

基于改进 NSGA-II 算法的加压滴灌管网优化设计

樊凯, 霍雪飞, 王文娥*, 胡笑涛, 冉聃聃, 皮滢滢

(西北农林科技大学 旱区农业工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:【目的】加快滴灌管网技术快速普及, 提高管网系统的经济性与可靠性。【方法】以单位面积成本最低为经济目标, 以不利节点的富余水头方差为可靠性目标, 并考虑实际管网工程投资中的折旧费与运行管理费用建立加压滴灌管网优化设计数学模型, 开展优化设计。以新疆某大型灌区内某加压滴灌管网系统为例, 采用改进 NSGA-II 算法方法与 NSGA-II 算法对其进行优化。【结果】改进 NSGA-II 算法的 Pareto 前沿解优于 NSGA-II 算法; 相同单位面积成本费用下, 改进 NSGA-II 算法求得的管网系统可靠性更高; 经 50 次独立计算, 改进 NSGA-II 算法的均匀性指数 (0.371) 低于 NSGA-II 算法的均匀性指数 (0.404); 基于改进 NSGA-II 算法求解得到的单位面积成本费用为 792.92 元/hm², 较原工程方案的单位面积成本费用 851.89 元/hm² 降低了 6.92%。不利节点的富余水头方差从 0.15 降至 0.06。【结论】改进 NSGA-II 算法的探索能力较 NSGA-II 算法强, 能够提供更优的解决方案, 得到的优化方案能够同时提高管网系统的经济性和可靠性。

关键词: 改进 NSGA-II 算法; 优化模型; 管网优化设计; 加压滴灌管网; 多目标优化

中图分类号: TV93

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2024243

樊凯, 霍雪飞, 王文娥, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的加压滴灌管网优化设计[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 59-65.

FAN Kai, HUO Xuefei, WANG Wen'e, et al. Optimizing pressurized drip irrigation pipe network design using an improved NSGA-II algorithm and engineering depreciation cost method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 59-65.

0 引言

【研究意义】农田加压滴灌管网作为现代农业灌溉系统的关键组成部分, 对于实现农田作物高产、高效生长至关重要^[1-2]。其设计方案的优化不仅直接关系到水资源的合理利用, 还涉及灌溉系统的运行成本和稳定性^[3-4]。水资源供需矛盾日益突出^[5-6], 如何通过科学有效的设计来提高农田加压滴灌管网的效率和经济性, 已成为农业生产领域亟待解决的重要问题。因此, 深入研究农田加压滴灌管网的优化设计问题, 对于实现农田灌溉系统的高效、经济和可持续发展具有重要意义。【研究进展】以往研究主要集中在单一目标的管网设计方法和传统优化算法上, 如遗传算法^[7]、原子搜索算法^[8]、蛙跳算法^[9]和规划求解法^[10]等。然而, 这些方法往往无法充分考虑到加压管网设计中的多个目标和约束条件, 难以找到全局最优解^[11]。近年来, 多目标优化算法如 NSGA-II 在工程设计领域得到了广泛应用^[12-13], 但在农田加压滴灌管网设计中的应

用有限。因此, 需要进一步探索适用于该领域的多目标优化方法。此外, 仅从一次性工程投资的角度建立优化设计数学模型^[14-18], 相比实际工程投资情况考虑不周, 本研究考虑工程中的折旧费以及运行管理费用, 以提高农田加压滴灌管网设计的效率和准确性。【切入点】基于上述研究进展, 本研究发现目前在农田加压滴灌管网设计中对多目标优化方法的应用仍然不足, 尤其是对系统成本和可靠性目标的综合考虑较少。同时, 现有研究多侧重于一次性工程投资, 而忽略了折旧费和运行管理费用对总体成本的影响。【拟解决的关键问题】因此, 本研究将从成本和可靠性目标出发, 结合管网设计技术和约束条件, 并采用改进的 NSGA-II 算法进行求解。通过将所提出的优化方法应用于实际灌区工程问题, 研究系统成本和可靠性对农田加压滴灌管网设计的影响。研究结果将为农业灌溉系统的高效、经济和可持续发展提供新的理论和方法支持, 为农业水资源的合理利用和灌溉系统的可持续发展提供科学依据和实践指导。

1 加压滴灌管网优化设计数学模型

1.1 目标函数

1.1.1 经济性目标函数

使用工程经济学折旧费和运行管理费计算滴灌管网系统总费用, 构建的经济性目标函数为: 单位面

收稿日期: 2024-06-17 修回日期: 2024-08-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1900402); 新疆维吾尔自治区重大科技专项项目 (2023A02002)

作者简介: 樊凯 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉工程研究。E-mail: 2022050889@nwfau.edu.cn

