

基于不可行度的机压树状管网退火遗传算法优化^{*}

王新坤

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 规定管网中每一管段最多只能由两种管径的管道组成,提出一种以管网年费用为目标函数,以水泵扬程、管长和标准管径为决策变量的机压树状输水管网优化数学模型。定义种群中个体的不可行度函数,采用基于解的不可行度退火算法处理约束条件。应用模拟退火算法,对解的不可行度进行局部优化,使其逐步逼近可行解。将遗传算法全局优化和模拟退火的良好局部搜索能力有机结合,构造出一种退火遗传算法用于机压树状管网优化设计。仿真结果表明,该模型与算法在求解机压树状输水管网优化问题上,具有良好的优化性能和求解效率。

关键词: 树状管网 遗传算法 模拟退火 不可行度

中图分类号: S275

文献标识码: A

Optimization of Pumping Tree Pipe Network by Using Annealing-genetic Algorithms Based on Infeasible Degree

Wang Xinkun

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

Abstract

Based on the assumption that every section of pipeline is composed of two diameters, a mathematical model for optimizing the pumping tree pipe network was presented with the objective function of annual cost, using pump head, pipe length and standard diameter as decision variable. The infeasible degree function of solution in the species group was defined, and the constraint condition was handled by adopting annealing algorithm based on the infeasible degree of solution. The infeasible degree of solution was locally optimized through simulated annealing, to make it gradually approach feasible solution. Combined with the genetic algorithm global optimization and good local search capabilities of simulated annealing, a simulated annealing-genetic algorithm for the optimized design of the pumping tree pipe network was established. Simulation results showed that the model and algorithms have good performance for optimizing the pumping tree pipe network.

Key words Tree pipe network, Genetic algorithm, Simulated annealing, Infeasible degree

引言

树状输水管网在农田水利和城市给排水工程中应用十分广泛,其优化设计问题一直受到国内外学者的重视。线性规划^[1~2]、非线性规划^[3~4]、动态规划^[5~6]及微分法^[7]是树状管网优化的传统方法,近年来遗传算法^[8~14]、人工神经网络^[15]及列队竞争算法^[16]等优化方法相继被应用于解决树状管网

优化问题,极大地促进了树状管网输水技术的应用与推广。线性规划法一般能获得全局最优解,但优化变量多,需预先确定备选管径集合。非线性规划法的优化变量少,求解容易,但计算结果需按标准管径调整。动态规划法假定每个管段只能由一种管径组成,难以获得最优解。遗传算法大多采用罚函数法处理约束条件,存在对目标函数形态的歪曲及对惩罚系数的严重依赖等难以克服的问题^[17]。本文

收稿日期: 2008-09-01 修回日期: 2008-09-08

^{*} 江苏省自然科学基金资助项目(BK2008246)、江苏省科技支撑项目(BE2008381)和江苏大学校基金资助项目(08JDG002)

作者简介: 王新坤,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

综合上述算法的特点,将遗传算法全局优化和模拟退火的良好局部搜索能力有机结合,建立以管段长度和标准管径共同作为决策变量的非线性规划模型,提出一种机压树状管网优化数学模型及不可行度退火遗传混合优化算法。

1 建立数学模型

通过对前人优化结果的分析发现,无论采用何种优化方法,其优化结果中组成各管段的管径不超过两种。说明同一管段内最多采用两种管径,通过调整管段内两种管道的管径及管长,就能使管网中各节点的流量、压力及系统年费用达到优化状态。因此,本文规定管网中每一管段最多只能由两种管径的管道组成,研究机压树状管网优化设计的数学模型与方法。

当利用动力为输水管网提供所需压力,管网优化设计的任务是在满足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的管径和管长最佳组合,确定水泵扬程。以管网年费用最小为目标函数,每一管段最多只能由两种标准管径的商用管道组成,可以建立如下的数学模型:

目标函数

$$\min F = \left[\frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} + B \right] \cdot \sum_{i=1}^N (C_{i1}S_{i1} + C_{i2}S_{i2}) + \frac{ETQH}{367.2\eta} \quad (1)$$

式中 F ——管网年费用,元/年

Y ——折旧年限,年 r ——年利率, %

B ——年平均维修费率, %

S_{i1}, S_{i2} ——第 i 管段第 1 和第 2 段管道的长度, m

C_{i1}, C_{i2} ——第 i 管段第 1 和第 2 段管道的单价,元/m

E ——电价,元/(kW·h)

