

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.10.012

轻小型移动喷灌机组低能耗遗传算法优化设计*

王新坤 袁寿其 朱兴业 涂 琴

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 合理配置与优化设计喷灌机组有助于实现机组装置效率最大化,有效降低能量消耗。以能耗最小为目标,以水泵-管路运行工况、喷头最小工作压力和喷头压力极差率为约束条件,以喷头配置数量、管道直径和末端喷头压力为决策变量,建立轻小型移动喷灌机组优化数学模型,提出基于遗传算法的优化设计方法。在满足喷灌设计参数条件下,模型与算法能够优化喷头数量、管道直径,还能够对系统流量、压力、效率、单位能耗等工作参数进行计算与设计,同时保证水泵与管路同在优化的工况下工作,算例分析表明优化后机组的能耗降低14.2%。只需输入设计要求的已知条件,算法程序就能自行运算出优化结果,运算结果稳定可靠、求解速度快、精度高,具有良好的通用性和实用性。

关键词: 喷灌机组 能耗 遗传算法 优化

中图分类号: S277.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)10-0058-05

Optimization of Light-small Movable Unit Sprinkler System Using Genetic Algorithms Based on Energy Consumption Indicators

Wang Xinkun Yuan Shouqi Zhu Xingye Tu Qin

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Reasonable configuration and optimization design of unit sprinkler system could take the advantages as maximizing efficiency of the unit and reducing the energy consumption. An optimization model was established and genetic algorithm was used to optimize light-small movable unit sprinkler system. The objective function was minimal energy consumption, the constraint conditions were pump and pipeline operating conditions, minimum working pressure of sprinkler, percentage of sprinkler working pressure range; and the decision variables were number of sprinkler, pipe diameter, sprinkler pressure in the pipeline end, respectively. The model and algorithms could optimize the number of sprinklers, pipe diameter and calculate out the flow rate, pressure, efficiency and per energy consumption of the unit. As well as the pump and pipeline could be ensured to operate in the optimized condition and the design parameters were met. An example showed that the energy consumption was reduced by 14.2% after optimum design. The algorithms can get the optimum results automatically when known conditions were input, having the advantages of excellent efficiency, accuracy, reliability, versatility and practicability.

Key words Unit sprinkler system, Energy consumption, Genetic algorithms, Optimization

引言

轻小型喷灌机组凭借其单位灌溉面积投资低、

灵活机动、移动方便、适用面广的优势而成为我国喷灌行业的主要机型,轻小型喷灌机和人工拆移管道式喷灌系统的灌溉面积约占我国总喷灌面积的

收稿日期:2010-05-06 修回日期:2010-06-17

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA100211)和江苏省自然科学基金资助项目(BK2008246)

作者简介:王新坤,研究员,主要从事节水灌溉理论与新技术研究,E-mail: xjwxk@126.com

通讯作者:袁寿其,研究员,博士生导师,主要从事排灌机械及工程研究,E-mail: shouqi@ujs.edu.cn

80%^[1]。国内外对于喷灌设备水力性能^[2-3]、灌水技术指标^[4-5]、管道水力计算^[6]与优化^[7-9]的研究较多,但对轻小型移动喷灌机组优化配置与设计的研究相对较少。轻小型移动喷灌机组主要由泵机组(水泵与动力机)与管路装置(喷头、配套管路、连接管件等)组成,只有当构成机组的水泵、管路、喷头等主要设备配置恰当,水力设计与工作参数适宜,才能保障喷灌机组灌溉质量,发挥机组最佳效率。

1 喷灌机组单位能耗指标

目前,机压输水管网均以绝对能耗作为年费用中的能耗指标进行管网的优化设计与选型,而轻小型移动喷灌机组的能耗与动力、水泵、喷头、管道等设备的配置有关,不同配置机组的装置效率、灌溉面积、喷洒水量存在差异,在灌溉面积与喷洒水量不同的情况下,以机组绝对能耗大小评价机组能效,不具备统一的衡量标准及可比性。本文定义机组单位面积灌溉单位水量所消耗的能量为单位能耗,以单位能耗作为评价机组能效的指标。根据管路特性曲线与水泵流量-扬程曲线交点,确定喷灌机组的运行工况,在该运行工况下机组单位能耗为

$$E_p = \frac{H}{36.7\eta_b\eta_d\eta_p} \quad (1)$$

式中 E_p ——喷灌机组单位能耗, $\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$

H ——水泵扬程, m

η_b ——水泵运行效率

η_d ——动力机运行效率

η_p ——田间喷洒水利用系数

2 优化数学模型建立

轻小型移动喷灌机组一般是根据水泵进行喷头、管道及连接管件的配置,喷头型号一般根据土壤、作物、运行环境等选定。在这种情况下,机组的优化是以造价、能耗或年费用最低为目标,进行喷头数量、管道直径及工作参数的优化配置与设计。以图 1 所示的管路装置建立优化数学模型。