通信作者: 王文娥 (1974—), 女, 教授, 主要从事流体机械与流体动力学、节水灌溉理论与技术方面研究。E-mail: wangwene@nwsuaf.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

积成本费用=(固定资产年折旧费+运行成本费)/灌溉面积。

1) 固定资产年折旧费

灌溉工程总固定资产包括滴灌首部工程固定资产和管网工程固定资产,滴灌首部工程固定资产包括泵站建设费用及泵站配套设备建设费用,泵站配套设备建设费用包括过滤器及储肥罐等费用。

固定资产年折旧费为:

$$F = \frac{W-K}{r}, \quad (1)$$

$$[r_1, r_2] \in r, \quad (2)$$

式中: F 为固定资产年折旧费(元); W 为灌溉工程总固定资产(元); K 为设备的残余价值,取灌溉工程总固定资产的 3%; r 为工程设备的折旧年数; r_1 、 r_2 分别为首部工程设备的折旧年数和管网的折旧年数。

灌溉工程总固定资产为:

$$W = W_1 + W_2, \quad (3)$$

式中: W_1 为滴灌首部工程的固定资产(元); W_2 为管网工程固定资产(元)。

滴灌首部工程固定资产为:

$$W_1 = W_{11} + W_{12}, \quad (4)$$

$$W_{11} = F_p W_p. \quad (5)$$

管网工程固定资产为:

$$W_2 = (1 + \theta + \tau) \sum_{i=1}^n (A + BD_i^c) L_i, \quad (6)$$

式中: W_{11} 为泵站建设费用(元); W_{12} 为泵站配套设备建设费用(元); F_p 为泵站单位装机容量投资(元/kW); W_p 为泵站装机容量(kW); θ 为管道附件占管道费用的比例,取 0.1; τ 为人工费、机械费等直接费用占管道费用的比例,取 0.2; n 为管段总数; D_i 为第 i 根管段的管道内径(mm); L_i 为第 i 根管段的管长(m); A 、 B 、 c 为与管道造价相关的系数,通过拟合管径内径和管道造价得到。

2) 运行管理费用

运行管理费用主要包括能耗费、水费和其他费用。其他费用包括:工程维修养护费和人员经费等。其他费用按灌溉工程总固定资产的比例估算。

运行管理费用可表示为:

$$G = C + O + \lambda W, \quad (7)$$

式中: G 为运行管理费用(元); C 为能耗费(元); O 为水费(元); λ 为运行成本系数,取 0.1。

$$C = EW_p T_z, \quad (8)$$

$$O = em_1 S, \quad (9)$$

式中: E 为电费(元/kWh); T_z 为水泵年工作时间(h); e 为水费(元/m³); m_1 为综合毛灌水定额(m³/hm²); S 为灌溉控制面积(hm²)。

3) 单位面积成本费用

综合式(1)和式(7),再除以灌溉面积 S ,可得单位面积成本费用 P 为:

$$P = \frac{0.1485(F_p W_p + W_{12}) + 0.2561 \sum_{i=1}^n (A + BD_i^c) L_i + EW_p T_z + em_1 S}{s}, \quad (10)$$

式中: P 为单位面积成本费用(元/hm²)。

1.1.2 可靠性目标函数

以不利节点的富余水头方差作为可靠性衡量指标,计算式为:

$$\bar{J} = \frac{\sum_j (H_j - H_{j,\min})}{J}, \quad (11)$$

式中: \bar{J} 为不利节点的富余水头均值(m); J 为不利节点总个数; H_j 为节点 j 的水头(m); $H_{j,\min}$ 为节点 j 所需的最小水头(m)。

$$J_s = \sum_{j=1}^J (H_j - H_{j,\min} - \bar{J})^2, \quad (12)$$

式中: J_s 为不利节点的富余水头方差。

1.2 约束条件

为了使优化方案满足系统运行的要求且保持一定的可行性和实用性,必须设置合理的约束条件来约束优化计算过程。

1) 管径约束

在管网中根据水的方向,前一管段的管径不能低于后一管段的管径。

$$D_{i+1} \leq D_i, \quad (13)$$

式中: D_i 为第 i 段管段的管径(mm); D_{i+1} 为第 i 段管段后一管段的管径(mm)。

此外,选择的管径必须为灌区工程建设所提供的标准化商用管径:

$$D_i = [D_1, D_2, \dots, D_N], \quad (14)$$

式中: N 为标准管径数目。

2) 流速约束

为了保证管网系统的稳定性和可靠性,提高管道的使用寿命,管道中的水流速度应大于最小允许流速且小于最大允许流速。

$$v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max}, \quad (15)$$

式中: v_i 为第 i 段管段的实际流速(m/s); v_{\min} 为第 i 段管段的最小允许流速(m/s); v_{\max} 为第 i 段管段的最大允许流速(m/s)。

