



樊凯,王亚菲,王文娥,胡笑涛,冉聃颀,李千禧. 基于 Jaya 算法的滴灌管网优化设计[J]. 中国农业大学学报,2025,30(01):215-223.

FAN Kai, WANG Yafei, WANG Wene, HU Xiaotao, RAN Danjie, LI Qianxi. Optimization design of drip irrigation network based on Jaya algorithm[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(01): 215-223.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.01.19

基于 Jaya 算法的滴灌管网优化设计

樊凯 王亚菲 王文娥* 胡笑涛 冉聃颀 李千禧

(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 针对滴灌管网设计参数多、过程复杂、计算量大的问题,采用 Jaya 算法和单位面积年成本费用最低优化方法,对设备和管道折旧费以及灌区运行管理费用等影响工程成本的因素进行研究。建立以管径、流速和管道承压等为约束条件的滴灌管网优化设计数学模型;以新疆某大型灌区内 2 个滴灌管网系统为例,基于 Jaya 算法和遗传算法对 2 个系统的管网管径进行优化设计;将 2 种算法的优化设计程序分别独立运行 50 次,统计每次优化结果与最优结果的相对偏差,对 2 种算法的优化结果进行对比分析。结果表明:基于 Jaya 算法得到的 2 个系统的最优单位面积年成本费用分别为 710.53 和 791.62 元/hm²,较原工程方案的单位面积年成本费用降低了 16.59% 和 21.09%,节省投资效果明显。基于 Jaya 算法得到的优化结果与最优结果的相对偏差均不大于 10%,表明算法收敛性能稳定,能满足实际工程设计要求。Jaya 算法能省去算法调试参数的过程,且其优化能力和遗传算法相当。基于 Jaya 算法的滴灌管网优化设计在节省成本、算法稳定性和计算精度方面表现优越,能作为滴灌管网单目标优化设计的有效方法。

关键词 滴灌管网;单目标优化;管径优化;Jaya 算法;遗传算法

中图分类号 TV93

文章编号 1007-4333(2025)01-0215-09

文献标志码 A

Optimization design of drip irrigation network based on Jaya algorithm

FAN Kai, WANG Yafei, WANG Wene*, HU Xiaotao, RAN Danjie, LI Qianxi

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

Abstract Aiming at the problems such as many parameters, complex process and large calculation volume existed in current drip irrigation network design, Jaya algorithm and the optimization method of the lowest annual cost per unit area are adopted to investigate the factors affecting the project cost including the depreciation cost of equipment and pipeline as well as the operation and management cost of the irrigation area. A mathematical model for the optimal design of drip irrigation network with constraints of pipe diameter, flow rate and pipe pressure is established. Two drip irrigation network systems in a large irrigation area in Xinjiang are taken as study examples, and the pipe diameter of the network is optimized based on the Jaya algorithm and the genetic algorithm. The optimization programs of the two algorithms are run independently for 50 times, and the relative deviation between the optimization results of optimization and the most optimal result is measured, and the optimization results of the two algorithms are compared. The optimization results of the two algorithms are compared and analyzed. The results show that: The optimal

收稿日期: 2024-04-17

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

第一作者: 樊凯(ORCID:0009-0001-5101-8396),硕士研究生,E-mail:2022050889@nwfau.edu.cn。

通讯作者: 王文娥(ORCID:0000-0001-9997-8137),教授,博士生导师,主要从事流体机械与流体动力学、节水灌溉理论与技术研究,E-mail:wangwene@nwsuaf.edu.cn

annual costs per unit area of the two systems based on Jaya algorithm are 710.53 and 791.62 Yuan/hm², which are 16.59% and 21.09% lower than those of the original engineering program, and the investment saving effect is obvious. The relative deviation between the optimization result based on Jaya algorithm and the optimal result is not more than 10% indicating that the algorithm has stable convergence performance and meets the requirements of actual engineering design. The Jaya algorithm can eliminate the process of adjusting the parameters of the algorithm and its optimization ability is comparable to that of the genetic algorithm. In conclusion, the optimization design of drip irrigation network based on Jaya algorithm is superior in terms of cost saving, algorithm stability and computational accuracy, and can be used as an effective method for single-objective optimization design of drip irrigation network.