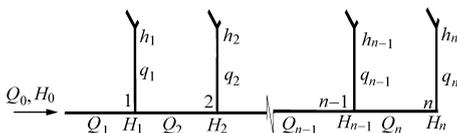


图 1 管路装置与水力计算示意图

Fig. 1 Illustration of pipe installation and hydraulic calculation

2.1 优化目标

水泵及喷头型号选定后,机组单位造价的差异主要来自输水管道直径的不同,轻小型移动喷灌机组的输水管道大都为造价低廉的涂塑软管,其管径

的变化对机组单位造价的影响较小。因此,以单位能耗最小为目标,建立优化数学模型。

2.2 约束条件

(1) 喷头最小压力约束

现行《喷灌工程技术规范》规定,任何喷头的实际工作压力不得低于设计喷头工作压力的 90%,即

$$h_{\min} \geq 0.9h_p \quad (2)$$

式中 h_{\min} ——喷头最小工作压力水头, m

h_p ——设计喷头工作压力水头, m

(2) 喷头相对压力极差约束

现行《喷灌工程技术规范》规定,同一条支管上任意两个喷头之间的工作压力差应在设计喷头工作压力的 20% 以内,即

$$h_v = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_p} < 20\% \quad (3)$$

式中 h_v ——喷头压力极差率

h_{\max} ——喷头最大工作压力水头, m

(3) 水泵-管路工况约束

管路特性曲线与水泵流量-扬程曲线交点才是机组的实际运行工况,在优化过程中必须保证水泵工况与管路工况的一致性。管路特性由管路水力计算确定,兼顾计算精度与简化计算的要求,水泵工况由三次多项式拟合的水泵流量-扬程关系确定。

$$H = c_0 + c_1Q + c_2Q^2 + c_3Q^3 \quad (4)$$

式中 c_0, c_1, c_2, c_3 ——水泵流量-扬程曲线拟合多项式回归系数

Q ——水泵流量, m^3/h

在优化过程中,以管路水力计算得到的管道进口流量 Q_0 作为水泵流量 Q ,由式(4)计算水泵扬程,若所得水泵出口扬程与管路进口压力相同,则满足水泵-管路工况约束条件,即

$$H_0 = H - h_b \quad (5)$$

式中 H_0 ——管路水力计算得到的管道进口压力水头, m

h_b ——水泵进口至管路进口间的水头损失与水源水面、管路进口的高差之和, m

(4) 喷头数量

对于等径、等距、等量出流管道的喷头极限个数,应用文献[10]所述方法进行计算,将 $G = \frac{kfaq_p^m}{h_p D^b}$ 、

$[\Delta h] = [h_v] h_p$ 代入文献[10]的式(26)中,得到平坡管道的喷头极限个数计算公式

$$N_m = \text{INT} \left\{ \left[\frac{(m+1)[\Delta h]D^b}{kfaq_p^m} \right]^{\frac{1}{m+1}} + 0.52 \right\} \quad (6)$$

则平坡管道喷头数量取值范围为

$$N_m(D_{\min}) \leq n \leq N_m(D_{\max}) \quad (7)$$

式中 n ——喷头数量

$[\Delta h]$ ——允许喷头压力极差, $[\Delta h] = 0.2h_p$

D ——管道内径, mm

a ——喷头间距, m

k ——考虑局部损失的水头损失系数, 取 1.1 ~ 1.15

f, m, b ——与管材有关的水头损失计算系数

q_p ——设计喷头流量, m^3/h

D_{\max}, D_{\min} ——备选管道内径的最大值和最小值, mm

3 遗传算法实现

3.1 决策变量与编码方式

上述优化数学模型的决策变量为喷头数量、管径和管道进口压力。管道进口压力和末端喷头压力有一一对应的关系, 如果以管道末端喷头的工作压力为决策变量, 在遗传算法初始化群体时赋予其初值, 将为管路的逆递推水力计算提供方便。因此, 确定喷头数量、各管段管径和管道末端喷头工作压力为决策变量。喷头数量由备选管道的直径确定, 其数值有限, 可以将喷头数量由最小值到最大值排序, 逐一进行优化计算, 在优化结果中选择能耗最小而且满足约束条件的结果作为最优解。

