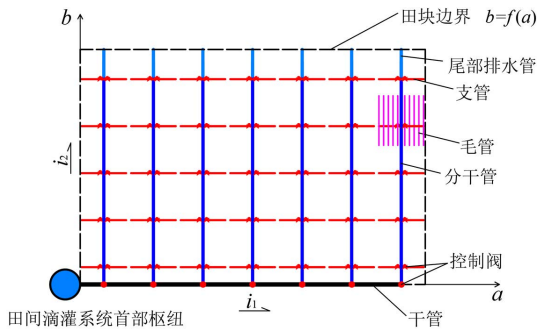
1 材料与方法

1.1 优化数学模型的建立

多级枢纽自压滴灌管网系统 (图 1) 通常以一级枢纽为水源, 通过输配水主管网系统 (图 1 (a)) 经各分水节点输送到每个田间二级枢纽, 再经田间滴灌管网系统 (图 1 (b)) 依次从干管流向分干管、支管、毛管, 最后通过毛管上安装的灌水器进行灌溉。



(a) 输配水主管网示意图



(b) 田间滴灌管网系统示意图

图 1 多级枢纽自压滴灌系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of a multi-level gravity drip irrigation pipe network system

田间滴灌系统由首部枢纽和田间管网组成。首部枢纽设备选择与系统流量及干管第一段管径有关; 田间管网布置由干管及分干管段数决定, 管径可采用经济流速法计算。因此, 本研究以单位面积综合成本费用最低为目标函数, 通过考虑管径约束、毛管铺设长度约束、轮灌组数约束、灌水定额约束、灌水小区水

头偏差约束以及首部枢纽设备选择约束, 建立多级枢纽自压滴灌系统田间管网工程建设规模的优化模型。

1.1.1 目标函数

综合成本费用包括固定资产折旧费 C_1 和运行管理费 C_2 。自压滴灌系统田间工程固定资产包括管网工程和首部枢纽工程固定资产, 其中毛管因地域、工程特性及材料的不同, 使用年限短且差异较大, 因此不计算毛管的固定资产。自压滴灌工程运行费用不包括能耗费及水资源费, 仅包括工程维修养护费、人员经费等, 其与工程建设费用有关, 该部分费用按照占工程建设费用的比例估算^[23-24]。

$$\text{Min}Z=\min[(C_1+C_2)/A], \quad (1)$$

$$C_1=(C_{11}-K)/r_1+(C_{12}-K)/r_2, \quad (2)$$

$$C_{11}=(1+\theta+\tau)C_0, \quad (3)$$

$$C_0=\sum_{i=1}^n l_m C_{mi}+n_m \sum_{i=1}^{n_{sm}} l_{sm} C_{smi}+n_b l_b C_b, \quad (4)$$

$$l_m=\sqrt{A \cdot R/n_m}; \quad l_{sm}=\sqrt{A/R/n_{sm}}; \quad l_b=l_m/2, \quad (5)$$

$$C_2=\lambda(C_{11}+C_{12}), \quad (6)$$

式中: Z 为田间滴灌工程单位面积综合成本费用 (元/hm²); C_1 为固定资产折旧费 (元); C_2 为运行管理费用 (元); A 为田间管网工程面积 (hm²); C_{12} 为首部枢纽固定资产投资 (元); C_{11} 为管网工程固定资产投资 (元); K 为设备使用寿命结束后的残余价值, 按总价值的 3% 计^[23-24]; r_1 和 r_2 分别为管网和首部枢纽设备的折旧年限, 分别按照 30 a 和 15 a 计算; C_0 为管网工程管材费用 (元); θ 为管道附件等附属设施费用占管材费用的比例, $\theta=0.1$ ^[23-24]; τ 为人工费、机械费等费用占管材费用的比例 $\tau=0.2$ ^[23-24]; n_m 为干管段数; n_{sm} 为一条分干管上的分干管段数; l_m 、 C_{mi} 分别为干管段长度 (m) 及第 i 根干管的单价 (元/m); l_{sm} 、 C_{smi} 分别为分干管段长度 (m) 及第 i 根分干管的单价 (元/m); n_b 、 l_b 、 C_b 分别为所选支管的数量、长度 (m) 及单价 (元/m); R 为田块长宽比; λ 为运行成本系数 (包括工程维修养护费、人员经费), $\lambda=0.1$ ^[23-24]。

1.1.2 约束条件

1) 首部枢纽设备选择约束: 首部枢纽配置有过滤装置、施肥装置、水表、控制阀、逆止阀、安全阀、进排气阀及压力表等设备。所选首部过滤器、水表、控制阀和逆止阀应与系统流量和第一段干管的管径相匹配。

$$Q_{\min} \leq Q_0 \leq Q_{\max}, \quad (7)$$

$$D_0=D_{m1}, \quad (8)$$

式中: Q_0 为田间管网系统流量 (m³/s); $Q_{\max}$ 和 $Q_{\min}$ 分别为选择的过滤器的最大过流流量 (m³/s) 和最小过流流量 (m³/s); D_0 为首部枢纽各部件配置的口径 (mm); D_{m1} 为第一段干管的管径 (mm)。

