

机压微灌管网系统布置与管径同步优化设计

马朋辉 刘韩生 胡亚瑾

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 微灌管网系统由轮灌管网(支毛管)和续灌管网(干管)组成,以往的研究没有将其作为一个系统,且不能实现布置与管径组合的同步优化,研究成果对坡度均匀的大型灌区机压微灌独立管网系统的优化也不适用。因此,提出了机压微灌管网系统优化的方法,并建立了优化设计数学模型,采取整数及实数编码的混合编码方法,通过遗传算法求解,同时实现轮灌管网及续灌管网的布置优化及管径组合优化,得出的管径为标准商用管径,无需调整。实例计算结果表明,该模型与算法在求解机压微灌管网系统优化设计问题上具有良好的优化性能和求解精度。与传统设计方案相比较,轮灌管网和续灌管网的优化设计方案单位面积年费用分别降低了 14.85% ~ 35.59% 和 4.12% ~ 12.99%,节省投资效果明显。

关键词: 微灌管网系统; 优化布置; 优化设计; 同步优化; 遗传算法

中图分类号: S274.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)04-0236-09

Simultaneous Optimization of Layout and Pipe Diameter for Pumping Micro-irrigation Pipe Network System

MA Penghui LIU Hansheng HU Yajin

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The problem of selecting the best pattern of layout and pipe diameter of each pipe in the micro-irrigation pipe network system has long been given considerable attention by engineers and obtained numerous research results. Micro-irrigation pipe network system is composed of rotational irrigation network (manifold and lateral) and continuous irrigation network (main and submain pipe). Previous studies did not treat micro-irrigation pipe network system as an integral and can not realize the simultaneous optimization of layout and pipe diameter combination. In addition, research results can not be applied to the optimization of pumping micro-irrigation pipe network system for large irrigation area. The optimization method of pumping micro-irrigation pipe network system was proposed. The mathematical models of rotational irrigation network and continuous irrigation network were established. The best control area, layout and pipe diameter of rotational and continuous irrigation network can be obtained simultaneously by solving the mathematical model with dual coding genetic algorithm. Commercial pipe diameters can be obtained through the optimization without adjustment. Examples showed that the algorithm was of good convergence and high precision on optimization problem of pumping micro-irrigation pipe network system. Compared with the traditional design scheme, the annual total cost per unit irrigated area of optimized design scheme for rotational irrigation network was reduced by 14.85% ~ 35.59%, and the annual total cost per unit irrigated area of optimized design scheme for continuous irrigation network was reduced by 4.12% ~ 12.99%. The simultaneous optimization method of layout and pipe diameter can be applied to the optimal design of pumping micro-irrigation pipe network system on uniformly sloping fields which with sufficient water source. The research result had important theoretical value and practical significance in the optimization of pumping micro-irrigation pipe network system for large irrigation area.

Key words: micro-irrigation pipe network system; optimal layout; optimal design; simultaneous optimization; genetic algorithm

收稿日期: 2018-10-23 修回日期: 2018-11-12

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503125)

作者简介: 马朋辉(1990—),男,博士生,主要从事灌溉管网优化研究, E-mail: mapenghui0371@163.com

通信作者: 刘韩生(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事水力学与水工建筑物研究, E-mail: hanshengliu@126.com

0 引言

管网优化包括优化布置和优化设计。优化布置主要进行管网干支管线的选择,力求管网总长度最短或总投资最小的最佳管网结构形式。优化设计则是以管网布置形式为依据,通过水力计算寻求系统造价最低的最佳管径组合方案。

优化布置是优化设计的前提和基础,布置形式合理与否直接影响管道总长度及工程投资的经济合理性,国内外学者对此进行了大量研究^[1-8]。相较于优化布置,优化设计对整个系统投资影响较大,所产生的经济效益也较显著。国内外学者对管网优化设计研究非常重视,取得的研究成果也较多。线性规划法^[9]、非线性规划法^[10]、动态规划法^[11]等传统方法,以及近年来发展起来的遗传算法^[12]、人工神经网络^[13]、蚁群算法^[8]等新型智能算法先后被应用于解决管网优化设计问题,极大促进了管网输水技术的应用与推广。

近年来,极端气候频发,水资源供需矛盾日益突出。随着经济的发展,中国工业和城市用水将进一步增加,农业水资源不足的矛盾将更加突出,发展节水灌溉尤其是微灌显得尤为重要。在进行地面坡度较为均匀的大型灌区微灌管网系统优化过程中,当采用井水作为灌溉水源时,可以出水量控制其规模;当采用河水、库水等作为灌溉水源且水量充足时,对于一个待规划的地块,可以将其规划为一个大系统,也可以将其规划为若干个独立的小系统,系统中各级管道的相对长度不同又可以组成多种规划方案,目前多是根据工程经验人为确定单个系统的控制面积,缺乏经济分析。因此,需要确定合理的单个系统的形状、控制面积并进行优化设计,此时微灌管网系统的布置未定,系统中各需水节点的位置及流量也尚不确定。上述的管网优化布置研究^[4-8]均是基于各需水节点位置及流量已定的情况,而管网优化设计^[9-13]也均为灌溉面积及管网布置已定的情况,显然前述优化方法及模型对大型灌区微灌独立管网系统的优化并不适用。本文以灌区微灌管网系统布置和管径组合的同步优化为研究目标,建立轮灌管网及续灌管网的优化数学模型,通过遗传算法求解,同时获得相应管网的布置及管径组合方案。

