## 基于混合编码遗传算法的机压微灌干管管网优化

## 王新坤

(江苏大学 流体机械工程技术研究中心,江苏 镇江 212013)

[摘 要] 【目的】根据微灌干管管网的布置及运行特性,提出一种方便、简捷,适用于大规模机压微灌管网优 化设计的算法模型与方法。【方法】以年费用为目标函数,以标准管径和水泵扬程为决策变量,建立优化模型,采用模 拟退火方法处理约束条件,设计一种混合编码方式,应用遗传算法进行优化计算。【结果】建立的模型和算法在求解 机压微灌管网优化问题上,具有良好的优化性能和较高的求解效率。【结论】提出的模型和算法优化变量少,简单易 用,求解效率高,程序的通用性强,计算精度能够满足微灌管网设计的要求。

[关键词] 微灌;机压管网;优化模型;混合编码;遗传算法

[中图分类号] S274.2 [文献标识码] A

# Optimization of pumping micro-irrigation main pipe based on genetic algorithms with hybrid coding

## WANG Xin-kun

(Technical and Research Center of FluidMachinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: [Objective] According to the layout and running characteristics of micro-irrigation main pipe, a simple and reliable algorithms model and method good for designing the large scale pumping microirrigation main pipe was given. [Method] This paper, taking as the objective function, standard diameter and pump head as decision variable, established an optimum model by adoptin the annealing algorithm to handle constraint condition and the genetic algorithms with hybrid coding was used to calculate for optimum design. [Result] Simulation results indicate that the model and algorithms have good performance for optimizing the pumping micro-irrigation pipe network. [Conclusion] The model and algorithms provided in this paper has the advantages of fewer decision variables, simpler and easier-to-use, high solution efficiency and universality, and its calculation accuracy is able to fulfill the design demand of micro-irrigation main pipe.

Key words: micro-irrigation; pumping pipe network; optimization model; hybrid coding; genetic algorithms

在加压微灌系统中,干管管网造价约占微灌系 统造价的40%~50%,而管网的水头损失决定了微 灌系统水泵的扬程及其能耗,因此干管管网的设计 是影响微灌系统造价和运行费用的主要因素之一。 目前,以标准管径与管段长度为决策变量的线性规 划模型<sup>[1-3]</sup>、以连续管径为决策变量的非线性规划模 型<sup>[4-6]</sup>和以标准管径为决策变量的动态规划模型<sup>[7-9]</sup> 是灌溉管网优化常用的几种方法。近年来,遗传算 法<sup>[9-12]</sup>、人工神经网络<sup>[13]</sup>及列队竞争算法<sup>[14]</sup>等优化 方法相继被应用于树状管网优化问题。但上述方法 均存在一定的缺陷,线性规划法及动态规划法优化 变量多,计算量大,不适用于大规模微灌管网;非线

[文章编号] 1671-9387(2009)09-0209-05

<sup>\* [</sup>收稿日期] 2008-12-26

<sup>[</sup>基金项目] 江苏省自然科学基金项目(BK2008246);江苏省科技支撑计划项目(BE2008381);江苏大学校科研基金项目 (08JDG002)

<sup>[</sup>作者简介] 王新坤(1966-),男,陕西临潼人,副研究员,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:xjwxk@126.com

性规划法的优化结果需按标准管径进行调整;遗传 算法大多采用二进制编码,用罚函数法处理约束条 件,存在编码冗余及惩罚系数难以确定等问题。本 研究借鉴前人的研究成果,结合微灌干管管网的布 置研究工作特性,假定管网中每一管段只能由一种 管径的管道组成,采用模拟退火方法处理罚函数与 约束条件,建立以水泵扬程和标准管径为决策变量 的非线性规划模型,并采用混合编码方式,消除编码 冗余,简化寻优过程中的编码、还原计算,提出了一 种模型与算法简单、适用于求解大规模机压微灌干 管管网的遗传算法优化设计方法,以期为微灌管网 的设计提供参考。

## 1 数学模型

当利用动力为微灌系统提供所需压力时,干管 管网优化设计的任务是在满足系统供水流量和管网 各节点需求水压的情况下,寻求使管网年费用最低 的各级管道管径与水泵扬程的最佳组合。