2) 毛管铺设长度约束: 毛管实际铺设长度应小于毛管极限长度。

$$l_d \leq [l_d]; l_a \leq [l_a], \quad (9)$$

式中: l_d 和 l_a 分别为顺坡向和逆坡向毛管实际长度 (m); $[l_d]$ 和 $[l_a]$ 分别为顺坡向和逆坡向毛管极限长度 (m)。

3) 管径约束: 所选管径应从标准管径中选取, 且采用经济流速法计算管径。另外, 本研究考虑到轮灌制度下各管段流量的不同以及便于施工管理, 干管、分干管均采用 2 种管径。

$$D_{j-1} \leq D_{ei} \leq D_{si} = D_j, D_j > D_{j-1}, j=2, \dots, n, \quad (10)$$

$$D_{ei} = \frac{1}{1000} \sqrt{\frac{\pi v_e}{4Q_i}}, \quad (11)$$

$$Q_i = N_{bi} Q_b, \quad (12)$$

$$Q_b = \frac{\text{INT}[\frac{l_b}{S_1}] \cdot \text{INT}[\frac{l_a}{S_e}] q_d}{1000 \times 3600}, \quad (13)$$

式中: D_{ei} 为第 i 根管道的经济管径 (mm); D_{si} 为第 i 根管道所选的标准管径 (mm); D_j 和 D_{j-1} 分别为第 j 种和第 $j-1$ 种可选标准管径 (mm); n 为可选标准管径种数; Q_i 为第 i 根管道的流量 (m^3/s); v_e 为管道经济流速 (m/s); N_{bi} 为第 i 根管道上同时工作的支管数; Q_b 为支管入口流量 (m^3/s); l_b 为支管的长度 (m); S_1 为毛管间距 (m); l_a 为双向毛管长度 (m); S_e 为灌水器间距 (m); q_d 为灌水器设计流量 (L/h)。

4) 轮灌组数约束: 为了满足作物的需水要求, 需要在设计灌水周期内完成灌溉。

$$N \leq N_{\max} = \frac{t_d \cdot T_{\max}}{t}, \quad (14)$$

式中: N 为实际轮灌组数; $N_{\max}$ 为最大轮灌组数; t_d 为日运行最大时间 (h/d); $T_{\max}$ 为设计灌水周期 (d); t 为 1 次灌水持续时间 (h)。

5) 灌水定额约束: 单位面积一次灌水量不得超过最大灌水定额。

$$m = \frac{t \cdot B \cdot Q_b}{A_1} \leq m_{\max}, \quad (15)$$

式中: m 为设计灌水定额; B 为同时工作的支管总数; A_1 为轮灌组面积 (m^2); $m_{\max}$ 为最大灌水定额 (m)。

6) 灌水小区水头偏差约束: 支毛管最大水头偏差应控制在允许的范围内。

$$\Delta h \leq [\Delta h], \quad (16)$$

式中: Δh 为灌水小区最大水头偏差 (m); $[\Delta h]$ 为灌水小区允许水头偏差 (m)。

1.2 原子搜索优化算法

原子搜索优化算法基于基本分子动力学模拟了自然界中原子的运动行为, 认为每一个原子都受到邻近原子的相互作用力以及适应值最优原子的几何约

束力的影响^[19-20]。引力鼓励原子广泛探索整个搜索空间, 斥力使他们能够集中开发有前途的区域。原子搜索优化算法参数有原子数、最大迭代次数、深度权重和乘数权重, 算法控制参数少, 简单易行, 易于实现, 其已经广泛应用于许多现实问题并取得了良好的效果。

具体的运行步骤如下:

1) 随机初始化原子的位置 x 和其速度 v , 并且设最优适应度函数值为 Inf 。

2) 计算原子的适应度函数值 Fit_i , 如果 $Fit_i < Fit_{\text{best}}$, 则 $Fit_{\text{best}} = Fit_i$, $x_{\text{best}} = x$ 。

3) 计算原子的质量 m 。

$$m_i(t) = \frac{M_i(t)}{\sum_{i=1}^N M_i(t)}; M_i(t) = e^{\frac{Fit_i(t) - Fit_{\text{best}}(t)}{Fit_{\text{worst}}(t) - Fit_{\text{best}}(t)}}, \quad (17)$$

式中: t 是迭代次数; N 为原子数; $m_i(t)$ 是原子 i 在第 t 次迭代下的质量; $Fit_i(t)$ 为原子 i 在第 t 次迭代下的适应度函数值; 对于最小值优化而言, $Fit_{\text{best}}(t)$ 和 $Fit_{\text{worst}}(t)$ 分别是第 t 次迭代下的最小和最大适应度函数值。