1 微灌管网系统优化总思路

微灌管网系统一般由干管、分干管、支管及毛管组成,其中干管及分干管一般采用续灌的方式,组成续灌管网,支管及毛管一般采用轮灌的方式,组成轮灌管网。机压微灌管网系统示意图见图1。目前微

灌管网优化方面的研究成果大多仅涉及到某一级管道或轮灌管网的优化,而对微灌管网系统的优化设计问题研究不够^[14-19]。实际上,微灌各级管道间有密切的水力联系,各级管道的投资大小也相互影响,在优化过程中,应将微灌管网系统作为一个整体,寻求整个管网系统的最优方案。机压微灌管网系统的优化可以按照一定的顺序进行,即先进行轮灌管网的优化,确定出轮灌管网的形状、面积后,再以此为基础从系统中只有一个轮灌管网到横向、竖向各有一个或多个轮灌管网进行优化计算,以此进行机压微灌管网系统的优化设计。

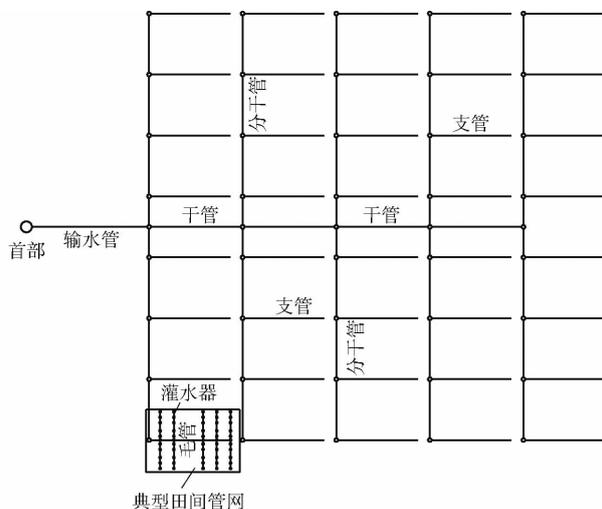


图1 机压微灌管网系统示意图

Fig. 1 Schematic of pumping micro-irrigation pipe network system

轮灌管网进口压力水头大,所需的动力费用高,但管网内所允许的水头损失大,因此支毛管可以选用较小的管径以节省投资;反之亦然。毛管的规格型号根据作物、土壤性质、农业技术及管理等因素选定,可以作为已知因素,因此轮灌管网优化的目的是在不限定轮灌管网面积的情况下确定使轮灌管网单位面积年费用最小的管网布置形式(面积及支、毛管管长)、支管管径及轮灌管网进口压力水头。在轮灌管网的优化中,假定支管和毛管等量出流,以轮灌管网内各灌水器的工作压力水头在满足灌水均匀度要求所允许的压力水头范围内作为约束条件,以保证灌水质量。

机压微灌续灌管网中,水泵加压所需动力费、管网投资与轮灌管网相同,为此消彼长的关系。因此机压微灌续灌管网优化一方面要降低管网投资,另一方面又要降低管网的动力费用,优化的目的主要是寻求管网年费用最低的优化方案。在轮灌管网优化完成后,续灌管网中各管段的流量就可以确定。以轮灌管网优化结果为基础,在不限定续灌管网控制面积的情况下从系统中只有一个轮灌管网到横

向、竖向各有多个轮灌管网进行经济分析,从而确定单位面积年费用最低时续灌管网的控制面积、干管及分干管的管径、管长。将轮灌管网和续灌管网优化结果相结合即为机压微灌管网系统的优化。

在管网水力计算过程中,管道沿程水头损失按《微灌工程技术规范》^[20]推荐公式进行计算,即

$$h_f = f \frac{Q_i^m}{D_i^b} L_i \quad (1)$$

式中 h_f ——管道沿程水头损失, m
 Q_i ——管道流量, L/h
 D_i ——管道内径, mm
 L_i ——管道长度, m
 f ——摩阻系数 m ——流量指数
 b ——管径指数

各种管材水头损失计算系数参见《微灌工程技术规范》^[20]。支、毛管按微灌用聚乙烯管管径大于 8 mm 的情况取值,干管及分干管按硬塑料管的情况取值。

2 机压微灌管网系统优化模型

2.1 轮灌管网优化模型

以不设调压管且毛管双向布置的轮灌管网为研究对象,其优化包括布置优化和管径优化。布置优化主要是确定轮灌管网的控制面积,支、毛管的长度及支管位置;管径优化主要是确定支管的管径。规定毛管上 2 个灌水器之间的管道为一个管段,支管上 2 条毛管之间的管道为一个管段,毛管不变径且轮灌管网内所有毛管均选用同一规格管径,支管采用变径设计,每一管段只选用一种标准管径。规定顺水流方向左手边为左侧,右手边为右侧,以左侧毛管上灌水器个数、右侧毛管上灌水器个数、支管各管段管径及轮灌管网进口压力水头为决策变量,以轮灌管网单位面积年费用最低为目标函数建立轮灌管网优化模型,从轮灌管网中支管只有一个管段到多个管段进行优化计算。