T ——水泵年工作小时数, h

Q ——水泵流量, m³/h

H ——水泵扬程, m

η ——水泵效率, % N ——管网管段数

压力约束条件

$$h_{ck} = z_0 + H - h_b - \sum_{i=1}^{I(k)} \alpha f Q_i^m \left(\frac{S_{i1}}{d_{i1}^b} + \frac{S_{i2}}{d_{i2}^b} \right) - z_k - h_{k\min} \geq 0 \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

$$h_{mk} = z_0 + H - h_b - \sum_{i=1}^{I(k)} \alpha f Q_i^m \left(\frac{S_{i1}}{d_{i1}^b} + \frac{S_{i2}}{d_{i2}^b} \right) - z_k - h_{k\max} \leq 0 \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

式中 h_{ck}, h_{mk} —— k 管段允许最小压力和管道承

压力约束变量, m

z_0 ——水源水面高程, m

h_b ——底阀及吸水管水头损失, m

α ——局部水头损失加大系数

f, m, b ——与管材有关的水头损失计算系数

Q_i ——第 i 管段流量, m³/h

d_{i1}, d_{i2} ——第 i 管段第 1 和第 2 段管道的内径, mm

z_k —— k 节点的地面高程, m

$h_{k\min}, h_{k\max}$ —— k 管段允许最小水头和管道允许最大水头, m

$I(k)$ —— k 节点的父节点个数

管长约束条件

$$S_{i1} + S_{i2} = l_i \quad (4)$$

式中 l_i ——第 i 管段长度, m

管径约束条件

$$\begin{cases} d_{\min} \leq d_{i1} \leq d_{\max} \\ d_{\min} \leq d_{i2} \leq d_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

将式(4)改写为 $S_{i2} = l_i - S_{i1}$, 把 S_{i2} 代入式(1)~(3)中, 消除模型中的等式约束, 并将待选标准管径由小到大排序, 可构造出机压树状管网优化数学模型

$$\min f(H, d_{i1}, d_{i2}, S_{i1}) = \left[\frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} + B \right] \cdot$$

$$\sum_{i=1}^N [C_{i1}S_{i1} + C_{i2}(l_i - S_{i1})] + \frac{ETQH}{367.2\eta} \quad (d_1 \leq d_{i1} \leq d_M; d_1 \leq d_{i2} \leq d_M) \quad (6)$$

s. t.

$$\begin{cases} h_{ck} = H + z_0 - h_b - \sum_{i=1}^{I(k)} \alpha f Q_i^m \left(\frac{S_{i1}}{d_{i1}^b} + \frac{l_i - S_{i1}}{d_{i2}^b} \right) - z_k - h_{k\min} \geq 0 \\ h_{mk} = H + z_0 - h_b - \sum_{i=1}^{I(k)} \alpha f Q_i^m \left(\frac{S_{i1}}{d_{i1}^b} + \frac{l_i - S_{i1}}{d_{i2}^b} \right) - z_k - h_{k\max} \leq 0 \end{cases}$$

式中 d_M ——待选标准管径

2 退火遗传算法

2.1 约束条件处理

对约束条件的处理是遗传算法理论与应用研究中的热点问题之一, 解决约束优化问题的关键是如何平衡来自目标函数最优化与满足约束条件这两方面的压力。目前的遗传算法主要采用罚函数法, 其实际应用的难点在于如何设计适合问题的罚系数。由于增加了惩罚项, 罚函数法评估函数与目标函数的形态存在差异, 而且严重依赖罚系数, 使得求解出

现较大困难^[15]。为此,本文采用解的不可行度退火算法来处理约束条件,应用遗传算法进行最优解的搜索。一个解 x_i 的不可行度定义为

$$\phi(x_i) = \sum_{j=1}^J (\min\{0, g_j(x_i)\})^2 + \sum_{k=1}^K (h_k(x_i))^2 \quad (7)$$

式中 g_j, h_k ——问题的不等式约束和等式约束

这里不可行度 $\phi(x_i)$ 被定义为解 x_i 到可行域的距离, x_i 与可行域的距离越远则不可行度越大,反之就越小;当 x_i 为可行解时,不可行度为零。