3) 管道承压能力约束

为了确保管网系统在正常运行时能够承受预期的压力,以保障系统的安全性和可靠性,管网运行时的最大压力要小于管道材料实际可以承受的压力。

$$P_{i,\max} \leq P_{i,c}, \quad (16)$$

式中: $P_{i,\max}$ 为第 i 段管段运行时的最大压力(MPa); $P_{i,c}$ 为第 i 段管段的承压能力(MPa)。

4) 节点压力约束

为了确保管网中的各个节点的压力保持在合理范围内,以满足系统的正常运行和稳定性。管网中各节点的压力应满足:

$$E_0 + H_B - h - \sum_{i=1}^{M(j)} \alpha f \frac{Q_i^m}{D_i^b} - E_j - H_{j,\min} \geq 0, \quad (17)$$

式中: E_0 为水源处标高 (m); H_B 为水泵扬程 (m); h 为首部工程水头损失之和 (m); $M(j)$ 为水源到节点 j 经过的所有管段集合; α 为局部水头损失系数; f, m, b 为管材相关系数; Q_i 为第 i 段管段的流量 (m^3/s); E_j 为第 j 个节点的地面标高 (m); $H_{j,\min}$ 为第 j 个节点所要满足的最小水头 (m)。

2 改进 NSGA-II 算法

NSGA-II 算法采用快速非支配排序方法和拥挤度计算并引入精英策略,得到 Pareto 前沿解^[19]。对于复杂的管网优化问题,多变量与多约束使得解的搜索空间变得复杂,使得出现更多的局部最优解,从而陷入局部最优。针对 NSGA-II 算法在复杂管网优化问题中种群多样性保持策略存在的不足以及最优解分布不均匀的情况^[20],本研究提出一种改进的自适应 NSGA-II 算法。该算法是在基本算法迭代过程中,加入根据种群个体间的平均拥挤度来反应解的相似度,其计算式为:

$$sim = \frac{\sum_{i=1}^n Crow_i}{n}, \quad (18)$$

式中: sim 为平均拥挤度; n 为种群规模; $Crow_i$ 为第 i 个个体的拥挤度。

当平均拥挤度变小时,说明解相似度高,则增大交叉和变异的概率,使算法的搜索更倾向于全局搜索,增大解的多样性;当平均拥挤度变大时,则减小交叉和变异的概率,使算法的搜索更倾向于局部搜索,提高解的质量。这种全局搜索与局部搜索交叉组合的方法,吸收了全局搜索和局部搜索的各自优点,提高了优化算法的分布均匀性和鲁棒性。

改进 NSGA-II 算法流程分为以下 6 个阶段:

1) 初始化种群: 设置种群规模、最大迭代次数、交叉概率阈值和变异概率阈值,并随机生成管径选择方案形成初始种群。

2) 群体排序与评估: 先进行非支配排序,将种群按照 Pareto 前沿解进行排序,分为多个等级,等级越低的个体优先级越高。再进行拥挤度计算,计算每个个体的拥挤度,用于衡量个体在其等级中的相对位置,拥挤度越小的个体优先级越高。最后进行平均拥挤度计算,计算初始种群的平均拥挤度,用于评估种群解的相似性。