2.1.1 目标函数

以轮灌管网单位面积年费用最低为目标,计算式为

$$\min F_r = 10\,000 \times \frac{(a+p) \left[S_{m0} C_{mj} + \sum_{i=2}^{N_m} S_m C_{mj} + N_m (L_{21} + L_{22}) C_l \right] + F_{rb}}{[S_{m0} + (N_m - 1) S_m] (L_{21} + L_{22})} \quad (2)$$

$$\text{其中 } a = \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (3)$$

$$F_{rb} = \frac{ET_r Q_{r0} H_{r0}}{367.2 \eta} \quad (4)$$

$$L_{21} = S_{e0} + (n_1 - 1) S_e \quad (5)$$

$$L_{22} = S_{e0} + (n_2 - 1) S_e \quad (6)$$

式中 F_r ——轮灌管网单位面积年费用,元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)
 a ——投资年折算系数
 p ——年平均维修费率
 S_{m0} ——支管第一管段的长度, m
 S_m ——支管其余管段的长度, m
 C_{mj} ——支管选用第 j 种规格管径时的单价,元/m
 C_l ——选用的毛管单价,元/m
 L_{21} ——左侧毛管长度, m
 L_{22} ——右侧毛管长度, m
 F_{rb} ——轮灌管网水泵年动力费,元/a
 N_m ——支管管段数
 r ——年利率, %
 t ——折旧年限, a
 E ——电价,元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)
 T_r ——轮灌管网年工作小时数, h
 Q_{r0} ——轮灌管网进口流量, m^3/h
 H_{r0} ——轮灌管网进口压力水头, m
 η ——泵站效率
 S_{e0} ——毛管第一管段的长度, m
 S_e ——毛管其余管段的长度, m
 n_1 ——左侧毛管上灌水器的个数,即左侧毛管管段数
 n_2 ——右侧毛管上灌水器的个数,即右侧毛管管段数

2.1.2 约束条件

(1) 灌水器工作压力约束

以一个轮灌管网中所有灌水器的工作压力水头均在满足灌水均匀度要求所允许的压力水头范围内为约束条件,将轮灌管网作为一个整体优化,有

$$H_{\min} \leq H_k \leq H_{\max} \quad (7)$$

$$\text{其中 } H_k = H_{r0} + \sum_{i=1}^{I(k_1)} \left(\frac{I_1 L_i}{\sqrt{1+I_1^2}} - \alpha f L_i \frac{Q_i^m}{D_i^b} \right) + \sum_{i=1}^{I(k_2)} \left(\frac{I_2 L_i}{\sqrt{1+I_2^2}} - \alpha f L_i \frac{Q_i^m}{D_i^b} \right) \quad (8)$$

式中 H_k ——轮灌管网中第 k 个灌水器的压力水头, m

H_{\min} ——满足灌水均匀度要求的灌水器允许最小工作压力水头, m

H_{\max} ——满足灌水均匀度要求的灌水器允许最大工作压力水头, m

I_1 ——顺支管方向的地形坡度

I_2 ——顺毛管方向的地形坡度

$I(k_1)$ ——从支管入口到轮灌管网中第 k 个灌水器所经过的支管管段数

$I(k_2)$ ——从支管入口到轮灌管网中第 k 个灌水器所经过的毛管管段数

α ——考虑局部水头损失的加大系数,取 1.05

(2) 管径约束

支管顺水流方向前一段管道所选标准管径应不小于后一段管道所选标准管径,即

$$D_{i,j} \geq D_{i+1,j} \quad (9)$$

式中 $D_{i,j}$ ——第 i 段管道选用第 j 种标准规格的管径,mm

$D_{i+1,j}$ ——第 $i+1$ 段管道选用第 j 种标准规格的管径,mm

2.2 续灌管网优化模型

续灌管网优化也包括布置优化和管径优化。布置优化主要是确定续灌管网的控制面积、干管及分干管的长度;管径优化主要是确定在此布置形式及规模下干管及分干管各段的管径。规定干管上相邻分干管之间的管道为一个管段,分干管上相邻支管之间的管道为一个管段,干管及分干管均采用变径设计,每一管段只选用一种标准管径。以水泵扬程、干管及分干管各管段管径为决策变量,以单位面积年费用最低为目标函数,建立机压微灌续灌管网优化模型,从续灌管网中只有一个轮灌管网到横向、竖向各有多个轮灌管网进行优化计算。

2.2.1 目标函数

以续灌管网单位面积年费用最低为目标,计算式为

$$\min F_c = 10\,000 \times \frac{(a+p) \left(C_j L_d + \sum_{i=1}^{N_2-1} C_{ij} L_m + \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{M_0} C_{ijk} L_{sij} \right) + F_{cb}}{(N_2-1)L_m(M-1)L_s} \quad (10)$$

$$\text{其中 } F_{cb} = \frac{ET_c Q_{c0} H}{367.2 \eta} \quad (11)$$

式中 F_c ——续灌管网单位面积年费用,元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)