4) 计算 K 值, 并更新 K_{best} (适应度值最优的前 K 个原子)。

$$K(t) = N - (N-2) \sqrt{\frac{t}{T}}, \quad (18)$$

式中: $K(t)$ 为第 t 次迭代下的 K 值; T 为最大迭代次数。

5) 计算原子之间的相互作用力 F_i 及几何约束力 G_i 。

$$F_{ij}(t) = -\alpha \left(1 - \frac{t-1}{T}\right)^3 e^{\frac{20r}{T}} [2(h_{ij}(t))^{13} - (h_{ij}(t))^7], \quad (19)$$

$$F_i(t) = \sum_{j \in K_{\text{best}}} \text{rand}_j \cdot F_{ij}(t), \quad (20)$$

$$h_{ij}(t) = \begin{cases} h_{\min} = g_0 + g(t) = 0.9 + 0.1 \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{t}{T}\right), & \frac{r_{ij}(t)}{\sigma(t)} < h_{\min} \\ \frac{r_{ij}(t)}{\sigma(t)}, & h_{\min} \leq \frac{r_{ij}(t)}{\sigma(t)} \leq h_{\max} \\ h_{\max} = 1.24, & \frac{r_{ij}(t)}{\sigma(t)} > h_{\max} \end{cases}, \quad (21)$$

$$r_{ij}(t) = \|x_i - x_j\|_2, \quad (22)$$

$$r_{ij}(t) = \|x_{ij}(t), \frac{\sum_{j \in K_{\text{best}}} x_{ij}(t)}{K(t)}\|_2, \quad (23)$$

$$G_i(t) = \beta e^{\frac{20r}{T}} (x_{\text{best}}(t) - x_i(t)), \quad (24)$$

式中: $F_{ij}(t)$ 为第 t 次迭代下 i 原子和 j 原子之间的相互作用力; α 为深度权值; $h_{ij}(t)$ 为原子间距离与原子碰撞直径的比值, 当 $0.9 < h < 1.12$ 时相互作用力表现为斥力, 当 $h = 1.12$ 时引力和斥力相互平衡, 当 $1.12 < h < 1.24$ 相互作用力表现为引力, $h_{\min}$ 和 $h_{\max}$ 分别

为 h 的斥力下限和引力上限, g 作为一个漂移因子可以使得算法实现全局探索到局部开发的转变; $r_{ij}(t)$ 为 i 原子和 j 原子的距离; $\sigma(t)$ 为碰撞直径; rand_j 是在 $[0,1]$ 的随机数; $F_i(t)$ 是其他原子作用于 i 原子的合力, 等于其他原子作用在第 i 个原子上的具有随机权重的分量之和; $G_i(t)$ 是第 t 次迭代下 i 原子所受到适应度最优原子的几何约束力; β 为乘数数值; K_{best} 是由前 K 个适应度函数最优原子所组成的集合。

6) 计算原子加速度 a 。

$$a_i(t) = \frac{F_i(t)}{m_i(t)} + \frac{G_i(t)}{m_i(t)}, \quad (25)$$

式中: $a_i(t)$ 为第 t 次迭代下 i 原子的加速度。

7) 更新原子速度与位置。

$$v_i(t+1) = \text{rand}_i v_i(t) + a_i(t), \quad (26)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1), \quad (27)$$

式中: $v_i(t)$ 和 $x_i(t)$ 分别为第 t 次迭代下原子 i 的速度和位置; rand_i 是 $[0,1]$ 的随机数。

8) 判断是否达到最大迭代次数 T , 若达到最大迭代次数, 返回最优解 x_{best} 的近似值, 若未达到最大迭代次数, 返回 Step2 继续迭代计算。

1.3 适应度函数设计

罚函数法根据目标函数以及约束条件, 构造出一个具有惩罚机制的目标函数, 对于无约束问题求解过程中的那些违反约束条件的解给予惩罚, 从而将有约束问题转换为无约束优化问题。本研究采用外罚函数法处理约束条件, 则适应度函数为:

$$\begin{aligned} Fit = & Z + \lambda_1 [|\min(0, Q_0 - Q_{\min})| + |\min(0, Q_{\max} - Q_0)|] \\ & + \lambda_2 |D_0 - D_{m1}| + \lambda_3 [|\min(0, [l_a] - l_a)| + |\min(0, [l_d] - l_d)|] \\ & + \lambda_4 \sum_{i=1}^n \left[|\min(0, D_{si} - D_{ei})| + |\min(0, D_{si} - D_j)| \right] \\ & + |\min(0, D_{si} - D_{j-1})| \\ & + \lambda_5 |\min(0, N_{\max} - N)| + \lambda_6 |\min(0, m_{\max} - m)| \\ & + \lambda_7 |\min(0, [\Delta h] - h)|, \end{aligned} \quad (28)$$