管道末端喷头工作压力是连续的实数变量, 采用实数编码方式。将备选管径与其序号一一对应形成整数序列, 采用整数编码方式。

3.2 初始化群体

在 0.9 倍的设计喷头工作压力和喷头最大额定工作压力范围内, 随机生成满足种群规模的喷头末端压力初始值, 在 1 至喷头备选管径最大序号范围内, 随机生成满足种群规模的各管段管径, 作为第一代遗传群体。

3.3 适应度计算

采用罚函数法对优化数学模型进行无约束化处理, 得到

$$\min f(n, h_n, D_i) = E_p + \mu_1 |H_0 - H + h_b| + \mu_2 |\min(0, h_{\min} - 0.9h_p)| + \mu_3 \left| \max\left(0, \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_p} - 0.2\right) \right| \quad (8)$$

式中 μ_1, μ_2, μ_3 ——惩罚因子

h_n ——管道末端喷头的工作压力水头, m

为满足遗传算法对适应度函数最大化的要求, 将上述数学模型中目标函数的最小化问题转化为最大化问题, 构造出适应度函数

$$\text{Fit} = \frac{1}{1 + f(n, h_n, D_i)} \quad (9)$$

要计算适应度大小, 需先进行水力计算。参照

图 1 所示的管道布置与编号, 根据初始群体及进化过程中群体的末端喷头压力水头 h_n 和各管段管径 D_i , 由管道末端向管道进口逆递推进行管道水力计算, 具体方法如下:

(1) 计算末端竖管流量和输水管道末端的压力与流量

$$q_n = \mu \frac{\pi d_p^2}{4} \sqrt{2gh_n} = 0.01252\mu d_p^2 h_n^{0.5} \quad (10)$$

$$H_n = h_n + f \frac{q_n^m}{d^b} (l + l_{e,n}) + l \quad (11)$$

$$Q_n = q_n \quad (12)$$

(2) 计算第 $n-1$ 管段至第 1 管段的管道和喷头的压力与流量

$$H_i = H_{i+1} + f \frac{Q_{i+1}^m}{D_{i+1}^b} (a + L_{e,i+1}) + a l_i \quad (13)$$

$$\begin{cases} h_i = H_i - f \frac{q_i^m}{d^b} (l + l_{e,i}) - l \\ q_i = 0.01252\mu d_p^2 h_i^{0.5} \end{cases} \quad (14)$$