C_j ——输水管选用第 j 种规格标准管径时的单价,元/m

L_d ——输水管长度,m

C_{ij} ——第 i 段干管选用第 j 种规格标准管径时的单价,元/m

N_2 ——干管上分干管的条数,即干管管段数

M ——分干管上支管的条数

M_0 ——一条分干管上的管段数,当 M 为奇数时, $M_0 = M - 1$;当 M 为偶数时, $M_0 = M$

C_{ijk} ——第 i 条分干管第 j 管段选用第 k 种规格标准管径时的单价,元/m

L_{sij} ——第 i 条分干管第 j 管段的长度,m

L_m ——干管管段长,即相邻分干管间距离,m

L_s ——分干管管段长,即相邻支管间距离,m

F_{cb} ——续灌管网水泵年动力费,元/a

T_c ——续灌管网年工作小时数,h

Q_{c0} ——续灌管网进口流量, m^3/h

H ——水泵扬程,m

2.2.2 约束条件

(1) 工作压力约束

续灌管网中分干管各节点压力水头应不低于轮灌管网进口压力水头,即

$$h_{1k} = H - h_b + \frac{I_1 L_d}{\sqrt{1 + I_1^2}} - \alpha f L_d \frac{Q_d^m}{D_d^b} + \sum_{i=1}^{I(k_3)} \left(\frac{I_1 L_m}{\sqrt{1 + I_1^2}} - \alpha f L_m \frac{Q_i^m}{D_i^b} \right) + \sum_{i=1}^{I(k_4)} \left(\frac{I_2 L_s}{\sqrt{1 + I_2^2}} - \alpha f L_s \frac{Q_i^m}{D_i^b} \right) - H_{c0} \geq 0 \quad (12)$$

式中 h_{1k} ——续灌管网中分干管各节点最小压力水头约束变量,m

h_b ——底阀、首部枢纽及吸水管水头损失之和,m

Q_d ——输水管流量,L/h

D_d ——输水管管径,mm

$I(k_3)$ ——从续灌管网入口到第 k 个分干管节点所经过的干管管段数

$I(k_4)$ ——从续灌管网入口到第 k 个分干管节点所经过的分干管管段数

(2) 管道承压能力约束

续灌管网中各管段的实际压力不大于管道承压能力,即

$$h_{2k} = H - h_b + \frac{I_1 L_d}{\sqrt{1 + I_1^2}} - \alpha f L_d \frac{Q_d^m}{D_d^b} + \sum_{i=1}^{I(k_3)} \left(\frac{I_1 L_m}{\sqrt{1 + I_1^2}} - \alpha f L_m \frac{Q_i^m}{D_i^b} \right) + \sum_{i=1}^{I(k_4)} \left(\frac{I_2 L_s}{\sqrt{1 + I_2^2}} - \alpha f L_s \frac{Q_i^m}{D_i^b} \right) - 102 H_c \leq 0 \quad (13)$$

式中 h_{2k} ——续灌管网中分干管各节点最大压力水头约束变量,m

H_c ——管道承压能力,MPa

(3) 管径约束

续灌管网中顺水流方向前一段管道所选标准管

径应不小于后一段管道所选标准管径,即

$$D_{i,j} \geq D_{i+1,j} \quad (14)$$

3 基于遗传算法的模型求解

3.1 编码

轮灌管网优化的决策变量为 $(D_1, D_2, \dots, D_N, n_1, n_2, H_{r0})$, 共有 $N+3$ 个决策变量, 将 D_1, D_2, \dots, D_N 与其管径序号一一对应形成一个有序的整数列, 采取整数编码方式, n_1, n_2 为整数, H_{r0} 为实数, 对 n_1, n_2 采取整数编码方式, 对 H_{r0} 采取实数编码方式。续灌管网优化的决策变量为 $(D_1, D_2, \dots, D_{N-1+NM_0}, D_d, H)$, 共有 $N-1+NM_0+2$ 个决策变量, 将 $D_1, D_2, \dots, D_{N-1+NM_0}, D_d$ 与其管径序号一一对应形成一个有序的整数列, 采取整数编码方式, 对 H 采取实数编码方式。

3.2 产生初始种群

在遗传算子一定的情况下, 初始种群对算法的效率和全局收敛性影响很大, 在算子效率难以提高的前提下改进初始种群的产生方法会收到很好的效果^[21]。本文采用解的不可行度进行初始种群的选择操作, 具体是通过定义一个阈值, 当一个解的不可行度大于阈值, 则该解被拒绝, 否则被接受并进入下一代遗传算法操作。为保证种群规模不变, 被拒绝的解由当前代中不可行度最小的解等量取代, 具体参见文献^[22]。

3.3 适应度函数设计

轮灌管网及续灌管网的优化模型均为带约束优化问题, 需先将其转化为无约束优化问题, 本文采用罚函数法实现上述转化。对于轮灌管网构造适应度函数

$$F_{fit1} = F_r + \lambda \sum_{i=1}^n |\min(0, H_k - H_{\min})| + \lambda \sum_{i=1}^n |\min(0, H_{\max} - H_k)| + \lambda \sum_{i=1}^n |\min(0, D_{i,j} - D_{i+1,j})| \quad (15)$$

其中 $\lambda = 1/t_k$ $t_{k+1} = \zeta t_k$ $\zeta \in (0, 1)$

式中 λ ——模拟退火惩罚因子

t_{k+1} ——第 $k+1$ 代退火温度

t_k ——第 k 代退火温度, $k=0$ 时称为初温

ζ ——温度冷却系数

对于续灌管网构造适应度函数

$$F_{fit2} = F_c + \lambda \sum_{i=1}^n |\min(0, h_{1k})| + \lambda \sum_{i=1}^n |\min(0, -h_{2k})| + \lambda \sum_{i=1}^n |\min(0, D_{i,j} - D_{i+1,j})| \quad (16)$$