1.1 **目**标函数

受支管和毛管铺设长度的影响,微灌干管节点 间距一般都不大,节点间管段的流量也不会发生变 化。因此,以节点划分管段,管段间只采用一种标准 管径的管道能够满足微灌干管管网优化设计的需 要。那么,以管段管径和系统扬程为决策变量,以系 统年费用最低为目标,可建立如下数学模型:

$$F_{\min} = \left[\frac{r(1+r)^{y}}{(1+r)^{y}-1} + B\right]_{i=1}^{N} C_{i}^{j} S_{i} + \frac{ETQH}{367.2\eta},$$
  
$$j = 1, 2, \cdots, M_{\circ}$$
(1)

式中: $F_{min}$ 为管网最低年费用(元/年);r为年利率 (%);y为折旧年限(年);B为年平均维修费率 (%);N为管网管段数; $C_i$ 为第i管段选第j种管道 的单价(元/m); $S_i$ 为第i管段管道的长度(m);E为 电价(元/kW•h);T为水泵年工作时间(h);Q为水 泵流量(m<sup>3</sup>/h);H为水泵扬程(m); $\eta$ 为水泵效率; M为可供选择的商用标准管径数。

## 1.2 压力约束

干管管网的压力约束:

$$h_{ci} = z_0 + H - h_b - \sum_{k=1}^{I(i)} \alpha f \frac{Q_k^m}{d_k^b} S_k - z_i - h_z \ge 0_{\circ}$$
(2)

$$h_{mi} = z_0 + H - h_b - \sum_{k=1}^{l(i)} \alpha f \frac{Q_k^m}{d_k^b} S_k - z_i - h_{imax} \leqslant 0$$
,

$$i=1,2,\cdots,N_{\circ}$$
 (3)

式中:ha为管段允许最小压力约束(m); z0 为水源

水面高程(m); $h_b$  为首部装置水头损失(m);I(i) 为 *i*节点的父节点个数; $\alpha$  为局部水头损失的放大系 数;f,m,b 为与管材有关的水头损失系数; $Q_k$  为第 k 管段流量(m<sup>3</sup>/h); $d_k$  为第k 管段管道内径(mm);  $S_k$  为第k 管段长度; $z_i$  为i节点的地面高程(m); $h_z$ 为支管入口压力(m); $h_{mi}$  为管道承压力约束(m);  $h_{imax}$ 为管道允许承压力(m)。

1.3 管径约束

管径约束可表示为:

$$d_1 \leqslant d_i \leqslant d_M \, \circ \tag{4}$$

1.4 非负约束

管径及水泵扬程不能为负值,即:  
$$d_i \ge 0, H \ge 0$$
。(5)

2 遗传算法模型与求解

## 2.1 适应度函数的构造

为便于遗传算法的求解,需将约束优化问题转 化为无约束优化问题。惩罚函数法是用来处理非线 性约束优化的一种常用方法,惩罚函数法的关键问 题是对不可行解罚函数的选取,如果罚函数取得过 大,有可能使算法过早地收敛于非极值点;罚函数取 得过小,又可能使算法的收敛性变差<sup>[15]</sup>。本研究采 用模拟退火罚函数,构造如下适应度函数 f(d<sub>i</sub>, H):

$$f(d_{i}, H) = F + \lambda \sum_{i=1}^{n} \{ |\min(0, h_{i})| + |\min(0, -h_{mi})| \}_{\circ}$$
(6)

式中: $\lambda$  为模拟退火惩罚因子, $\lambda = 1/t$ , $t = \xi t$ ,其中 t 为退火温度, $\xi$  为温度冷却系数, $\xi \in (0,1)$ 。

目标函数 *f*(*d<sub>i</sub>*,*H*)由管网年费用与约束条件 组成,能够反映优化变量(*d<sub>i</sub>*,*H*)值所计算出的解的 优劣程度。但是还需要将上述最小化的目标函数转 化为最大化问题,以满足遗传算法对适应度函数最 大化的要求。为此,可构造如下的适应度函数 *Fit*:

$$Fit = \frac{1}{1 + f(d_i, H)}$$
 (7)