式中: Fit 为适应度函数; Z 为目标函数; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 、 λ_5 、 λ_6 、 λ_7 分别为系统流量、首部枢纽设备选择口径、毛管铺设长度、管径、轮灌组数、灌水定额、水头偏差的惩罚因子; n 为管段数。

2 实例计算

2.1 项目区概况

新疆某两级枢纽自压滴灌系统灌溉工程控制总面积为 $1\,171.3\text{ hm}^2$, 地势总趋势是南高北低, 由东南向西北倾斜, 地形坡降约为 $11\text{‰} \sim 15\text{‰}$ 。原设计方案

利用地形高差形成自然水头, 采用两级枢纽自压滴灌系统, 一级枢纽通过输配水主管网将水流输送到二级枢纽, 二级枢纽再通过田间管网系统将水流输送至灌水器进行灌溉。该工程田间管网系统划分为 17 个小区, 最小面积 46.4 hm^2 , 最大面积 107.4 hm^2 。本研究采用建立的优化模型对该自压滴灌系统田间管网工程建设规模进行优化, 分析不同田间管网工程规模与综合成本费用的关系, 提出田间管网工程最优建设规模和合理的规模范围, 以降低工程投资, 提高工程效益。

项目区土壤质地为沙壤土, 土壤体积质量为 1.42 g/cm^3 , 土壤田间持水率为 22% , 灌溉水利用系数取 0.95 。种植作物为棉花, 种植方向均为南北向。田间滴灌系统设计参数取值见表 1。其参数依据微灌工程技术标准 (GB/T 50485—2020) 选取。田间滴灌系统干管及分干管采用 UPVC 管, 支管采用 PE 管, 压力等级均为 0.4 MPa , 其可选标准管道规格及单价分别见表 2 和表 3, 毛管选择边缝式滴灌带, 管径为 16 mm , 灌水器设计流量为 1.8 L/h , 灌水器间距为 300 mm 。由于其他调控设备 (包括安全阀、进排气阀、压力表等) 对首部枢纽投资影响较小, 因此, 本研究以过滤装置、水表、逆止阀、控制阀及施肥装置的合计投资作为首部枢纽总投资计算。其规格型号及单价分别见表 4—表 8。

表 1 田间滴灌系统的设计参数

Table 1 Design parameters of the field drip irrigation subsystem

设计参数	取值
管道经济流速 $v_e/(\text{m s}^{-1})$	1.5
顺坡向毛管极限长度 $[l_a]/\text{m}$	127
逆坡向毛管极限长度 $[l_d]/\text{m}$	63
干管向坡度 ‰	1.637
分干管向坡度 ‰	19
滴灌带间距 S_l/m	0.8
支管允许水头偏差 $[\Delta h_b]/\text{m}$	1.7
水头损失扩大系数 k	1.1
支管流量指数 m	1.75
支管经济比降 i_c	0.015
设计灌水周期 $T_{\max}/\text{d}$	7
日运行最大时间 $t_d/(\text{h d}^{-1})$	22
1 次灌水持续时间 t/h	5.5
最大灌水定额 $m_{\max}/\text{m}$	0.040 5
灌水器设计流量 $q_d/(\text{L h}^{-1})$	1.8
灌水器间距 S_e/m	0.3
毛管允许水头偏差 $[\Delta h_l]/\text{m}$	1.7
支管摩阻系数 f	50 500
支管管径指数 b	4.74
田间长宽比 R	1.37

表 2 干管及分干管 (UPVC 管) 管径及单价

Table 2 The diameter and unit price of main pipe and sub-main pipe (UPVC pipe)

外径/mm	内径/mm	单价/(元 m^{-1})	外径/mm	内径/mm	单价/(元 m^{-1})
63	60.2	4.750 0	200	190.2	29.361 4
75	71.2	5.681 4	225	214.0	36.995 5
90	85.6	7.144 5	250	237.6	46.428 4
110	94.6	9.964 0	280	266.2	62.928 4
125	118.8	12.611 1	315	296.6	83.928 4
140	133.0	15.412 2	355	336.2	109.928 4
160	152.0	19.449 4	400	378.8	141.428 4
180	171.2	23.880 3			

表 3 支管 (PE 管) 管径及单价

Table 3 The diameter and unit price of brach pipe (PE pipe)

外径/mm	内径/mm	单价/(元 m^{-1})	外径/mm	内径/mm	单价/(元 m^{-1})
32	28.8	4.56	140	126.6	13.78
40	35.2	5.18	160	144.6	16.09
63	55.4	6.20	180	162.8	18.82
75	66.0	8.21	200	180.8	21.97
90	79.4	9.36	225	203.4	26.68
110	100.0	10.29	250	226.2	32.42
125	113.0	12.48			