3.4 遗传算子

(1) 选择算子: 首先进行群体中个体适应度的评价, 并以此为依据采取排序适应度分配的随机遍历抽样方法, 从种群中选取一定比例的个体并作为父辈繁殖子代。

(2) 交叉算子: 将种群中的奇数行与它的下一偶数行配对后进行单点交叉, 若最后一行为奇数行则此行不参与交叉操作。

(3) 变异算子: 以一定概率选择变异的基因位并在该位基因所允许的范围内随机变异。

4 应用

4.1 基本数据

某项目区种植枸杞, 土壤容重为 1.36 g/cm^3 , 采用膜下滴灌的灌溉方式, 水源为河水且充足, 干管方向的地形坡度为 $1/200$, 分干管方向的地形坡度为 $1/500$ 。考虑当地气候条件并根据经验选择设计耗水强度为 6 mm/d , 土壤计划湿润层深度为 0.7 m , 土壤设计湿润比为 50% , 田间持水率为 25% , 适宜土壤含水率上、下限(质量百分比)分别取为田间持水率的 90% 和 70% , 灌溉水利用系数为 0.9 。根据项目区的气候、土壤及作物种植情况选择毛管管径(内径)为 16 mm , 毛管间距为 2.5 m , 灌水器设计流量为 2.7 L/h , 灌水器允许最大工作压力水头为 12 m , 灌水器允许最小工作压力水头为 8 m , 灌水器间距为 0.5 m 。经计算最大净灌水定额为 23.8 mm , 设计灌水周期为 4 d , 设计灌水定额为 26.67 mm , 一次灌水延续时间为 11 h , 取系统日工作时间为 22 h , 则系统最大轮灌组数为 8 , 以此进行机压微灌管网系统优化设计。泵站到灌溉区域边界的距离(即输水管长度)为 50 m , 单座泵站工程投资为 20000 元, 所选毛管单价为 2.0 元/ m , PE支管单价见文献^[19], UPVC干管单价见表1。

表1 UPVC干管单价

Table 1 Unit price of UPVC main pipes

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	8.34	200	190.8	69.53
75	71.6	11.59	225	214.6	87.87
90	86.0	16.66	250	236.4	109.46
110	105.0	21.21	315	296.8	171.82
125	119.2	27.63	400	378.8	277.23
160	152.6	44.92	450	425.2	350.52

4.2 控制参数选取

算法中涉及的控制参数较多, 其中群体规模和最大遗传代数对计算结果的精度影响较大, 对这两个参数进行组合分析以确定合理取值, 其余参数均

是基于一般情况下的取值。

以群体规模 200、最大遗传代数 500、交叉概率 0.9、变异概率 1/NVAR(NVAR 为模型中变量个数)为基本遗传参数;以阈值的初始可变因子 0.4、最终可变因子 1.0、最大迭代次数 6 为初始种群不可行度选择的基本参数;罚函数法处理约束条件时模拟

退火惩罚因子中初温为 0.000 01,温度冷却系数为 0.99。

4.3 优化结果分析

轮灌管网的优化结果包括控制面积、支毛管管长、支管各管段管径及轮灌管网进口压力水头,具体见表 2。

表 2 轮灌管网优化计算结果

Tab. 2 Optimization results of rotational irrigation network

控制面积/ hm ²	单位面积 年费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	进口压 力水头/ m	支管 段数	支管 长度/m	左侧灌 水器数	左侧 毛管 长度/m	右侧 灌水 器数	右侧毛管 长度/m	顺水流方向支管各管段管径/mm
0.78	1 313.30	11.53	17	41.25	197	98.25	184	91.75	75,75,75,63,63,63,63,63,63,63,63,63,40,40,40,40,32,32

由于遗传算法采用概率变迁规则指导搜索方向,为克服随机因素对算法求解性能评估的干扰,将算法程序独立运行 100 次,比较每次运行结果与最优解的相对偏差,结果见表 3。本文 100 次的运行结果中,最优解为 1 313.30 元/(hm²·a),相对偏差小于 0.3% 的概率达到 55%,相对偏差小于 0.5% 的概率达到 81%,相对偏差小于 1% 的概率达到 100%,说明算法收敛性能稳定,具有很高的计算精度。

对微灌管网系统采取干管及分干管续灌、支管轮灌的方式,将分干管上同一位置的支管划分为一个轮灌组。以轮灌管网的优化结果为基础,通过续灌管网优化模型的求解得到优化结果:控制面积为 43.89 hm²,单位面积年费用为 744.73 元/(hm²·a),干管方向轮灌管网为 7 个,分干管方向轮灌管网为

表 3 轮灌管网计算结果与最优解相对偏差出现次数
Tab. 3 Occurrence number of relative deviation between calculation results and optimal solution of rotational irrigation network

相对偏差/%	出现次数	相对偏差/%	出现次数
<0.1	8	<0.5	81
<0.2	36	<1.0	100
<0.3	55	>1.0	0

8 个,水泵扬程为 34.20 m,系统流量为 122.43 m³/h。具体优化布置及优化设计结果分别见图 2 及表 4。

同样,为克服随机因素对算法求解性能评估的干扰,将算法程序独立运行 100 次,比较每次运行结果与最优解的相对偏差,结果见表 5。本文 100 次的运行结果中,最优解为 744.73 元/(hm²·a),相对