3) 更新种群: 进行选择、交叉和变异操作,生成子代种群。将子代种群与父代种群合并成大种群。

4) 精英选择策略: 通过非支配排序和拥挤度计算选择优秀个体,构成新的种群。

5) 自适应调整: 计算新种群解的相似性并与旧种群相比,当新种群的平均拥挤度变小时,说明解的相似度高,则增大交叉和变异的概率。否则减小交叉和变异的概率。

6) 输出 Pareto 前沿解: 重复更新种群与自适应调整 2 个阶段,直到迭代次数达到最大设定次数,输出 Pareto 解。

改进的自适应 NSGA-II 算法流程见图 1。

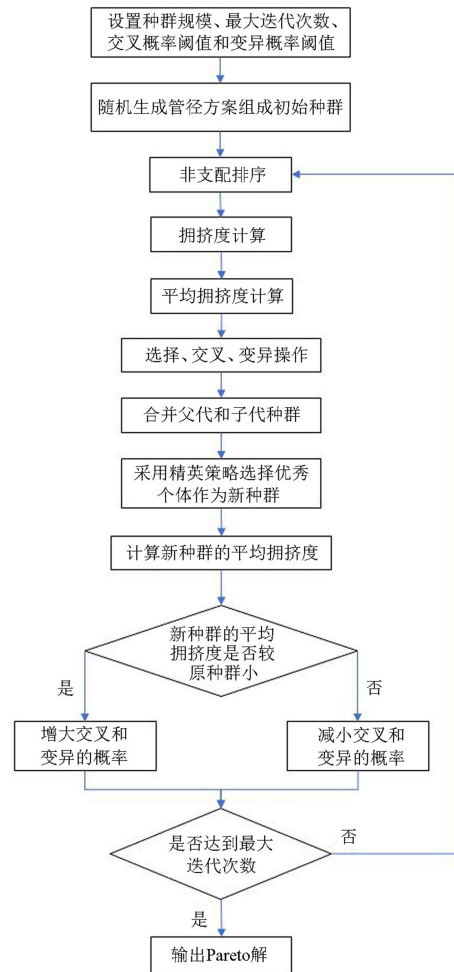


图 1 改进自适应 NSGA-II 算法流程

Fig.1 Improved adaptive NSGA-II algorithm flow

3 工程实例

3.1 基本数据

新疆某大型灌区内的某加压滴灌管网系统,种植面积为 31.1 hm^2 ,灌水定额为 28.89 mm ,土壤体积质量为 1.5 g/cm^3 ,项目区地块已经进行了平整,主干管方向的地形坡度为 $I_1=1/1\ 000$,分管管方向的地形坡度为 $I_2=1/1\ 000$ 。根据当地试验资料设计耗水强度取 6.5 mm/d ,计划土壤湿润层深度为 0.5 m ,田间持水

率为 24%，土壤含水率上、下限分别按田间持水率的 90% 和 65% 计算，灌溉水利用系数为 0.9。根据项目区的气候、作物种类、种植模式和土壤条件等因素，毛管设计流量为 2.1 L/h，管径为 16 mm，工作压力为 10 m，允许设计水头偏差率为 20%，单翼迷宫式滴灌带灌水器间距为 0.3 m。干管采用 0.4 MPa 的 PVC 管以地理的形式铺设，支管采用薄壁 PE 管铺设于地表，且各部分管道通过管件连通为管网。

在加压滴灌管网的水力计算过程中，灌水定额、灌水延续时间、管道沿程水头损失和系统设计流量、压力等计算均按照《微灌工程技术规范》^[21]和《节水灌溉工程技术标准》^[22]推荐公式计算。加压滴灌管网系统设计参数见表 1。

表 1 加压滴灌管网系统设计参数

Tab.1 Design parameters of pressurized drip irrigation network system

设计参数	取值
水源供水时间 t_0 /(h·d ⁻¹)	22
泵站单位装机容量投资 F_p /(元·kW ⁻¹)	3 000
电费 E /(元·kWh ⁻¹)	0.72
水费 O /元	0
水泵年工作时间 T_z /h	750
局部水头损失系数 α	0.1
干管、支管摩阻系数 f	0.464、0.505
干管、支管流量指数 m	1.77、1.75
干管、支管管径指数 b	4.77、4.75
干管管材造价系数 $A、B、c$	3.567、0.000 083 28、0.058 1
支管管材造价系数 $A、B、c$	4.659、0.000 943 7、1.894
过滤器规格/(孔 cm ²)	80、100、125、150、200、250
过滤器单价/万元	2.5、2.8、3.2、3.8、4.5、5.5

3.2 算法参数设置

利用 Matlab 2018b 软件，以管网管径为决策变量，分别采用改进 NSGA-II 算法和 NSGA-II 算法求解加压滴灌管网优化设计数学模型。设置改进 NSGA-II 算法的种群规模为 300，最大迭代次数为 250，最大交叉概率为 1，最小交叉概率为 0.1，最大变异概率为 1，最小变异概率为 0.1，代沟为 0.9。设置 NSGA-II 算法的种群规模为 300，最大迭代次数为 250，交叉概率为 0.9，变异概率为 0.1，代沟为 0.9。

3.3 优化结果及分析

基于改进 NSGA-II 算法与 NSGA-II 算法求得的单位面积成本费用与不利节点的富余水头方差的 Pareto 前沿解，详见图 2。由图 2 可知，改进 NSGA-II 算法求得的 Pareto 前沿解完全在 NSGA-II 算法求得的 Pareto 前沿解之下，表明在同等单位面积成本费用下，改进 NSGA-II 算法求得的不利节点富余水头方差比 NSGA-II 算法求得的小，说明在相同的投资下，改进 NSGA-II 算法求得的管网的可靠性相对要高，提供