Keywords drip irrigation network; single objective optimization; pipe diameter optimization; Jaya algorithm; genetic algorithm

我国水资源短缺问题突出^[1],滴灌是重要的节水灌溉技术,因其节水节肥、省工高效等优点被广泛推广^[2-3]。随着土地流转和高标准农田建设的推进,微灌管网向规模化发展,但其设计参数多、过程复杂、计算量大,如何高效准确地进行设计成为关键问题^[4-5]。此外,许多现有滴灌管网因早期设计不合理,导致运行成本高、效率低,重新优化设计尤为重要。通过先进算法实现高效、快速的滴灌管网优化设计,已成为研究热点^[6]。

目前,管网优化设计数学模型主要以管网投资最小为目标函数,多从一次性工程投资的角度构建数学模型^[7-11],但实际管网工程不仅包括一次性投资,还涉及运行管理费用、水资源利用效率等多个方面,不同的设备使用年限也不相同,需要构建更加全面和现实的数学模型,以更好地指导管网优化设计实践,从而提高系统的整体效益。管网优化设计方法包括传统优化设计和启发式算法优化。传统优化设计方法包括线性规划法、非线性规划法和动态规划法等。线性规划和非线性规划方法对于简单和中等规模的问题通常较为适用,但在处理复杂和离散变量等问题上存在一定限制。动态规划法在处理复杂和离散变量问题上具有显著优势,但面对大规模问题,其计算复杂度和存储需求显著增加,使得求解变得困难,限制了应用范围^[12]。近几年,启发式优化算法成为管网优化设计的重要方法,包括遗传算法^[5, 13]、粒子群算法^[14]、人工鱼群算法^[15]、鲸鱼算法^[16]、原子搜索优化算法^[17]和混合算法^[8, 18]等,也获得了较好的管网优化结果。启发式优化算法通过模拟自然界的进化、群体行为等机制,具有高效的搜索能力和灵活的适应性,特别在解决复杂、非线性和多约束优化问题方面表现出

色。然而,上述启发式优化算法需要对算法本身特有的参数进行设置,如果参数设置不当,可能导致计算成本增加并陷入局部最优解^[19-21]。无参数启发式优化算法(Jaya算法)很好地解决了这一问题^[22-23],该算法原理简单且便于使用,不需要调试参数,在很多优化问题中展示了有效性和优越性^[21, 24-25],但在管网优化设计领域,Jaya算法的应用研究不多,因此探索其在管网优化设计中的应用具有重要意义。

本研究拟采用Jaya算法对滴灌管网进行优化设计,并与管网优化设计中常用的遗传算法进行对比^[13, 26],以期为滴灌管网优化设计及其软件的开发提供理论基础支持。

1 滴灌管网优化设计数学模型

滴灌管网由灌区首部枢纽和田间滴灌管网组成。灌区首部枢纽包括水泵及其附属设备,而田间滴灌管网则由主干管、分干管、支管和毛管构成。对于平坦或坡度较缓的地形,根据水源位置及地面坡度方向,骨干管网常采用“梳子型”和“丰字型”2种布局形式(图1)。“梳子型”布局将分干管布置在主干管顺坡度的一侧,支管则排列在分干管的两侧;“丰字型”布局将分干管排列在主干管的两侧,支管排列在分干管的两侧。在这2种布局方式中,毛管通常沿着支管两侧顺着作物种植方向双向布置^[27]。

本研究以滴灌管网的主干管、分干管和支管管径为变量,以单位面积年成本费用最低为经济性目标,通过考虑管径约束、流速约束、管道承压能力约束、节点压力约束和灌水器设计允许流量偏差率约束等约束,建立滴灌管网优化设计数学模型。