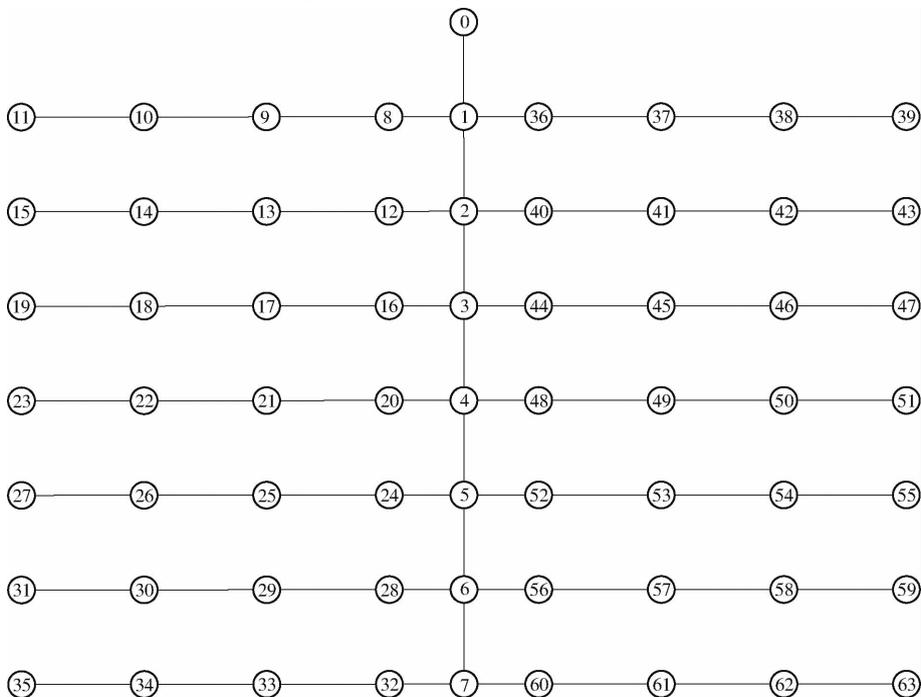


图 2 续灌管网优化布置结果

Fig. 2 Optimization layout results of continuous irrigation network

表4 续灌管网优化设计结果

Tab.4 Optimization design results of continuous irrigation network

管段 编号	长度/ m	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	外径/ mm	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	下游节点 水头/m	管段 编号	长度/ m	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	外径/ mm	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	下游节点 水头/m
1	50.00	122.43	200	1.09	27.12	33	190.00	17.49	75	1.21	21.13
2	41.25	104.94	200	1.02	27.12	34	190.00	17.49	75	1.21	16.49
3	41.25	87.45	160	1.33	26.90	35	190.00	17.49	75	1.21	11.86
4	41.25	69.96	160	1.06	26.81	36	95.00	17.49	90	0.84	26.43
5	41.25	52.47	160	0.80	26.85	37	190.00	17.49	90	0.84	25.03
6	41.25	34.98	125	0.87	26.78	38	190.00	17.49	75	1.21	21.16
7	41.25	17.49	110	0.56	26.83	39	190.00	17.49	63	1.71	11.82
8	95.00	17.49	90	0.84	26.05	40	95.00	17.49	75	1.21	25.19
9	190.00	17.49	75	1.21	21.41	41	190.00	17.49	75	1.21	21.32
10	190.00	17.49	75	1.21	16.78	42	190.00	17.49	75	1.21	17.45
11	190.00	17.49	75	1.21	12.15	43	190.00	17.49	75	1.21	13.57
12	95.00	17.49	90	0.84	26.05	44	95.00	17.49	75	1.21	24.96
13	190.00	17.49	75	1.21	21.42	45	190.00	17.49	75	1.21	21.09
14	190.00	17.49	75	1.21	16.78	46	190.00	17.49	75	1.21	17.22
15	190.00	17.49	75	1.21	12.15	47	190.00	17.49	75	1.21	13.35
16	95.00	17.49	90	0.84	25.82	48	95.00	17.49	75	1.21	24.88
17	190.00	17.49	75	1.21	21.19	49	190.00	17.49	75	1.21	21.01
18	190.00	17.49	75	1.21	16.56	50	190.00	17.49	75	1.21	17.14
19	190.00	17.49	75	1.21	11.93	51	190.00	17.49	75	1.21	13.26
20	95.00	17.49	90	0.84	25.74	52	95.00	17.49	90	0.84	26.15
21	190.00	17.49	75	1.21	21.11	53	190.00	17.49	90	0.84	24.76
22	190.00	17.49	75	1.21	16.47	54	190.00	17.49	75	1.21	20.88
23	190.00	17.49	75	1.21	11.84	55	190.00	17.49	63	1.27	11.54
24	95.00	17.49	90	0.84	25.77	56	95.00	17.49	75	1.21	24.84
25	190.00	17.49	75	1.21	21.14	57	190.00	17.49	75	1.21	20.97
26	190.00	17.49	75	1.21	16.51	58	190.00	17.49	75	1.21	17.10
27	190.00	17.49	75	1.21	11.87	59	190.00	17.49	75	1.21	13.23
28	95.00	17.49	90	0.84	25.70	60	95.00	17.49	90	0.84	26.14
29	190.00	17.49	75	1.21	21.07	61	190.00	17.49	90	0.84	24.74
30	190.00	17.49	75	1.21	16.44	62	190.00	17.49	75	1.21	20.87
31	190.00	17.49	75	1.21	11.80	63	190.00	17.49	63	1.27	11.53
32	95.00	17.49	90	0.84	25.76						