## 2.2 编码

遗传算法一般有二进制编码、实数编码、整数编码及符号编码等编码方式,本研究遗传算法的优化 变量为 d<sub>i</sub> 和 H,共有 n+1 个优化变量,其中 d<sub>i</sub> 可 以与标准管径序号(1,2,...,M)一一对应起来,作为 整数变量进行处理,而 H 为实数变量。如果统一将 这两个优化变量采用二进制编码或整数编码,则在 进行遗传操作时,需要对变量的值进行编码;而在进 行水力计算时,又需要将编码还原为相应的变量值, 因此存在编码和还原问题,增加了计算工作量和程 序的复杂性。另外,编码还存在连续变量离散化带 来的映射误差,若个体编码串较短,可能达不到精度 要求,若个体编码串较长,则算法的搜索空间急剧扩 大,搜索效率降低。而且,由于 d<sub>i</sub>和 H 的值域相差 较大,统一编码会形成一定的编码冗余,当对遗传算 法进行交叉或变异操作时,所产生的个体有可能超 出解的值域范围。因此,考虑计算的方便性和精度 要求,本研究采用整数和实数编码的混合编码方式 编码。将标准管径按照由大到小的顺序排列,则 d<sub>i</sub> 与标准管径序号(1,2,…,M)有一一对应关系,采取 整数编码的方式编码。水泵扬程是连续的实数变 量,其值域与支管进口所需压力和干管管道的承压 能力相关,采用4 位小数的实数编码方式编码。

### 2.3 选择

选择建立在对群体中的个体进行适应度评价的 基础上。本文采用竞赛规模为2的锦标赛选择算法 进行选择,随机从种群中选择两个个体,将好的个体 选作父个体,重复这个过程直到完成个体的选择。

2.4 交 叉

对任意两个已配对好的父个体  $X_1(x_{11}, x_{12}, ..., x_{1n+1})$ 和  $X_2(x_{11}, x_{22}, ..., x_{2n+1})$ ,随机确定需要交叉的变量位置,两个父个体交叉点前的变量均保持不变,相互交换交叉点后的变量值,对交叉点处的变量进行算术交叉操作。算术交叉操作的具体方法为:对于选定的两个父个体变量  $x_{1i}, x_{2i}$ ,随机生成两个 [0,1]间的实数  $\lambda_1, \lambda_2, 则 \lambda_1 x_{1i} + (1-\lambda_1) x_{2i} 和 \lambda_2 x_{1i} + (1-\lambda_2) x_{2i}$ 都具有父个体  $x_{1i}, x_{2i}$ 的遗传基因,可以作为交叉后的子个体,这样就实现了交叉操作,而且这样的遗传操作也可以使解向量限定在可行解域内。

## 2.5 变 异

以变异概率 pm 随机选定变异个体及变量位

置,在变量的可行域内随机产生新的值替换原基因 位上的值,生成新个体,完成变异操作。

## 2.6 **算法实现**

在(*d<sub>i</sub>*,*H*)的可行域内随机生成一定规模的初 始群体,作为第一代遗传群体,按照 2.3~2.5 节的 遗传操作生成新一代群体,反复执行,直至找到最优 解或满足优化准则为止。

## 3 仿真计算

以文献[2]中的机压微灌管网为例,进行仿真计 算。管网布置、管长、流量、节点和管段编号如图 1 所示,管道采用聚乙烯管,单价见表 1,节点地面高 程见表 2。管道承压力为 0.8 MPa,支管入口所需 压力水头为 12.6 m,支管流量为 11 m<sup>3</sup>/h,水源地面 高程  $z_0 = 11.4$  m。另外已知:y = 15 年,E = 0.6元/(kw • h), $\eta = 0.6$ ,r = 7%,B = 3%, $h_b = 7$  m, $\alpha =$ 1.05,  $f = 9.48 \times 10^4$ ,m = 1.77,b = 4.77。



自 权 姍 ぢ‐皆 权 流 重/(m・n Pipe number-Pipe flow

图 1 管网布置示意图

Fig. 1 Layout of the pipe net

	表 1 不同管径管道的单价
Table 1	The price of different diameter pipelines

管径/mm Diameter	单价/(元・m <sup>-1</sup> ) Price	管径/mm Diameter	単价/(元・m <sup>-1</sup> ) Price	管径/mm Diameter	单价/(元・m <sup>-1</sup> ) Price	管径/mm Diameter	单价/(元・m <sup>-1</sup> ) Price
10	0.40	20	1.54	40	3.60	80	11.80
12	0.48	25	1.84	50	5.54	100	16.40
15	0.70	32	2.80	65	8.80		