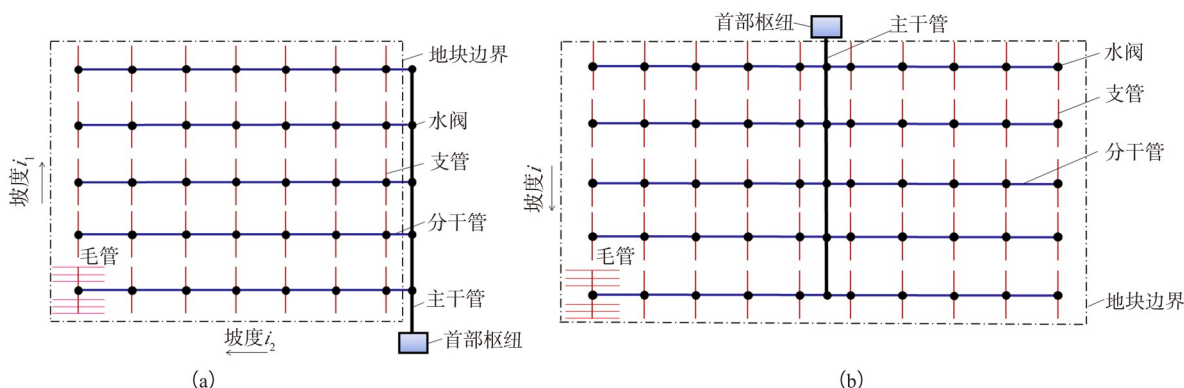


图1 “梳子”型(a)和“丰字”型(b)管网布置示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the "comb" type pipe arrangement (a) and the "Feng zi" type pipe arrangement (b)

1.1 滴灌管网优化设计目标函数

为保证构建的经济性目标函数的合理性,本研究同时考虑灌区建设费用以及灌区建成后的运行管理费用,建立的经济性目标函数为:

单位面积年成本费用=(固定资产年折旧费+
年运行管理费用)/灌溉面积

1)固定资产年折旧费。

灌溉工程总固定资产包括首部工程固定资产和管网工程固定资产,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(F)计算公式为:

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

式中: K 为固定资产的残余价值,取灌溉工程总固定资产的3%,元; r 为固定资产的折旧年限;固定资产的折旧年限 r 又分为首部工程设备的折旧年限 r_1 和管网的折旧年限 r_2 ; W 为灌溉工程总固定资产,计算公式为:

$$W = W_1 + W_2 \quad (2)$$

式中: W_1 为首部工程的固定资产,元; W_2 为管网工程固定资产,元。 W_1 和 W_2 计算公式为:

$$W_1 = F_P W_P + W_G + W_F$$

式中: 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; W_G 为与灌溉面积相配套的过滤器费用,元; W_F 为与灌溉面积相配套的储肥罐费用,元。

$$W_2 = (1 + \theta + \tau) \sum_{i=1}^n (A + B D_i^c) L_i$$

式中: 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,通过拟合管道内径和管道造价得到。

2)年运行管理费用。

年运行管理费用主要包括电费、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,按灌溉工程总固定资产的比例估算。

年运行管理费用(G)的计算公式为:

$$G = C + O + \lambda W \quad (3)$$

式中: C 为电费, $C = E W_P T_Z$,其中 E 为电费单价,元/kWh, T_Z 为水泵年工作时间,h。 O 为水费, $O = e m_1 S$,其中 e 为水价,元/m³; m_1 为综合毛灌溉定额,m³/hm²; S 为灌溉面积,hm²; λ 为运行成本系数,取0.1。

3)单位面积年成本费用(P)。

计算公式为:

$$P = \frac{F + G}{S} \quad (4)$$

由式(1)~式(4)可得单位面积年成本费用(P)为:

$$P = \left[\left(\frac{0.97}{r_1} + 0.1 \right) (F_P W_P + W_G + W_F) + 1.3 \left(\frac{0.97}{r_2} + 0.1 \right) \sum_{i=1}^n (A + B D_i^c) L_i + E W_P T_Z + e m_1 S \right] / S$$

1.2 约束条件

为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,需要设置以下合理的约束条件。

1)管径约束。在整个管网中,下一级管道管径(D_{s+1})应不大于上一级管道管径(D_s),即 $D_{s+1} \leq D_s$;

此外,选用的管径必须为灌区工程建设所提供的标准化商用管径,即 $D \in [D_1, D_2, \dots, D_N]$,其中, D 为可选用管道的管径,mm; N 为标准管径数目。

2)流速约束。为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不小于最小允许流速且不大于最大允许流速,即

$$v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max}$$

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。

$$P_{i,\max} < P_{i,c}$$

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:

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

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; $M(j)$ 是水源到节点*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 、 L_i 分别为第*i*段管段的流量和管道长度; 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。