注:管道编号与下游节点编号相同。

偏差小于3%的概率达到46%,相对偏差小于5%的概率达到97%,小于10%的概率达到100%,说明收敛性能稳定,计算精度较高,可以满足实际生产要求。

表5 续灌管网计算结果与最优解相对偏差出现次数

Tab.5 Occurrence number of relative deviation between calculation results and optimal solution of continuous irrigation network

相对偏差/%	出现次数	相对偏差/%	出现次数
<1	2	<5	97
<2	11	<10	100
<3	46	>10	0

4.4 与传统设计方案的对比

在传统设计中,水源充足情况下续灌管网的控制面积通常是经验确定,不限定轮灌管网布置

的情况下支管管径也不易选定。以干管方向轮灌管网个数分别为5、7、10,支管管径(外径)分别取63、75、90 mm,进行传统设计并将其结果与前述优化设计结果进行对比。

由于毛管管径根据项目区的气候、土壤及作物种植情况选择,均为16 mm,故各种情况下单位面积年毛管费用均相等,此处单位面积轮灌管网年费用仅考虑不同部分(单位面积年费用为单位面积年支管费用与单位面积年动力费用之和),轮灌管网优化设计方案与传统设计方案结果的对比见表6。

续灌管网优化设计方案与传统设计方案结果的对比见表7。

轮灌管网优化设计方案与传统设计方案相比,优化部分的单位面积年费用降低了14.85%~

表6 轮灌管网优化设计方案与传统设计方案结果的对比

Tab.6 Comparison of results between optimized and traditional design schemes of rotational irrigation network

支管 管径/ mm	传统设计方案			优化设计方案			投资 降低率/ %
	单位面积 年支管费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积 年动力费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积 年费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积 年支管费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积 年动力费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积 年费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	
	63	75.60	113.47	189.07	68.52	92.48	
75	90.63	113.76	204.39	68.52	92.48	161.00	21.23
90	136.67	113.29	249.96	68.52	92.48	161.00	35.59

表7 续灌管网优化设计方案与传统设计方案结果的对比

Tab.7 Comparison of results between optimized and traditional design schemes of continuous irrigation network

类型	传统设计方案				优化设计方案				投资 降低 率/%
	支管 管径/ mm	单位面积年 固定投资费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积 年动力费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积 年费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积年 固定投资费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积 年动力费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积 年费用/ (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)		
	干管方向 5 个轮灌管网	63	440.33	336.43	776.76	470.38	274.35	744.73	
	75	536.95	285.18	822.13	470.38	274.35	744.73	9.41	
	90	540.17	284.05	824.22	470.38	274.35	744.73	9.64	
干管方向 7 个轮灌管网	63	461.03	327.83	788.86	470.38	274.35	744.73	5.59	
	75	550.80	286.48	837.28	470.38	274.35	744.73	11.05	
	90	547.51	280.43	827.94	470.38	274.35	744.73	10.05	
干管方向 10 个轮灌管网	63	498.17	321.67	819.84	470.38	274.35	744.73	9.16	
	75	568.49	287.47	855.96	470.38	274.35	744.73	12.99	
	90	575.47	277.79	853.26	470.38	274.35	744.73	12.72	

35.59%,续灌管网优化设计方案与传统设计方案相比,单位面积年费用降低了4.12%~12.99%,节省投资效果明显。

5 结论

(1)提出了机压微灌管网系统优化设计方法,即先进行轮灌管网的优化,然后以轮灌管网的优化结果为基础,从一个管网系统中只有一个轮灌管网到横向、竖向各有多个轮灌管网进行优化计算。

(2)建立了机压微灌管网系统优化设计的数学模型,并给出了基于遗传算法的求解方法。将轮灌管网作为一个整体,以单位面积年费用最低为目标函数建立了轮灌管网优化模型,通过求解可以直接得到其布置形式、管径组合方案、控制面积及进口压力水头。以轮灌管网的优化设计结果

为基础,以单位面积续灌管网年费用最低为目标函数建立了续灌管网优化模型,通过求解可以得到续灌管网的布置形式、管径组合方案、控制面积及水泵扬程。

(3)采用基于整数和实数的混合编码方法,得出的管径值为标准商用管径,无需调整,避免了圆整化处理对解可行性和最优性的破坏。采用罚函数法处理约束条件,应用遗传算法进行优化计算。实例结果表明,算法收敛性能稳定,具有较高的计算精度。