## 表 2 各节点的地面高程

Table 2 Altitude and discharge of each nodes

节点序号 Node number	地面高程/m Ground level						
0	11.4	3	17.7	6	15.9	9	14.0
1	_	4	19.0	7	16.6	10	14.5
2	_	5	18.7	8	16.7	11	14.9

以群体规模 200、交叉概率 0.8、变异概率 0.1、 初始温度  $t_0 = 0.8$ 、温度冷却参数  $\xi = 0.9$ 、最大遗传 代数 50 为基本遗传参数,将有关数据代入遗传算法 模型进行优化计算,将计算结果与文献[2]的优化结 果进行比较,结果见表 3。由表 3 可知,本研究计算 的管网年费用为2 514.01 元/年,水泵扬程为 36.14 m,文献[2]计算的最优扬程为 36.27 m,管网年费 用为 2 467.86 元/年,本研究优化方法计算的年费 用较文献[2]高1.9%。由于本研究优化方法中的每 个管段只采用一种管径的管道,虽然年费用较文献 [2]高1.9%,但优化变量少,模型简单,求解效率 高,适用于大规模微灌管网的优化设计。而且,微灌 管网管段长度较短,若管段间采用一种管径的管道, 施工安装方便,可以减少施工安装以及连接管件的 费用,同时可以减少异径接头处所产生的局部水头 损失。

管段(节点) 序号 Pipe or Node number	本文优化结果 Optimum result in this paper			文献[2]优化结果 Optimum result in paper [2]		
	选用管径/mm Diameter	管长/m Lengh	节点压力/m ode pressure	选用管径/mm Diameter	管长/m Lengh	节点压力/m Node pressure
1	100	90	_	100	90	_
2	80	110	_	80	110	_
3	65	160	16.91	65	160	17.58
4	65	100	14.05	65	100	14.88
5	65	100	12.79	65/50	65/35	12.60
6	65	50	20.43	65	50	20.92
7	65	100	18.17	65/50	61/39	17.49
8	50	100	12.61	50	100	12.60
9	65	50	24.51	50	50	23.10
10	50	100	18.55	50	100	17.80
11	50	100	12.69	50	100	12.60
水泵扬程/m Pump head		36.14			36.27	
管网年费用/元 Annual cost of pipe network		2 514.01			2 467.86	

遗传算法是一种概率优化算法,不一定每次都 能得到最优解。为了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,比较计算 结果与最优解的相对偏差,结果见表4。由表4可 知,在100次计算中,本研究建立的优化方法的相对 偏差,小于0.5%的概率达到36%,小于1%的概率 达到62%,小于5%的概率达到100%,说明该算法 计算结果稳定,具有很高的计算精度及求解效率。

表 4 计算结果与最优解的相对偏差

Table 4 Relative deviation of calculation result and superior solution

相对偏差/% Relative deviation	概率/% Occurrence number	相对偏差/% Relative deviation	概率/% Occurrence number
<0.5	36	<3	86
<1	62	<5	100
<2	75		

## 4 结 论

管网优化设计是一项繁琐而复杂的工作,当管 网规模较大时,优化变量和约束条件增加,会导致计 算工作量急剧增大。本研究通过假定管段间选用一 种标准管径的管道,建立了基于混合编码的模拟退 火遗传算法求解机压树状管网优化模型。该模型算 法及编程简单,能够获得全局最优解,获得的管径为 标准管径,计算精度能够满足微灌管网设计的要求。 由于该算法简单易用,优化变量少,程序的通用性 强,而且采用了全局优化搜索算法,因此建立的模型

[参考文献]

适用于大规模微灌管网的优化设计。

- [1] Gupta I, Hassan M Z, Cook J. Linear programming analysis of a water supply system with multiple points [J]. Trans Amer Inst Ind Eng, 1972, 4(3): 200-204.
- [2] Brendan L B, George K. Network linear programming as pipe network hydraulic analysis tool [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(6):549-559.
- [3] 白 丹. 微灌管网系统优化设计 [J]. 农业机械学报,1997,28 (4):63-68.