了更优的解决方案，也表明了改进 NSGA-II 算法具有良好的探索能力，能够在空间中有效地搜索到更好的解决方案，更容易满足决策者的需求和偏好。

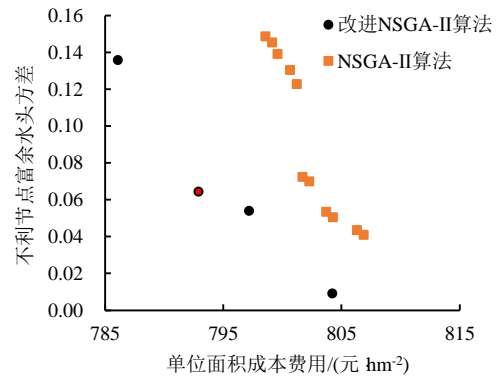


图 2 基于改进 NSGA-II 算法与 NSGA-II 算法求得的 Pareto 前沿解

Fig.2 Pareto frontier solution based on improved NSGA-II algorithm and NSGA-II algorithm

采用文献[20]提出的均匀性指标 (Spacing Metric, SP) 来对改进 NSGA-II 算法和 NSGA-II 算法性能进行评估，为减轻算法本身所具有的随机性对性能评估的干扰，故将基于改进 NSGA-II 算法和 NSGA-II 算法对管网系统优化求解的程序分别独立运行 50 次并统计 SP 。得到改进 NSGA-II 算法的 SP 平均值为 0.371，低于 NSGA-II 算法的 SP 平均值 0.404，且改进 NSGA-II 算法的最小 SP 为 0.007，远小于 NSGA-II 算法的最小 SP 为 0.037。说明改进 NSGA-II 算法的 Pareto 前沿解的分布均匀性更好，提供的解决方案能够更好地满足多样化的需求和偏好。

对于实际工程问题，由于 Pareto 前沿解由多个非支配解构成，每个解在某些目标上表现最好，而在其他目标上则可能表现较差，因此找到一个绝对的“最优解”并不总是直接的，而是需要综合考虑决策者偏好的明确性、解决方案的多样性以及实施的可行性。本研究采取折中取点方法确定最佳方案，对于奇数个点，选择最中间的点。对于偶数个点，选择中间的点中成本较低的点。这样取点的好处是能够平衡不同目标之间的冲突，为决策者提供一个在多个关键性能指标之间达到相对最优的解决方案。这种方法不仅增强了解决方案的实用性，而且确保了在各目标间的公平性和均衡，帮助决策者做出综合性强、满足多方面需求的决策。最终从图 2 的改进 NSGA-II 算法的 Pareto 前沿解得到的单位面积成本费用为 792.92 元/hm²，较原工程方案的单位面积成本费用 851.89 元/hm² 降低了 6.92%。不利节点的富余水头方差为 0.06，较原工程方案的不利节点富余水头方差小。优化方案布置见图 3，优化方案统计见表 2。

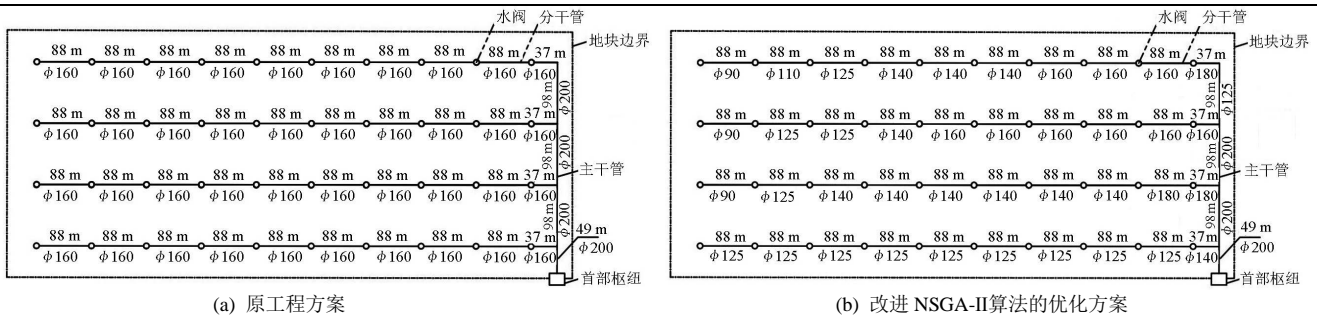


图 3 原工程方案与基于改进 NSGA-II 算法的优化方案布置

Fig.3 The layout of the original engineering scheme and the optimized scheme based on the improved NSGA-II algorithm

表 2 原工程方案与基于改进 NSGA-II 算法优化方案统计

Tab.2 Statistical table of original engineering scheme and the optimization scheme based on the improved NSGA-II algorithm