(4)轮灌管网和续灌管网的优化设计方案与传统设计方案相比较,单位面积年费用分别降低了14.85%~35.59%和4.12%~12.99%,节省投资效果明显。

(5)该研究适用于地面坡度较为均匀、灌溉水源有保证的大型灌区机压微灌管网系统的优化。

参 考 文 献

- [1] BURAS N, SCHWEIG Z. Aqueduct route optimization by dynamic programming [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1969, 95(5):243-251.
- [2] ROWELL W, BARNES J. Obtaining layout of water distribution systems [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1982, 108(1):137-148.
- [3] 林性粹,张新平. 利用正交表优化设计自压式低压管灌系统[J]. 灌溉排水,1993,12(4):25-29.
LIN Xingcui, ZHANG Xinping. The optimal designing principle and method for gravitational low pressured pipe irrigation using the orthogonal scheme [J]. Irrigation and Drainage, 1993, 12(4): 25-29. (in Chinese)
- [4] 周荣敏,林性粹. 应用单亲遗传算法进行树状管网优化布置[J]. 水利学报,2001,32(6):14-18.
ZHOU Rongmin, LIN Xingcui. Application of single parent genetic algorithm for optimization of tree pipe network layout [J].

- Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(6): 14-18. (in Chinese)
- [5] 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 Xiaoyi, FAN Xingye, ZHAO Wenju, 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. (in Chinese)
- [6] 付玉娟,蔡焕杰.基于列队竞争算法的重力输配水管网优化设计[J].农业机械学报,2008,39(6):118-122.
FU Yujuan, CAI Huanjie. Pipe network optimization for maximal utilization rate of gravity head based on LCA [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 118-122. (in Chinese)
- [7] 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 Jianjun, DING Yucheng, ZHAO Wanhua. Optimization of gravity tree-type pipe network based on dual coding genetic algorithm and graph theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 81-85. (in Chinese)
- [8] MASOUMI M, KASHKOOLI B S, MONEM M J, et al. Multi-objective optimal design of on-demand pressurized irrigation networks [J]. Water Resources Management, 2016, 30(14):1-13.
- [9] 白丹.自压喷灌干管网的优化计算[J].农业机械学报,1995,26(2):43-46.
BAI Dan. The optimum design for gravity sprinkler pipe network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995, 26(2): 43-46. (in Chinese)
- [10] LANSEY K E, MAYS L W. Optimization model for water distribution system design [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(10): 1401-1418.
- [11] 王新坤,程冬玲,林性粹.单井滴灌干管网的优化设计[J].农业工程学报,2001,17(3):41-44.
WANG Xinkun, CHENG Dongling, LIN Xingcui. Optimum design of main pipe net for single well [J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(3): 41-44. (in Chinese)
- [12] 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,2009,40(9):63-67.
WANG Xinkun. Optimization of pumping tree pipe network by using annealing-genetic algorithms based on infeasible degree [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 63-67. (in Chinese)
- [13] 周荣敏,雷延峰,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 Rongmin, LEI Yanfeng, LIN Xingcui. Genetic optimization layout and artificial neural networks optimal design of pressurized tree water-pipe network [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 41-44. (in Chinese)
- [14] 陈渠昌,郑耀星.微灌田间管网支毛管优化设计探讨[J].灌溉排水,1996,15(1):17-21.
CHEN Quchang, ZHENG Yaoquan. An optimization model for length design of branches and laterals in micro-irrigation pipe system [J]. Irrigation and Drainage, 1996, 15(1): 17-21. (in Chinese)
- [15] 白丹,王新.基于遗传算法的多孔变径管优化设计[J].农业工程学报,2005,21(2):42-45.
BAI Dan, WANG Xin. Optimum design for tapered diameter pipeline with multiple outlets based on genetic algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 42-45. (in Chinese)
- [16] 王新坤,蔡焕杰.微灌坡地双向毛管最佳支管位置遗传算法优化设计[J].农业工程学报,2007,23(2):31-35.
WANG Xinkun, CAI Huanjie. Optimal design for the best submain position of micro-irrigation on slope with paired laterals by genetic algorithms [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 31-35. (in Chinese)
- [17] 白丹.微灌田间管网的优化[J].水利学报,1996(8):59-64.
BAI Dan. Optimum design of the field network for micro-irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(8): 59-64. (in Chinese)
- [18] 白丹.微灌田间管网的混合整数规划模型[J].农业机械学报,1995,26(1):45-49.
BAI Dan. Mixed integer programming of the field network for drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995, 26(1): 45-49. (in Chinese)
- [19] 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.
LI Yuannong, ZHU Feng. Optimization of basic irrigation controlling area network for micro-irrigation based on maximum control area and minimum cost models [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 80-87. (in Chinese)
- [20] 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. GB/T 50485—2009 微灌工程技术规范[S].北京:中国计划出版社,2009.
- [21] 唐世浩,朱启疆.遗传算法中初始种群与交叉、变异率对解的影响及其解决方案[J].科技通报,2001,17(3):1-7.
TANG Shihao, ZHU Qijiang. Effects of the initial population, crossover and mutation rate to the results of genetic algorithms and a possible solution scheme [J]. Bulletin of Science and Technology, 2001, 17(3): 1-7. (in Chinese)
- [22] 王跃宣,吴澄,胡昔祥,等.求解约束优化问题的退火遗传算法[J].高技术通讯,2004,14(7):10-14.
WANG Yuexuan, WU Cheng, HU Xixiang, et al. Annealing-genetic algorithm for constrained optimization problems [J]. High Technology Letters, 2004, 14(7): 10-14. (in Chinese)