表 5 水表规格型号及单价

Table 5 The specification and unit price of the water meter

规格/mm	80	100	125	150	200	250	300	350	400
单价/元	700	850	900	1 200	2 200	4 200	6 500	8 200	9 700

表 6 逆止阀规格型号及单价

Table 6 The specification and unit price of the check value

规格/mm	80	100	125	150	200	250	300	350	400
单价/元	360	450	650	950	1 250	2 200	3 600	4 950	5 400

表 7 控制阀规格型号及单价

Table 7 The specification and unit price of the control value

规格/mm	80	100	125	150	200	250	300	350	400
单价/元	650	820	990	1 620	2 350	2 800	3 380	4 200	5 700

表 8 施肥装置规格型号及单价

Table 8 The specification and unit price of the fertilization device

工程规模/ hm^2	施肥罐容量/L	单价/元	工程规模/ hm^2	施肥罐容量/L	单价/元
<6.67	10	1 100	53.33~66.67	150	1 850
6.67~13.33	30	1 400	66.67~93.33	200	2 100
13.33~33.33	50	1 650	93.33~133.33	300	2 650
33.33~53.33	100	1 780	133.33~166.67	400	3 200

图 2 展示了田间管网工程建设规模与单位面积综合成本费用的关系,当田间滴灌系统规模在 74 hm^2 到 98 hm^2 之间时较优,其单位面积综合成本费用较最低值的增幅在 10%以内。同时,可以看出,田间管网工程建设规模与单位面积综合成本费用大致呈现出抛物线关系,当规模小于 40 hm^2 时,降低幅度较大,当规模大于 40 hm^2 小于 89 hm^2 时,下降幅度较为缓慢,当规模大于 89 hm^2 时,单位面积综合成本费用又随之增加,且增加幅度较大。

表 4 过滤装置规格型号及单价

Table 4 The specification and unit price of the filter

规格/mm	单价/万元	规格/mm	单价/万元
80	2.5	250	5.5
100	2.8	300	6.5
125	3.2	350	8.9
150	3.8	400	15.0
200	4.5		

2.2 优化结果及分析

对于原子搜索优化算法的 4 个参数原子数、最大迭代次数、深度权重和乘数权重分别设置为 80、300、50、0.2。经过 50 次重复计算得出自压田间滴灌最优工程建设规模为 89.00 hm^2 ,对应的单位面积综合成本费用为 $554.86 \text{ 元}/\text{hm}^2$ 。原设计方案典型管网的工程建设规模为 55 hm^2 ,其单位面积综合成本费用为 $720.83 \text{ 元}/\text{hm}^2$,较最优工程规模对应的单位面积综合成本费用高 $165.97 \text{ 元}/\text{hm}^2$ 。

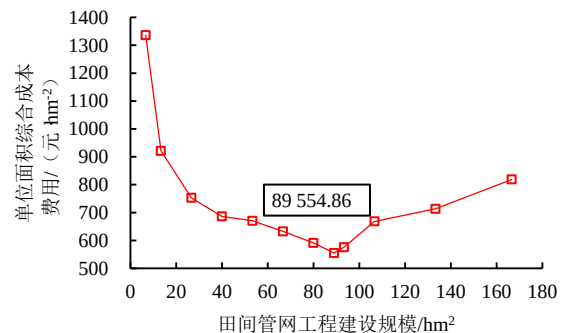


图 2 $R=1.37$ 时田间管网工程建设规模与单位面积综合成本费用关系

Fig.2 The relation figure of the field scale and the synthetically cost per unit area ($R=1.37$)

3 讨论

为了进一步讨论毛管间距、灌水器间距、灌水器

设计流量对于优化结果的影响,本研究计算了不同组合方式的田间管网最优工程建设规模。如图 3—图 5 所示,分别展示了当 $S_1=0.8$ m, $S_e=0.3$ m, $q_d=1.8$ L/h 时,另外 2 个参数对最优田间工程建设规模对应的单位面积综合成本费用关系。最优规模对应的单位面积综合成本费用随着 S_1 和 S_e 的增大而减小,随着 q_d 的增大而增大。另外,最优田间工程规模对应的田间长宽比范围为 1.00~1.30,说明当田块趋近于正方形时,单位面积综合成本费用更低。此外,通过重复执行 50 次原子搜索优化算法可以得出,计算结果的方差为 0.014 2,标准差为 0.119 3,平均绝对误差为 0.069 1。这说明原子搜索优化算法的稳定性较高且计算精度较高。