5)灌水器设计允许流量偏差率约束。为满足灌水均匀度的要求,灌水小区内灌水器设计流量偏差率应不大于设计允许流量偏差率。

$$q_v = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_d} \leq [q_v]$$

式中: q_v 为灌水器设计流量偏差率,%; $q_{\max}$ 为灌水器最大流量,L/h; $q_{\min}$ 为灌水器最小流量,L/h; q_d 为灌水器设计流量,L/h; $[q_v]$ 为灌水器设计允许流量偏差率,%。

2 基于Jaya算法的滴灌管网优化设计方法

Jaya算法基于持续改进的原理,其核心思想是子代个体不断向优秀个体靠近的同时远离最差个体,从而不断提高解的质量。与其他启发式智能优化算法^[28]相比,Jaya算法参数简单,只需设置种群规模和最大迭代次数^[29];更容易被理解和实现,很适于求解全局优化和工程设计优化问题;具有趋优避差的导向性特征。

本研究算法流程分为4个步骤。

1)初始化种群。设置种群规模和最大迭代次数,并随机生成管径选择方案形成初始种群开始迭代。

2)更新个体。更新迭代方程式为:

$$X'_{n,y,l} = X_{n,y,l} + r_{1,n,l}(X_{n,\text{best},l} - |X_{n,y,l}|) - r_{2,n,l}(X_{n,\text{worst},l} - |X_{n,y,l}|)$$

式中: $X_{n,y,l}$ 为第*n*次迭代过程中第*y*个个体的第*l*个管径变量; $X_{n,\text{best},l}$ 为第*n*次迭代过程中目标函数值最好个体的第*l*个管径变量; $X_{n,\text{worst},l}$ 为第*n*次迭代过程中目标函数值最差个体的第*l*个管径变量; $|X_{n,y,l}|$ 为 $X_{n,y,l}$ 的绝对值; $r_{1,n,l}$ 和 $r_{2,n,l}$ 为0~1的随机数; $X'_{n,y,l}$ 为 $X_{n,y,l}$ 更新后的值。

3)贪婪选择。在第*n*次迭代中,对第*y*个个体的第*l*个管径变量按更新迭代方程进行更新,如果生成的新个体的经济性比原个体好,则用新个体替原个体,否则不替换。待更新完所有个体后,进行下一次迭代计算。

4)输出最优解。重复更新个体与贪婪选择2个步骤,直到迭代次数达到最大设定次数,输出最优解。

3 工程实例

3.1 灌区基本数据及算法相关参数设置

新疆某大型灌区有2个滴灌管网系统,面积分别为31.1和27.9 hm²。两系统均种植棉花,灌水定额为28.89 mm,土壤容重1.5 g/cm³,项

目区地块已进行平整,主干管方向的地形坡度 $I_1=1/1\ 000$,分干管方向的地形坡度 $I_2=1/1\ 000$ 。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量的 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,毛管采用设计流量为 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% ,灌水器间距为 0.3 m 的单翼迷宫式滴灌带。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》^[30]和《节水灌溉工程技术标准》^[31]推荐公式进行计算。两管网系统设计参数见表1。

表 1 滴灌管网系统设计参数
Table 1 Drip irrigation network system design parameters

设计参数 Design parameters	数值 Data	设计参数 Design parameters	数值 Data
首部工程折旧年限/a Core hub depreciation period	20	供水时间/(h/d) Water supply time	22
管网折旧年限/年 Depreciable life of pipe network	10	局部水头损失系数 α Localized head loss coefficient	0.1
泵站单位装机容量投资/(元/kW) Investment in pumping stations per unit of installed capacity	3 000	干管、支管的沿程水头损失系数 f_1 、 f_2 Head loss coefficient along the course for mains and branches	$f_1=0.464$ $f_2=0.505$
泵站装机容量/kW Installed capacity of pumping station	15	干管、支管的流量指数 m_1 、 m_2 Flow indices for mains and branches	$m_1=1.77$ $m_2=1.75$
电费单价/(元/kWh) Unit cost of electricity	0.72	干管、支管的管径指数 b_1 、 b_2 Pipe diameter index for mains and branches	$b_1=4.77$ $b_2=4.75$
水泵年工作时间/h Annual operating hours of pumps	750	过滤器规格/(孔/cm) Filter specifications	80、100、125 150、200、250
水费/元 Water bill	0	过滤器单价/万元 Filter unit price	2.5、2.8、3.2 3.8、4.5、5.5