$$Q_i = Q_{i+1} + q_i \quad (15)$$

(3) 计算管路进口的压力与流量

$$H_0 = H_1 + f \frac{Q_1^m}{D_1^b} (a + L_{e,1}) + a l_1 \quad (16)$$

$$Q_0 = Q_1 \quad (17)$$

式中 H_i ——输水管道第 i 节点压力水头, m

Q_i ——输水管道第 i 管段流量, m^3/h

h_i ——第 i 节点处喷头工作压力水头, m

q_i ——第 i 节点处喷头流量, m^3/h

l ——喷头竖管长度, m

D_i, d ——输水管道和竖管的内径, mm

$L_{e,i}, l_{e,i}$ ——输水管和竖管管件局部水头损失的当量长度, m

I_i ——地形坡度

μ ——喷头流量系数, $\mu = 79.87q_p d_p^{-2} h_p^{-0.5}$

d_p ——喷嘴直径, mm

方程组 (14) 应用迭代法进行求解。

(4) 管路水力计算完成后, 令 $Q = Q_0$, 由式 (4) 计算水泵扬程 H , 水泵效率为

$$\eta_b = b_1 Q + b_2 Q^2 + b_3 Q^3 \quad (18)$$

式中 b_1, b_2, b_3 ——水泵流量-效率特性曲线拟合多项式回归系数

(5) 根据管路水力计算结果, 确定 h_{\min} 与 h_{\max} 。假定动力机的运行效率为定值, 由式 (9) 即可计算适应度的值。

3.4 遗传操作

应用竞赛规模为 2 的锦标赛选择算子实现选择操作, 应用算术交叉算子实现交叉操作, 应用实值变

异算子实现变异操作^[11]。

3.5 算法流程

遗传算法程序流程如图 2 所示。

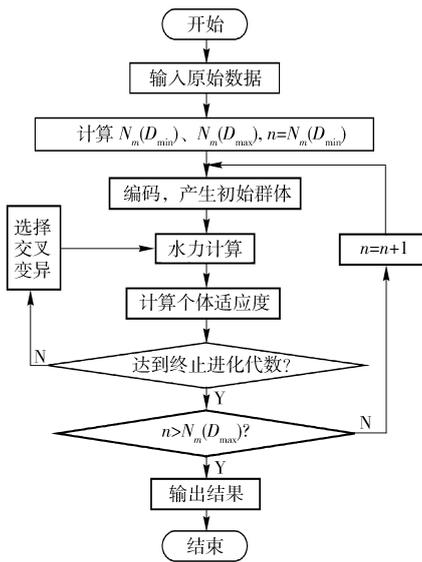


图 2 程序流程图

Fig. 2 Program flowchart

4 优化算例

以配备 50ZB-30Q 型水泵的喷灌机组为优化算例。已知参数 $c_0 = 31.12$, $c_1 = 0.0404$, $c_2 = -0.001$, $c_3 = -0.0005$, $b_1 = 7.5082$, $b_2 = -0.2738$, $b_3 = 0.003$, $h_p = 25$ m, $q_p = 0.96$ m³/h, $d_p = 4$ mm, $a = 12.5$ m, $d = 15$ mm, $l = 1.5$ m, $L_e = 20D$, $l_e = 60d$, $\eta_p = 0.9$, $\eta_d = 0.4$, $h_b = 2.5$ m, 备选管径 65 mm、50 mm、40 mm。

应用上述遗传算法, 种群规模为 100、遗传代数为 30、交叉概率为 0.8、变异概率为 0.05、惩罚系数 $\mu_1 = 100$, $\mu_2 = 1$, $\mu_3 = 1$, 进行优化计算。得到最优喷头数量 $n = 16$, 第 1 至第 12 管段管径为 65 mm, 第 13 至第 16 管段管径为 50 mm, $H = 29.84$ m, $Q = 14.92$ m³/h, $\eta_b = 0.6103$, $h_{\min} = 22.95$ m, $h_v = 8.1\%$, $E_p = 3.7$ kW·h/(mm·hm²)。目前工程中 50ZB-30Q 通常配置 50 mm 管径涂塑软管, 最多配置 12 个喷头, 单位能耗 4.31 kW·h/(mm·hm²)。经过优化配置后, 能耗降低 14.2%。

优化所得机组输水管道和喷头沿程压力与流量分布如图 3 所示。水泵流量与管路进口流量相同, 水泵出口压力与管路进口压力相同, 说明水泵与管

路在同一个工况下运行; $h_{\min} > 0.9h_p$, $h_v < 20\%$, 说明优化结果满足设计条件的要求。图 3 中, 输水管道与喷头沿程压力与流量分布趋势符合多孔出流管道水力特性, 喷头沿程流量分布较为均匀, 说明优化结果准确可靠。算法不但能够优化喷头个数与管道直径, 还能够对系统流量、压力、效率、单位能耗等工作参数进行计算与设计。该算法程序在 Intel E2180 计算机上的运行时间为 20 s, 计算结果的精度可以达到 0.01%, 说明算法的求解速度快、精度高。

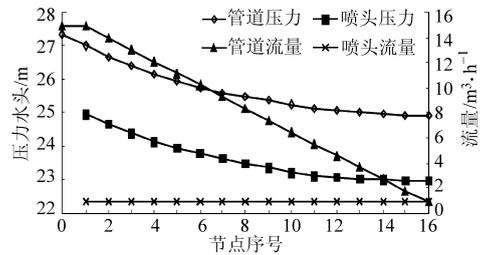


图 3 管道与喷头流量、压力分布曲线

Fig. 3 Flow and pressure distribution curve of pipeline and sprinkler

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, 比较计算结果与最优解的相对偏差。100 次的计算结果中, 相对偏差小于 0.1% 的概率为 26%, 小于 0.5% 的概率为 39%, 小于 1% 的概率达到 56%, 小于 3% 的概率达到 84%, 小于 5% 的概率达到 100%, 说明算法计算结果稳定, 具有很高的计算精度。

5 结束语

提出以单位能耗最小为目标, 喷头数量、标准管径、末端喷头压力为决策变量的轻小型移动喷灌机组的优化数学模型, 给出了数学模型的遗传算法实现方法。首次将水泵与管路工况约束条件应用于喷灌机组的优化模型中, 保证了水泵与管路同在优化的工况下工作。以喷头最小压力及喷头压力极差率为约束条件, 能够使优化结果满足《喷灌工程技术规范》的规定。实例分析说明优化算法不但能够优化喷头个数与管道直径, 还能够对系统流量、压力、效率、单位能耗等工作参数进行计算与设计, 优化结果稳定、准确可靠、求解速度快、精度高。只需输入设计要求的已知条件, 算法程序就能自行运算出优化结果, 具有良好的通用性和实用性。

参 考 文 献

1 兰才有, 仪修堂, 薛桂宁, 等. 我国喷灌设备的研发现状及发展方向[J]. 排灌机械, 2005, 23(1): 1~6.