与之前的研究相比,本研究不是只分析案例得出最优工程建设规模,而是为多级枢纽自压滴灌系统田间管网工程建设规模的划分提供了一个高效且稳定的优化方法,其可针对具体工程实例计算最优规模。但所提出数学模型以“梳子”形管网布置为例,具有一定的局限性。此外,由于各项目区工程特点和各地相关的工程设备造价不一,不能单纯地设定一个最优规模,仍需要根据实际工程情况采用该方法进行计算。

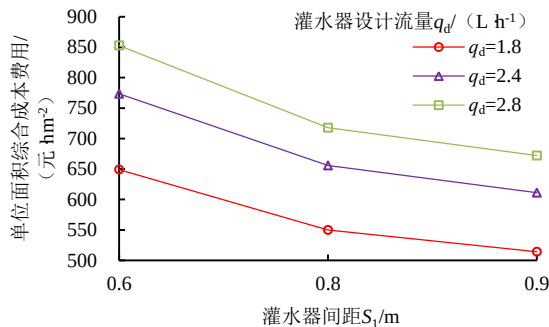


图 3 $S_e=0.3$ m 时 S_1 、 q_d 与最优规模对应的单位面积综合成本费用关系

Fig.3 The relation figure of S_1 , q_d and the comprehensive cost per unit area ($S_e=0.3$ m)

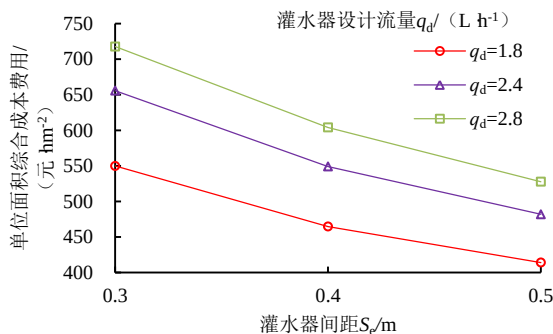


图 4 $S_1=0.8$ m 时 S_e 、 q_d 与最优规模对应的单位面积综合成本费用关系

Fig.4 The relation figure of S_e , q_d and the comprehensive cost per unit area ($S_1=0.8$ m)

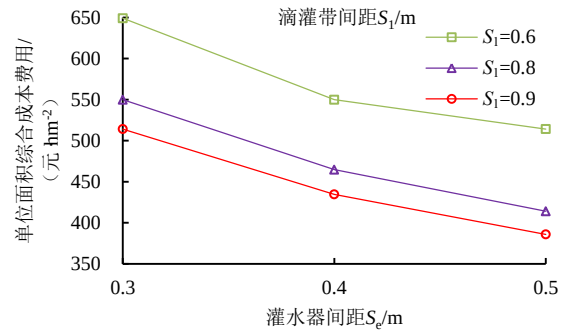


图 5 $q_d=1.8$ L/h 时 S_e 、 S_1 与最优规模对应的单位面积综合成本费用关系

Fig.5 The relation figure of S_1 , S_e and the comprehensive cost per unit area ($q_d=1.8$ L/h)

4 结论

1) 本研究以考虑工程使用年限的单位面积综合成本费用最低为目标,提出了多级枢纽自压田间滴灌工程规模优化方法。所采用的原子搜索优化算法稳定,计算速度快且具有较高的计算精度,可用于求解多级枢纽自压滴灌系统田间管网工程最优规模,为微灌管网的规模划分提供了一种全新的优化方法。

2) 以新疆某两级枢纽自压滴灌工程为例,通过该优化方法计算得出,当工程规模为 89 hm² 时最经济,74~98 hm² 范围时较优。最优规模对应的单位面积综合成本费用随着灌水器间距或毛管间距的增大而减小,随着灌水器设计流量的增大而增大,且当田块趋近于正方形时,单位面积综合成本费用较低。

3) 本研究为多级枢纽自压滴灌系统田间管网工程建设规模的合理划分提供了一个高效且稳定的优化方法,但所提出的优化模型以“梳子”形管网布置为例,具有一定的局限性。在实际工程应用时,应根据具体工程特点和各地的材料及设备造价采用该方法进行优化计算,确定田间管网工程合理的建设规模。

参考文献:

- [1] 王振华, 陈学庚, 郑旭荣, 等. 关于我国大田滴灌未来发展的思考[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 1-9, 38.
WANG Zhenhua, CHEN Xuegeng, ZHENG Xurong, et al. Discussion of the future development of field drip irrigation in China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 1-9, 38.
- [2] HOWELL T A, SCHNEIDER A, EVETT S. Subsurface and surface microirrigation of corn—Southern High Plains[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(3): 635-641.
- [3] 冯广志. 关于微灌技术与推广的几个问题[J]. 节水灌溉, 2000(2): 6-8.
FENG Guangzhi. Some problems on the research and popularization of micro-irrigation technology[J]. Water Saving Irrigation, 2000(2): 6-8.
- [4] 肖璐. 滴灌工程管网建设规模影响因素浅析[J]. 河南水利与南水北调, 2016(12): 68-69.
XIAO Lu. Analysis on influencing factors of pipe network construction