经过多次调试,设置 Jaya 算法的种群规模为 500,最大迭代次数为 800。设置遗传算法的种群规模为 500,最大迭代次数为 500,交叉概率为 0.9 ,变异概率为 0.1 ,代沟为 0.9 。为减轻算法本身所具有的随机性对评估算法求解性能的干扰,将 2 种算法的优化设计程序分别独立运行 50 次,统计出最优结果和每次运行结果与最优结果的相对偏差,并将 2 种算法的优化结果进行对比分析。

3.2 基于 Jaya 算法对滴灌系统管网的优化

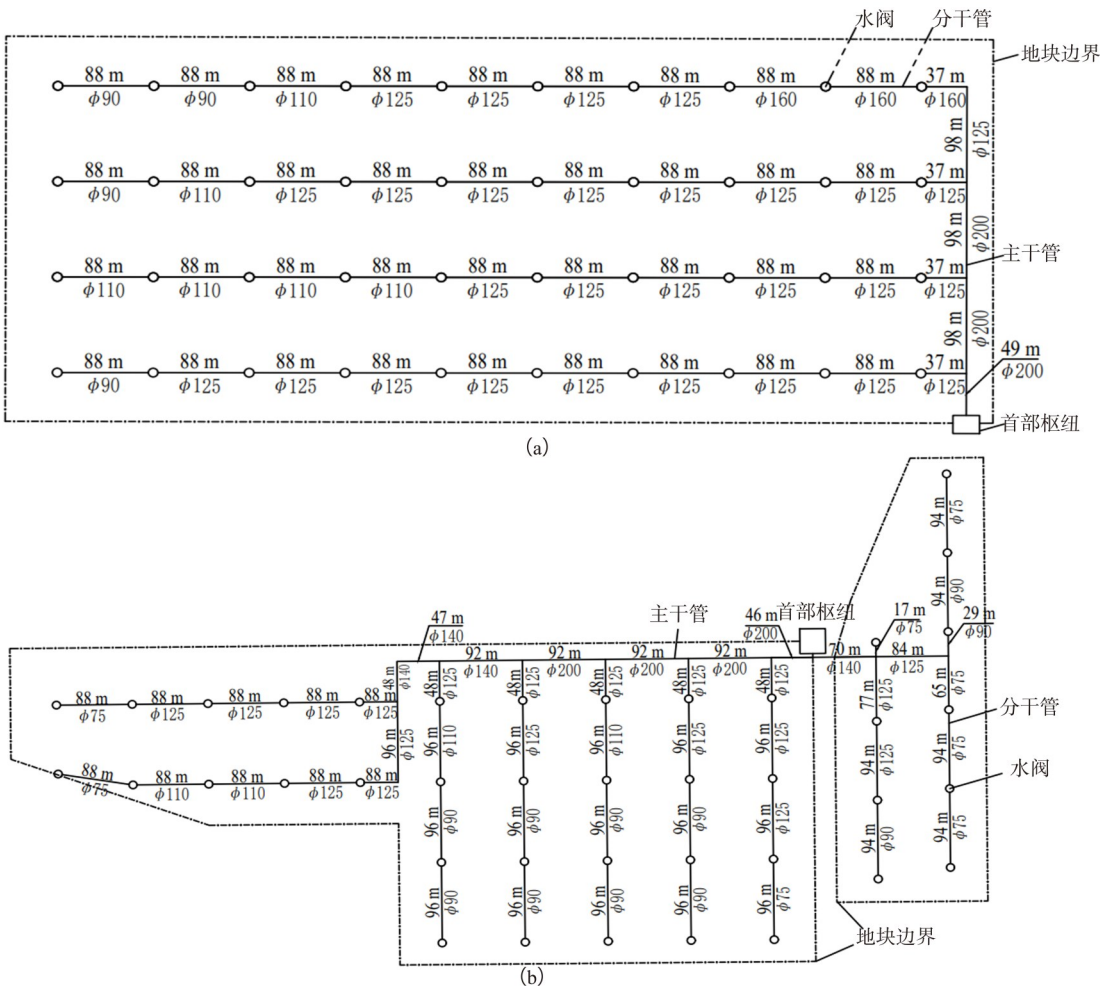
3.2.1 优化结果分析

系统 1 最优的单位面积年成本费用为 710.53 元/hm^2 ,较原工程方案的单位面积年成本费用 851.89 元/hm^2 降低了 16.59% 。系统 2 最优的单位面积年成本费用为 791.62 元/hm^2 ,较原工程方案的单位面积年成本费用 $1\ 003.17\text{ 元/hm}^2$ 降低了 21.09% 。两系统的优化设计结果见表 2,基于 Jaya 算法对两系统优化设计后的管段布置见图 2。