Bai D. Optimal design of the pipe network for micro-irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997,28(4):63-68. (in Chinese)

- [4] Cunha M D, Sousa J. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1999, 125(4): 215-221.
- [5] Fujiwara O, Jenchaimahakoon B, Edirishinghe N C P. A Modified linear programming gradient method for optimal design of looped water distribution networks [J]. Water Resource Research, 1987, 23(6): 977-982.
- [6] Varma K V K, Narasimhan S, Bhallamudi S M. Optimal design of water distribution systems using an NLP method [J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, 123(4); 381-388.
- [7] Liang T. Design of conduit system by dynamic programming[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1971, 97(3): 383-393.
- [8] 魏永曜,王雪珍.树状输配水管网的优化设计 [J].水利学报, 1992,23(5):9-18.

Wei Y Y,Wang X Z. An optimal design of tree-like water conveying and distribution pipe networks [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 23(5):9-18. (in Chinese)

- [9] 王新坤,程冬玲,林性粹.单井滴灌干管管网的优化设计[J]. 农业工程学报,2001,17(3):41-44.
  Wang X K,Cheng D L,Lin X C. Optimum design of main pipe net for single well [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2001,17(3):41-44. (in Chinese)
- [10] Goldberg D E, Koza J R. Genetic algorithms in pipeline optimization [J]. Journal of Computing in Civ Engrg, 1987, 1 (12):128-141.
- [11] 吕 鉴,贾燕兵.应用遗传算法进行给水管网优化设计 [J].

北京工业大学学报,2001,27(1):91-95.

Lu J,Jia Y B. Optimal design of water distribution system using genetic algorithms [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2001,27(1):91-95. (in Chinese)

- [12] 王新坤. 基于模拟退火遗传算法的自压树状管网优化 [J]. 水利学报,2008,39(8):1012-1016.
  Wang X K. Optimization of gravity pipe network based on annealing genetic algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(8):1012-1016. (in Chinese)
- [13] 周荣敏,买文宁,雷延峰,等. 自压式树状管网神经网络优化设计[J]. 水利学报,2002,33 (2):66-70.
  Zhou R M, Mai W N, Lei Y F, et al. Artificial neural networks optimal design of gravity tree pipe network [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002,33(2):66-70. (in Chinese)
- [14] 付玉娟,蔡焕杰.基于机会约束规划模型的灌溉管网不确定优 化研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36 (5):219-224.

Fu Y J, Cai H J. Uncertain optimal design of irrigation pipe network with chance-constrained programming [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2008, 36 (5):219-224. (in Chinese)

[15] 荣喜民,安智字. 非线性规划的混合遗传算法 [J]. 系统工程 与电子技术,2003,25(5):621-624.
Rong X M, An Z Y. Hybrid genetic algorithms for the nonlinear programming [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003,25(5):621-624. (in Chinese)

# 全国中文核心期刊、全国优秀农业期刊 《中国种业》征订启事

《中国种业》是由农业部主管,中国农业科学院作物科学研究所和中国种子协会共同主办的全国性、专业性、技术性种业 科技期刊。该刊系全国中文核心期刊、全国优秀农业期刊。

刊物目标定位:以行业导刊的面目出现,并做到权威性、真实性和及时性。覆盖行业范围:大田作物、蔬菜、花卉、林木、果树、草坪、牧草、特种种植、种子机械等,信息量大,技术实用。

读者对象:各级种子管理、经营企业的领导和技术人员,各级农业科研、推广部门人员,大中专农业院校师生,农村专业户 和广大农业生产经营者。

月刊,大16开本,每期5.80元,全年69.60元。国内统一刊号:CN11-4413/S,国际标准刊号:ISSN1671-895X,全国各地邮局均可订阅,亦可直接汇款至编辑部订阅,挂号需每期另加3元。邮发代号:82-132

地 址:(100081)北京市中关村南大街 12 号中国农业科学院

电 话:010-82105796(编辑部) 010-82105795(广告发行部)

传 真:010-82105796

E-mail:chinaseedqks@sina.com chinaseedqks@163.com