- scale of drip irrigation project[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2016(12): 68-69.
- [5] 刘荣. 浅析干旱区灌区土地联营与节水技术推广: 以新疆呼图壁县大丰镇为例[J]. 水利发展研究, 2012, 12(1): 59-61, 66.
- LIU Rong. Analysis on land joint operation and popularization of water-saving technology in irrigation district of the arid areas: A case study of Dafeng Town, Hutubi County, Xinjiang[J]. Water Resources Development Research, 2012, 12(1): 59-61, 66.
- [6] 魏永曜. 微分法求树状网各管段的经济管径[J]. 喷灌技术, 1983(3): 38-42, 60.
- WEI Yongyao. Solving the economic pipe diameter of each pipe section of tree network by differential method[J]. Sprinkler Irrigation Technology, 1983(3): 38-42, 60.
- [7] 白丹. 微灌田间管网的优化[J]. 水利学报, 1996, 27(8): 59-64, 70.
- BAI Dan. Optimum design of the field network for micro-irrigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 27(8): 59-64, 70.
- [8] 杨建康, 陈学敏. 微灌系统田间管网允许压力差的最优分配方法[J]. 水利学报, 1990, 21(7): 31-36.
- YANG Jiankang, CHEN Xuemin. Optimal distribution method of allowable pressure difference in field pipe network of micro-irrigation system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 21(7): 31-36.
- [9] 王新坤, 程冬玲, 林性粹. 枚举法与动态规划法结合优化田间管网[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(2): 61-66.
- WANG Xinkun, CHENG Dongling, LIN Xingcui. Combining enumeration and dynamic programming to optimize the field pipe network[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2001, 19(2): 61-66.
- [10] 洪涛, 王新坤, 朱燕翔. 基于模拟退火遗传算法的自压微灌干管管网优化[J]. 人民长江, 2016, 47(S1): 127-129.
- HONG Tao, WANG Xinkun, ZHU Yanxiang. Optimization of self-pressing micro-irrigation pipe network based on simulated annealing genetic algorithm[J]. Yangtze River, 2016, 47(S1): 127-129.
- [11] 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.
- CHEN Jixu, XU Shuqin, ZHOU Hao. Optimal design of drip irrigation pipe network using the firefly algorithm[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(9): 48-55.
- [12] 魏志莉. 山地自压滴灌系统树状管网的优化设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- WEI Zhili. The optimum design of tree pipe network for self-pressure drip irrigation system in mountainous areas[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [13] 田新苗, 郝新梅, 马孝义, 等. 微喷灌田间管网的优化研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4): 63-70.
- TIAN Xinmiao, HAO Xinmei, MA Xiaoyi, et al. Optimizing the field pipe network of micro-sprinkler irrigation system[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(4): 63-70.
- [14] 胡宇祥, 彭军志, 殷飞, 等. 微灌田间管网布置优化及参数分析[J]. 农机化研究, 2022, 44(6): 25-30, 52.
- HU Yuxiang, PENG Junzhi, YIN Fei, et al. Optimization and parameter analysis of pipe network layout in micro irrigation field[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(6): 25-30, 52.
- [15] ZHAO R H, HE W Q, LOU Z K, et al. Synchronization optimization of pipeline layout and pipe diameter selection in a self-pressurized drip irrigation network system based on the genetic algorithm[J]. Water, 2019, 11(3): 489.
- [16] 尚洪彬, 桂子钦, 段晓宁, 等. 基于混合蛙跳算法的自压微灌管网系统优化设计[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 131-137.
- SHANG Hongbin, GUI Ziqin, DUAN Xiaoning, et al. Optimizing micro-irrigation pipe network operated by self-regulated pressure using the shuffled frog-leaping algorithm[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 131-137.
- [17] 李淑珍, 李明思, 徐燕. 滴灌系统控制面积规模的探讨[J]. 中国农村水利水电, 2009(11): 86-88.
- LI Shuzhen, LI Mingsi, XU Yan. Research on the irrigation area with a drip irrigation system[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(11): 86-88.
- [18] 肖璐. 滴灌工程管网建设规模优化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- XIAO Lu. Optimization research on pipe network construction scale of drip irrigation engineering[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016.
- [19] ZHAO W G, WANG L Y, ZHANG Z X. Atom search optimization and its application to solve a hydrogeologic parameter estimation problem[J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 163: 283-304.
- [20] ZHAO W G, WANG L Y, ZHANG Z X. A novel atom search optimization for dispersion coefficient estimation in groundwater[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 91: 601-610.
- [21] 史天聪. 基于改进原子搜索优化算法的水轮机调速器 PID 参数优化[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- SHI Tiancong. Optimization of PID parameters of hydraulic turbine governor based on improved atomic search optimization algorithm[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021.
- [22] 洪欣. 基于原子搜索优化算法的结构参数识别[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
- HONG Xin. Structural parameter identification based on atom search optimization[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019.
- [23] 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.
- LIU Bo, LIU Fusheng, LIU Dongliang, et al. The farmland pressure pipe system optimization design based on enumeration method and genetic algorithm[J]. Water Saving Irrigation, 2017(8): 92-95, 100.
- [24] 侯依然, 上官林建, 侯泽林, 等. 基于遗传算法的灌溉管网同步优化研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 52-57.
- HOU Yiran, SHANGGUAN Linjian, HOU Zelin, et al. Study on synchronous optimization of irrigation pipe network based on genetic algorithm[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 52-57.