表 2 滴灌系统管网优化设计结果

Table 2 Drip irrigation system pipe network optimization design results

滴灌系统 Drip system	管道类型 Piping type	管径/mm Pipe diameter	数量/根 Quantities	年成本费用/(元/hm ²) Annual cost per unit area
系统 1 System 1	干管 Main	200	3	710.53
		160	3	
		125	28	
		110	6	
	支管 Branch	90	4	
系统 2 System 2	干管 Main	200	4	791.62
		140	4	
		125	19	
		110	4	
		90	11	
	支管 Branch	75	8	
		75	78	



干管和支管 φ200、φ160、φ96 等管径单位均为 mm。

Pipe diameters of φ200, φ160, φ96, etc. for trunk and branch pipes are in mm.

图 2 基于 Jaya 算法对系统 1(a)和系统 2(b)优化设计后的管段布置图

Fig. 2 Pipe section layout after optimized design of system 1 (a) and system 2 (b) based on Jaya's algorithm

50 次运行结果与最优结果的相对偏差在各偏差范围内出现次数的统计见表 3。基于 Jaya 算法得到的系统 1 和系统 2 优化结果的相对偏差小于 3% 的概率分别为 24% 和 96%，小于 5% 的概率分别为 74% 和 100%，小于 10% 的概率均为 100%，说明 Jaya 算法在该研究问题上收敛性好，稳定性强，可以满足滴灌管网优化对算法的收敛稳定的要求。

表 3 相对偏差在各偏差范围内出现的次数
Table 3 Number of times the relative deviation occurs within each range of deviation

滴灌系统 Drip system	相对偏差/% Relative deviation	出现次数 Number of occurrences
系统 1 System 1	<1	6
	<3	12
	<5	37
	<8	49
	<10	50
	≥10	0
系统 2 System 2	<1	2
	<3	43
	<5	50
	<8	50
	<10	50
	≥10	0

3.2.2 基于 Jaya 算法与遗传算法的优化结果对比分析

基于遗传算法得到系统 1 和系统 2 的最优单位面积年成本费用分别为 707.93 和 789.17 元/hm²，较原工程方案的单位面积年成本费用 851.89 和 1 003.17 元/hm² 分别降低了 16.90% 和 21.33%。虽然基于 Jaya 算法得到的最优优化百分比比较遗传算法低，但不足 0.4%，表明 Jaya 算法的结果和遗传算法很接近，具有与遗传算法相当的全局搜索能力、探索能力和计算精度，可以达到滴灌管网优化设计领域的要求。

4 结 论

本研究通过综合考虑设备和管道折旧费用及灌区运行管理费用，建立以单位面积年成本费用最低为目标的滴灌管网优化设计数学模型，基于 Jaya 算法进行了单目标优化设计。结果表明：Jaya 算法在滴灌管网优化设计中表现出色，对新疆某大型滴

灌区的 2 个系统优化后，两系统单位面积年成本费用分别降低了 16.59% 和 21.09%。此外，优化设计结果的相对偏差率均保持在 10% 以内，甚至能保持在 5% 以内，说明 Jaya 算法在滴灌管网优化设计中收敛稳定且计算精度高。基于 Jaya 算法得到的最优结果和遗传算法很接近，表明 Jaya 算法在全局搜索和探索能力上与遗传算法相当，能够满足滴灌管网优化设计的要求。因此，在滴灌管网单目标优化设计问题中，Jaya 算法是一种有效方法。

参考文献 References

[1] 张涛. 中国将实行最严格节水措施[J]. 生态经济, 2023,39(12):9-12
Zhang T. China will implement the strictest water-saving measures [J]. *Ecological Economy*, 2023,39(12):9-12(in Chinese)