方案	管道类型	管径/mm	数量/根	单位面积成本/ (元 hm ²)	不利节点的 富余水头方差
原工程方案	干管	200	4	851.89	0.15
	支管	160	40		
	支管	90	80		
改进 NSGA-II 算法方案	干管	200	3	792.92	0.06
		180	3		
		160	9		
		140	11		
	支管	125	14		
		110	1		
		90	3		
	支管	90	80		

4 讨论

本研究表明，改进 NSGA-II 算法较标准 NSGA-II 算法具有更好的探索能力，Pareto 前沿解的分布均匀性更好，能够在解空间中有效地搜索到更好的解决方案。与原工程方案相比，显著减少了成本并且管网系统的可靠性显著提高。李千禧等^[23]采用混合算法对管网进行多目标优化设计，通过加权合并 2 个目标函数进行优化，结果优于原设计。然而，该方法需要人为设置权重，不同权重会导致不同的优化结果。这种人为干扰可能影响优化结果的客观性和一致性。相比之下，NSGA-II 算法不需要设置权重，直接处理多个目标函数，避免了人为干扰，因此在多目标优化问题中具有更大的优势和应用前景。此外，本研究的改进点与李雅婷等^[12]的研究类似，均将固定的交叉和变异概率改进为自适应调节交叉和变异概率，但李雅婷等^[12]是在标准 NSGA-III 算法的基础上进行改进且自适应调节的判别依据和范围有所不同，但得到的结果均优于标准算法。此外，借鉴其他领域多目标优化问题中的方法也可以进一步改进标准 NSGA-II 算法。例如，引进差分算子^[20]可以增强算法的全局搜索能力，避免陷入局部最优。差分算子通过利用差分进化策略在种群中生成新解，可以提高种群多样性和搜索效率，从而提升整体优化性能。混合其他算法^[24]，如将遗传算

法与模拟退火或粒子群优化结合，可以综合利用不同算法的优势，实现全局搜索和局部优化的平衡。这种混合策略能够在算法的不同阶段或不同个体上应用最适合的优化技术，从而提高收敛速度和解的质量。此外，引入特定系数^[25]可以根据问题的特性对目标函数进行加权或调整，使算法更加适应具体的工程需求。例如，通过设置适当的加权系数，可以强调或削弱某些目标在优化过程中的重要性，从而实现更加符合实际工程需求的优化结果。这些改进方法在其他领域已经显示出良好的应用性能，通过引入这些方法并进行相应的研究和验证，可以进一步提升 NSGA-II 算法在滴灌管网多目标优化设计中的应用效果。为验证这些改进方法的有效性和实用性，需开展系统的研究和实验。首先，详细描述自适应机制的实现方式，包括差分算子的选择、混合算法的组合策略以及特定系数的设定方法。其次，增加多实例试验，通过不同规模和复杂度的实例测试，评估改进算法在成本、可靠性和收敛速度等方面的表现。对比分析改进前后的性能差异，展示改进算法在不同实例中的优势。最后，探讨实际应用中的挑战，如计算复杂度、参数调节敏感性及实用性评估。通过并行计算或分布式计算技术提升计算效率，进行参数敏感性分析提供合理的参数选择建议，确保算法在不同应用场景下的稳定性和适应性。

综上所述，通过引入差分算子、混合其他优化算法和引入特定系数等方法，可以进一步改进标准 NSGA-II 算法，并通过系统的研究和实验验证其应用性能。这将有助于更好地解决滴灌管网多目标优化设计问题，获得更加高效、可靠和经济的优化结果，为实际工程应用提供更加坚实的理论和实践基础。

5 结论

- 1) 考虑工程中的折旧费以及运行管理费用，建立更符合实际工程的加压滴灌管网优化设计的数学模型，基于改进 NSGA-II 算法和 NSGA-II 算法求解数学模型，为农田加压滴灌管网设计与管理提供思路。
- 2) 基于新疆某大型项目区的某加压滴灌管网系统对 2 个算法进行实例验证，结果表明基于改进

NSGA-II算法求得的 Pareto 前沿解的方案更优, 更能满足决策者所需。得到的优化方案的经济性和可靠性都较原工程方案更高, 说明本方案对该灌区管网系统的优化是可行的, 基于改进 NSGA-II算法和工程折旧费方法对于解决加压滴灌管网系统优化问题能提供重要的理论和实践支持, 具有良好的适应性和应用前景。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