Optimizing Construction Scale of Field Pipe Network Project in Gravity-driven Drip Irrigation System

DUAN Xiaoning¹, HE Wuquan^{1,2*}, LI Bo³, SHI Xiaowu¹, TIAN Yufeng¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education,

Yangling 712100, China; 3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: 【Background and objective】 Gravity-driven drip irrigation is a technology using water pressure drop generated by natural terrain to deliver water from its source to emitters. The multi-level drip irrigation system uses

its first-level pivot as the water source to deliver water to each head pivot in the subsystems by a pipe network. Optimizing the pipe network is hence critical to reducing project cost without compromising its operation. The objective of this paper is to present a new optimization method. **【Method】** We took minimization of the comprehensive cost per unit area of the project as the objective function, and the layout of pipe network, pipe diameter, emitter-flow rate and water pressure as constraints. The optimization model was solved using the atom search optimization. We applied the method to a two-level gravity-drive drip irrigation project in Xinjiang to demonstrate its reliability. **【Result】**The cost per unit area is least when construction area of the pipe network project is 89 hm^2 , and excellent when the construction area is in the range of 74 to 98 hm^2 . Optimization of the construction area under different combinations of emitter spacing, capillary pipe spacing, and emitter-flow rate shows that the optimal results vary with their combinations. For length-width ratio of the construction field in the range of 1.00 to 1.30, the minimized cost per unit area decreases with the increase in emitter spacing and capillary-pipe spacing and increases with the increase in emitter-flow rate. **【Conclusion】**The proposed optimization method is able to optimize pipe network for multi-level gravity-driven drip irrigation systems. The method is computationally stable and efficient. It is applicable for designing gravity-driven drip irrigation network systems.

Key words: multi-level pivot; gravity drip irrigation; field pipe network project; optimization of construction scale; atom search optimization

责任编辑：韩 洋

(上接第 46 页)

The Effects of Different Combinations of Irrigation and Planting Method on Yield and Water Use Efficiency of Rice in Jianghuai Region

WU Han¹, WU Han¹, QIAN Na¹, KE Jian^{2*}, GUO Shuangshuang³

(1. Irrigation Experiment Central Station of Pishihang Irrigation District of Anhui Province, Liu'an 237158, China;

2. College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

3. Zoomlion Intelligent Agriculture Co. Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: **【Objective】** Yield and water use difference of crop depend on many agronomic practices and environmental constraints. Taking rice as an example, this paper elucidates how planting pattern and irrigation combine to affect water use efficiency and yield in the region of Jianghuai in southeast China. **【Method】** The experiment was conducted from 2018 to 2019 in a field. It consisted of four treatments: traditional flooding irrigation +puddled transplant (FI+PTR), traditional flooding irrigation+direct drill (FI+DSR), intermittent irrigation+puddled transplant (II+PTR), intermittent irrigation+direct drill (II+DSR). In each treatment, we measured yield components, water consumption and water use efficiency of the rice. **【Result】** Compared with flooding irrigation, intermittent irrigation did not resulted in significant change in rice yield, but reduced the evapotranspiration (ET) by 8.16%~9.84%, and increased water productivity by 10.68%~14.73%, depending on planting methods. Compared with PTR, DSR reduced rice yield by 5.33%~10.46% and water productivity by 12.36%~23.14%, while increasing ET by 7.32%~8.00%. Compared with PTR, DSR increased the effective panicle numbers, while reducing the number of grains per panicle, 1 000-grain weight, and seed setting rate, all at significant levels. Compared with II+PTR, II+DSR reduced rice yield by 5.99%~12.59% and water productivity by 12.55%~24.79%, while increasing ET by 7.21%~7.63%. The increased ET in the direct drill treatment was mainly due to its increase at the seedling stage, after which there was no significant difference in ET between the treatments. **【Conclusion】** Intermittent irrigation + transplant is optimal for rice production in the studied region; it not only increased grain yield and water productivity but also reduced evapotranspiration.

Key words: intermittent irrigation; direct drill; transplanting; evapotranspiration

责任编辑：韩 洋