[2] 李鹏, 曹华, 詹伟, 曹引波, 范永申, 马春芽. 滴灌节水技术应用机理及热点研究进展[J]. 节水灌溉, 2024
Li P, Cao H, Zhan W, Cao Y B, Fan Y S, Ma C Y. Application mechanism of drip irrigation water saving technology and hot spot research progress[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(in Chinese)

- [3] 石雪侠. 农业水资源的可持续利用策略研究[J]. 现代农业研究, 2020, 26(9):42-43
Shi X X. Study on sustainable utilization strategy of agricultural water resources [J]. *Modern Agriculture Research*, 2020, 26(9): 42-43 (in Chinese)
- [4] 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
Lü S L, Lu S H, Wei Z W, 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(in Chinese)
- [5] Liu R Z, Guo F C, Sun W Q, Wang Y, Zhang Z H, Ma X Y. A new method for optimization of water distribution networks while considering accidents[J]. *Water*, 2021, 13(12):1651
- [6] 尚洪彬, 桂子钦, 段晓宁, 胡明宇, 何武全. 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 H B, Gui Z Q, Duan X N, Hu M Y, He W Q. 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(in Chinese)
- [7] 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 Y F, Jiang D. Optimization of the tree-shaped pipeline network layout based on rotation irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(5):75-83, 95(in Chinese)
- [8] 王永涛, 刘坚, 李家春, 蔡家斌, 索鑫宇, 李继学. 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 Y T, Liu J, Li J C, Cai J B, Suo X Y, Li J X. Optimal design of tree-shaped irrigation pipe network based on the mixed algorithm of simulated annealing and cuckoo[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(12): 50-55(in Chinese)
- [9] 胡宇祥, 彭军志, 殷飞, 李娜. 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 Y X, Peng J Z, Yin F, Li N. Optimization and parameter analysis of pipe network layout in micro irrigation field [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(6):25-30, 52(in Chinese)
- [10] Zhao R H, He W Q, Lou Z K, Nie W B, Ma X Y. 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
- [11] Li Z, Lin Z J, Lyu S L, Wei Z W, Huang H Q. Tree-type irrigation pipe network planning and design method using ICSO-ASV[J]. *Water*, 2020, 12(7):1985
- [12] 李道西, 胜志毫. 灌溉管网优化设计研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2018(2):23-27
Li D X, Sheng Z H. Research progress on the optimal design of irrigation pipe network[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(2): 23-27 (in Chinese)
- [13] 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 P H, Liu H S, Hu Y J. 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(in Chinese)
- [14] 王文婷, 郭乙霏. 基于粒子群算法的树状灌溉管网系统优化设计[J]. 节水灌溉, 2018(5):75-78
Wang W T, Guo Y F. Optimal design of tree irrigation pipe network system based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(5):75-78(in Chinese)
- [15] Liu Y, Tao Z P, Yang J, Mao F. The modified artificial fish swarm algorithm for least-cost planning of a regional water supply network problem[J]. *Sustainability*, 2019, 11(15):4121
- [16] Ezzeldin R M, Djebedjian B. Optimal design of water distribution networks using whale optimization algorithm[J]. *Urban Water Journal*, 2020, 17(1):14-22
- [17] Duan X N, He W Q, Wang Y B, Liu Q C, Tian Y F, Shi X W. Optimization design method of a large-scale multilevel gravity drip irrigation pipe network system based on atom search optimization [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2022, 148(7): 4022023
- [18] Batmaz V, Kayaalp N. Optimization of water distribution networks using hybrid BBO-IWO algorithm [J]. *Urban Water Journal*, 2023, 20(2): 205-222
- [19] 严智, 张鹏, 谢川. 基于Jaya的贝叶斯网络结构学习算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(19):173-177, 184
Yan Z, Zhang P, Xie C. Research on Bayesian network structure learning algorithm based on Jaya [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(19):173-177, 184(in Chinese)
- [20] 郭伟欣, 张志东. 基于Jaya算法的遮阴条件下光伏MPPT控制研究[J]. 电源学报, 2024
Guo W X, Zhang Z D. Research on photovoltaic MPPT control under shading conditions based on Jaya algorithm [J]. *Journal of Power Supply*, 2024(in Chinese)
- [21] 张广才, 赵文龙, 万春风. 基于改进Jaya算法和组合相关函数的结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2023, 42(20):300-308
Zhang G C, Zhao W L, Wan C F. Structural damage identification based on an improved Jaya algorithm and a combined correlation function[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(20):300-308(in Chinese)
- [22] Venkata Rao R. Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems [J]. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2016, 7: 19-34
- [23] Abu Zitar R, Al-Betar M A, Awadallah M A, Abu Doush I, Assaleh K. An intensive and comprehensive overview of JAYA algorithm, its versions and applications[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, 29(2):763-792
- [24] 郭鹏, 赵文超, 雷坤. 基于改进Jaya算法的双资源约束柔性作业车间调度[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(2):480-487
Guo P, Zhao W C, Lei K. Dual-resource constrained flexible job shop