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] 张钊, 黄超, 樊宜, 等. 滴灌量对新疆春小麦生长发育、产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 22-27.
ZHANG Zhao, HUANG Chao, FAN Yi, et al. Effect of drip irrigation amount on growth, yield and water use efficiency of spring wheat in Northern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 22-27.
- [3] 马朋辉, 刘韩生, 胡亚瑾. 机压微灌管网系统布置与管径同步优化设计[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 236-244.
MA Penghui, LIU Hansheng, HU Yajin. Simultaneous optimization of layout and pipe diameter for pumping micro-irrigation pipe network system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 236-244.
- [4] 宋博, 钱治丞, 赵冰, 等. 机压滴灌管网优化设计与应用[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2022, 39(2): 222-230.
SONG Bo, QIAN Zhicheng, ZHAO Bing, et al. Optimization design and application of drip irrigation pipe network[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2022, 39(2): 222-230.
- [5] 张涛. 中国将实行最严格节水措施[J]. 生态经济, 2023, 39(12): 9-12.
- [6] 郑茹月, 任前, 谢琪, 等. 中国西北旱区加工番茄需水量时空变异特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(7): 39-47.
ZHENG Ruyue, REN Qian, XIE Qi, et al. Spatial and temporal variability of irrigation water demand of processing tomato in the Northwest Arid Region of China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(7): 39-47.
- [7] 马朋辉, 苏晓飞, 王净, 等. 随机供水条件下机压微灌干管管网优化设计研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(8): 32-36, 53.
MA Penghui, SU Xiaofei, WANG Jing, et al. Study on optimal design of micro-irrigation main pipe network under stochastic irrigation conditions[J]. Yellow River, 2023, 45(8): 32-36, 53.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 李道西, 胜志毫. 基于 Excel 规划求解的泵站加压灌溉管网优化设计研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(1): 36-38.
LI Daoxi, SHENG Zhihao. Optimal design of pressure irrigation pipe network for pumping station based on excel programming[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(1): 36-38.
- [11] 董娜. 基于自适应 MOEA/D 的供水管网多目标优化[J]. 中国农村水利水电, 2023(8): 172-179, 184.
DONG Na. Multi-objective optimization of water supply system based on adaptive MOEA/D[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(8): 172-179, 184.
- [12] 李雅婷, 李翠梅, 金国裕, 等. 基于改进 NSGA-III 算法的供水管网多目标优化设计[J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 144-148.
LI Yating, LI Cuimei, JIN Guoyu, et al. Multi-objective optimization design of water supply network based on improved NSGA-III algorithm[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(1): 144-148.
- [13] LIU R Z, GUO F C, SUN W Q, et al. A new method for optimization of water distribution networks while considering accidents[J]. Water, 2021, 13(12): 1 651.
- [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] 王永涛, 刘坚, 李家春, 等. 基于模拟退火与布谷鸟混合算法的树状灌溉管网优化设计[J]. 节水灌溉, 2021(12): 50-55.
WANG Yongtao, LIU Jian, LI Jiachun, et al. Optimal design of tree-shaped irrigation pipe network based on mixed algorithm of simulated annealing and cuckoo[J]. Water Saving Irrigation, 2021(12): 50-55.
- [16] 李妍峰, 姜丹. 考虑轮灌方式下的树状管网布局优化问题[J]. 节水灌溉, 2023(5): 75-83, 95.
LI Yanfeng, JIANG Dan. Optimization of the tree-shaped pipeline network layout based on rotation irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2023(5): 75-83, 95.
- [17] 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.
- [18] LI Z, LIN Z J, LYU S L, et al. Tree-type irrigation pipe network planning and design method using ICSO-ASV[J]. Water, 2020, 12(7): 1 985.
- [19] 刘书明, 李明明, 王欢欢, 等. 基于 NSGA-II 算法的给水管网多目标优化设计[J]. 中国给水排水, 2015, 31(5): 50-53.
LIU Shuming, LI Mingming, WANG Huanhuan, et al. Multi-objective optimization design of water distribution system based on non-dominated sorting genetic algorithms- II [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(5): 50-53.
- [20] 乔俊飞, 魏静, 韩红桂. 基于改进 NSGA2 算法的给水管网多目标优化设计[J]. 控制工程, 2016, 23(12): 1 861-1 866.
QIAO Junfei, WEI Jing, HAN Honggui. Multi-objective optimization of water distribution system based on an improved NSGA2 algorithm[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(12): 1 861-1 866.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 微灌工程技术标准: GB/T 50485—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 节水灌溉工程技术规范: GB/T 50363—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [23] 李千禧, 何武全, 李渤, 等. 基于混合和谐搜索算法的自压滴灌田间管网多目标优化设计[J]. 节水灌溉, 2024(6): 40-45.
LI Qianxi, HE Wuquan, LI Bo, et al. Multi-objective optimization design of self-pressure drip irrigation field pipe network based on mixed harmony search algorithm[J]. Water Saving Irrigation, 2024(6): 40-45.
- [24] 刘睿哲. 管网系统优化方法及辅助设计软件研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
LIU Ruizhe. Research on optimization method and aided design software for pipe network system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [25] 向辉, 史柯夫, 陶俊, 等. 改进 NSGA-II 算法的新能源储能系统协调优化模型[J]. 电子设计工程, 2024, 32(8): 157-161.
XIANG Hui, SHI Kefu, TAO Jun, et al. Coordinated optimization model of new energy storage system based on improved NSGA-II algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(8): 157-161.