Lan Caiyou, Yi Xiutang, Xue Guining, et al. Research state and development of sprinkler irrigation equipments in China[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(1): 1~6. (in Chinese)

- 2 喻黎明, 吴普特, 范兴科. 模糊综合评判在评价喷头水力性能中的应用[J]. 节水灌溉, 2001(3):7~8.
Yu Liming, Wu Pute, Fan Xingke. Application of fuzzy comprehensive evaluation in sprinkler performances[J]. Water Saving Irrigation, 2001(3):7~8. (in Chinese)
- 3 林中卉. 喷灌压力管网系统水力特性的模拟模型研究[J]. 节水灌溉, 1995(2):20~25.
Lin Zhonghui. A study on the simulation model of hydraulic characteristics in pipe-net system for sprinkler irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 1995(2):20~25. (in Chinese)
- 4 韩文霆, 吴普特, 杨青, 等. 喷灌水量分布均匀性评价指标比较及研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9):172~177.
Han Wenting, Wu Pute, Yang Qing, et al. Advances and comparisons of uniformity evaluation index of sprinkle irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9):172~177. (in Chinese)
- 5 范永申, 黄修桥, 仵峰, 等. 喷灌和软管灌溉两用机组水量分布特性与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11):74~77.
Fan Yongshen, Huang Xiuqiao, Wu Feng, et al. Experiment and analysis on water distribution uniformity of machine of sprinkling irrigation and hose irrigation dual purpose[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11):74~77. (in Chinese)
- 6 赵凤娇, 王福军. 管道式喷灌系统水力解析的改进前进(EFSM)算法[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7):73~76.
Zhao Fengjiao, Wang Fujun. Extended forward step method for hydraulic analysis of pipeline sprinkler irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7):73~76. (in Chinese)
- 7 白丹. 机压喷灌干管管网优化[J]. 农业机械学报, 1996, 27(3):52~57.
Bai Dan. The optimum design of sprinkler main pipe network with pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(3):52~57. (in Chinese)
- 8 万年华, 胡铁松, 尹正杰. 基于遗传算法的喷灌管网优化设计[J]. 节水灌溉, 2005(4):1~3.
Wan Nianhua, Hu Tiesong, Yin Zhengjie. Genetic algorithms for optimal design of sprinkler pipe network[J]. Water Saving Irrigation, 2005(4):1~3. (in Chinese)
- 9 侯永胜. 多喷头轻小型移动式喷灌机组优化配套研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2007.
Hou Yongsheng. Study on optimizing of configuration for the small-scale movable sprinkler irrigation equipment (SMSIE) with multiple sprinkler[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2007. (in Chinese)
- 10 张国祥. 微灌毛管水力学研究——微灌水力设计计算方法探讨之一[J]. 节水灌溉, 1990(2):9~16.
Zhang Guoxiang. Hydraulic research in micro irrigation lateral-one of the computation methods in micro irrigation hydraulic designing[J]. Water Saving Irrigation, 1990(2):9~16. (in Chinese)
- 11 李昌隆, 陈晓波, 程鹏. 并行多目标遗传算法在控制系统优化中的应用[J]. 微计算机信息, 2005, 21(12):18~19.
Li Changlong, Chen Xiaobo, Cheng Peng. Parallel multi-objective genetic algorithm and application in control system optimization[J]. Control & Automation, 2005, 21(12):18~19. (in Chinese)

(上接第 39 页)

- 15 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
- 16 鲁向晖, 隋艳艳, 王飞, 等. 秸秆覆盖对旱地玉米休闲田土壤水分状况影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(3):156~159.
Lu Xianghui, Sui Yanyan, Wang Fei, et al. Study on soil water status of maize's fallow under straw mulch in dry land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(3):156~159. (in Chinese)
- 17 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- 18 刘霞, 张光灿, 李雪蕾, 等. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6):1~5.
Liu Xia, Zhang Guangcan, Li Xuelei, et al. Characteristics of soil infiltration and water-holding of different forest vegetation in ecological rehabilitation of small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6):1~5. (in Chinese)
- 19 贾洪雷, 陈忠亮, 马成林, 等. 北方旱作农业区耕作体系关键技术[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11):59~63.
Jia Honglei, Chen Zhongliang, Ma Chenglin, et al. Key technologies for the tillage system in area of dry farming of Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11):59~63. (in Chinese)