- optimal scheduling based on an improved Jaya algorithm [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2023, 53(2):480-487(in Chinese)
- [25] 刘景森, 杨杰, 李煜. 改进 JAYA 算法求解工程设计优化问题[J]. 电子学报, 2023, 51(9):2469-2480
- Liu J S, Yang J, Li Y. Solving engineering optimization design problems based on improved JAYA algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(9):2469-2480(in Chinese)
- [26] 李婷婷. 基于自适应遗传算法的给水管网优化设计研究[D]. 北京: 清华大学, 2017
- Li T T. Research on the optimal water supply network design based on adaptive genetic algorithm [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017(in Chinese)
- [27] 李千禧, 何武全, 李渤, 蔡明科. 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 Q X, He W Q, Li B, Cai M K. 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 (in Chinese)
- [28] Wang D S, Tan D P, Liu L. Particle swarm optimization algorithm: An overview[J]. *Soft Computing*, 2018, 22(2):387-408
- [29] Buddala R, Mahapatra S S. Improved teaching - learning-based and JAYA optimization algorithms for solving flexible flow shop scheduling problems[J]. *Journal of Industrial Engineering International*, 2018, 14(3):555-570
- [30] GB/T 50485—2020 微灌工程技术规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2020
- GB/T 50485—2020 Technical standard for microirrigation engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 2020(in Chinese)
- [31] GB/T 50363—2018 节水灌溉工程技术规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2018
- GB/T 50363—2018 Technical standard for water-saving irrigation project [S]. Beijing: China Planning Press, 2018(in Chinese)
- 责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 樊凯, 硕士研究生, 就读于西北农林科技大学水利与建筑工程学院。在校期间获得专业奖学金 5 次, 通过英语四级和 Auto CAD 二级考试。主要从事微灌管网优化设计与开发辅助软件相关工作, 参与“十四五”重点研发项目、新疆维吾尔自治区重大科技专项项目、陕西省水利科技计划项目等科研课题。



通讯作者简介: 王文娥, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事流体机械与流体动力学、节水灌溉理论与技术研究, 中国水利学会水力学专业委员会委员, 《水利与建筑工程学报》编委。在 *Agriculture Water Management*、*Flow Measurement and Instrumentation*、*Agronomy*、《中国农业大学学报》、《农业工程学报》、《水利学报》、《水科学进展》、《农业机械学报》、《水力发电学报》等核心期刊及国际会议论文集上发表 110 余篇科研论文, 其中第一作者及通讯作者 70 篇 (SCI/EI 收录 20 篇), 申请专利 6 项; 编写科研专著 1 部、教材 2 部。参与完成的“渠灌类型区农业高效用水模式与产业化示范”获 2003 年陕西省科学技术一等奖、2004 年完成的“内蒙古河套灌区下游早秋浇节水保墒决策支持系统”获内蒙古巴彦淖尔盟科技进步二等奖, 2008 年以第一作者发表在《农业工程学报》上的文章获第六届中国科协期刊优秀学术论文二等奖。2020 年获陕西省教学成果二等奖、西北农林科技大学教学成果特等奖。主持国家自然科学基金 2 项, 主持公益性行业 (农业) 科研专项课题、国家科技支撑计划项目子课题、“863”项目子课题、教育部博士点新教师基金项目、陕西省自然科学基金 (面上、青年)、陕西省科技计划项目、杨凌示范区科技计划项目等 10 余项科研课题, 教改项目 4 项。