Optimizing pressurized drip irrigation pipe network design using an improved NSGA-II algorithm and engineering depreciation cost method

FAN Kai, HUO Xuefei, WANG Wen'e*, HU Xiaotao, RAN Danjie, PI Yingying

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,
Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: **【Objective】** Optimizing pipe networks is a critical aspect of drip irrigation design. This paper proposes a multi-objective method to optimize pressurized drip irrigation network design and evaluate its applicability. **【Method】** The optimization method incorporates two objectives: minimizing the cost per unit area and improving network reliability by reducing the variance of surplus head at unfavourable nodes in the network. A mathematical model was developed, accounting for depreciation costs and operation and management expenses. The proposed model was applied to a pressurized drip irrigation network in an irrigation area in Xinjiang. The performance of the improved NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) was compared with the original algorithm by analysing the Pareto frontier solutions. **【Result】** The Pareto frontier solution obtained by the improved NSGA-II algorithm is better than that obtained by the original algorithm. When the cost of a unit area was the same, the optimal network obtained by the improved NSGA-II algorithm was more reliable than that obtained by the original algorithm. Across 50 independent calculations, the uniformity index value of the improved NSGA-II and the original algorithm was 0.371 and 0.404, respectively. The cost of a unit area calculated using the improved NSGA-II algorithm was 792.92 yuan/hm², compared to 851.89 yuan/hm² budgeted in the original project. The optimisation calculated by the proposed method reduced the variance of surplus head at the unfavourable nodes in the network from 0.15 to 0.06. **【Conclusion】** The improved NSGA-II algorithm is more effective than the original algorithm, offering a practical approach to reducing costs and enhancing the reliability of pressurized drip irrigation pipe networks and similar hydraulic systems.

Key words: improved NSGA-II algorithm; optimization model; pipe network optimization design; pressure drip irrigation network; multi-objective optimization

责任编辑: 白芳芳

(上接第 49 页)

Predicting spring maize yield using UAV remote sensing

MA Shijiao^{1,2}, FANG Chengtai³, ZHAO Jinghua^{1,2*}, LIU Feng^{1,2}, YANG Tingrui¹, YUAN Ruxin¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China

3. Corps Soil and Water Conservation and Water Resources Development Center, Urumqi 830002, China)

Abstract: **【Objective】** Predicting potential crop yield is critical not only to policy making but also to improving agricultural management to safeguard food production. In this paper, we investigate the feasibility of using unmanned aerial vehicles to predict crop yields. **【Method】** Spring maize was used as the model plant. The field experiment consisted of five soil moisture treatments by irrigating 50% (W1), 75% (W2), 100% (W3), 125% (W4) and 150% (W5) of estimated evapotranspiration. Multispectral images captured by an unmanned aerial vehicle (UAV) were used to construct the vegetation indices, and the Pearson's correlation coefficient method was used to screen the input variables for the yield prediction models. Partial least squares (PLS), random forest regression (RF), and particle swarm optimization (PSO) were used to develop and optimize yield prediction models based on the UAV images obtained at the nodulation, tasseling and filling stages of the maize growth. The grain yield was predicted using both single vegetation index and multi-vegetation indices, with the most accurate model used to generate a yield map of the studied area. **【Result】** Models using multiple vegetation indices were more accurate than models using single vegetation index. Among all models, the PSO-optimized random forest (PSO-RF) model was most accurate during the tasseling stage. Compared with the measured data, the PSO-RF model based on *NDVI* achieved an R^2 of 0.685, *RMSE* of 1 792.71 kg/hm², and *RPD* of 1.764, when using single index, while when using multi-indices, it achieved an R^2 of 0.806, *RMSE* of 1 485.88 kg/hm², and *RPD* of 2.032. The W3 produced the highest grain yield (19 845.25 kg/hm²), while the W1 resulted in the least yield (12 054.52 kg/hm²). **【Conclusion】** Multispectral UAV imagery combined with PSO-optimized random forest models offers a robust and accurate method for crop yield prediction. This method can serve as a valuable tool to improve agricultural management and optimize resource allocation.

Key words: drone; spring corn; yield; vegetation indices; male extraction period; random forest regression

责任编辑: 白芳芳