利用不可行度函数 $\phi(x_i)$, 采用模拟退火算法,对解 x_i 的不可行度进行优化调整,使其逐步逼近可行解,其算法描述如下:

步骤 1: 选取目标函数的任意一个解 x_i 为初值, $k=0$; t 为退火温度,且 $t_0 = t_{\max}$ 。

步骤 2: 若在该温度达到内循环停止条件,则执行步骤 3。否则在解的可行域内随即选择一个 x_j , 计算 $\Delta\phi_{ij} = -[\phi(x_j) - \phi(x_i)]$, 若 $\Delta\phi_{ij} > 0$, 则 $x_i = x_j$; 否则若 $\exp(\Delta\phi_{ij}/t_k) > \text{random}(0, 1)$ 时, 则 $x_i = x_j$, 重复步骤 2。

步骤 3: $t_{k+1} = d(t_k)$, $k = k + 1$; 若满足停止条件, 终止计算; 否则回到步骤 2。

2.2 构造适应度函数

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, 可构造适应度函数

$$\text{Fit} = \frac{1}{1 + f(H, d_{i1}, d_{i2}, S_{i1})} \quad (8)$$

2.3 编码

该遗传算法的优化变量为 $(H, d_{i1}, d_{i2}, S_{i1})$, 共有 $3N + 1$ 个优化变量, 将管径 d_{i1}, d_{i2} 与其序号一

一对应形成整数序列, 采取符号编码方式, 对 H 和 S_{i1} 采取实数编码方式。

2.4 遗传操作

算法采用竞赛规模为 2 的锦标赛选择法进行选择操作, 对变量 $H, d_{i1}, d_{i2}, S_{i1}$ 进行算术交叉操作, 对所有变量都采取实值变异操作。

2.5 算法步骤

图 1 给出了模拟退火遗传算法优化机压树状管网的程序流程。

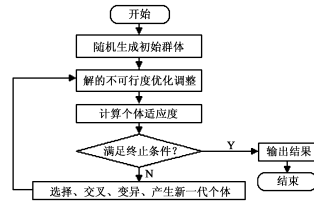


图 1 程序流程图

Fig. 1 Flow chart of program

3 仿真计算

3.1 基本数据

本文以文献[18]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 2 所示, 图中线段上方和左方“×—×”为“管段编号—管段流量”, 线段下方和右方数字为管段长度。采用聚乙烯管, 管道单价见表 1, 节点地面高程见表 2。管道承压压力 0.8 MPa, 支管入口所需压力水头 12.6 m, 水源水面高程 $z_0 = 11.4$ m。 $Y = 15$ 年, $E = 0.6$ 元/(kW·h), $\eta = 60\%$, $r = 7\%$, $B = 3\%$, $h_b = 7$ m。

表 1 管道单价表

Tab. 1 Unit price of pipeline

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 管径/mm | 10 | 12 | 15 | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 65 | 80 | 100 |
| 单价/元·m ⁻¹ | 0.40 | 0.48 | 0.70 | 1.54 | 1.84 | 2.80 | 3.60 | 5.54 | 8.80 | 11.80 | 16.40 |

表 2 节点地面高程

Tab. 2 Altitude of nodes

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

3.2 控制参数选取

以群体规模 200、交叉概率 0.9、变异概率 0.05、最大遗传代数 50 为基本遗传参数。不可行度优化调整以群体中每一个个体为解的初始值, 初始温度 $t_0 = \Delta\phi_{\max} / \ln p_r$, $p_r = 0.5$, $t_{k+1} = \lambda t_k$, $\lambda = 0.8$;

内循环终止条件是同温下迭代 5 次, 外循环终止条件为 $\phi(x_i) = 0$, 或迭代 5 次。

3.3 优化结果分析

将有关数据代入退火遗传算法模型进行优化计算, 求得的优化结果见表 3。计算的管网年费用为

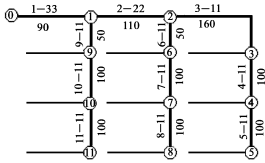


图2 管网布置示意图

Fig.2 Layout of the pipe network

表3 优化计算结果

Tab.3 Results of optimum calculation

| 管段序号 | 本文优化结果 | | | 文献[18]优化结果 | |
|-------------------------|---------|----------|--------|------------|----------|
| | 选用管径/mm | 管长/m | 节点水头/m | 选用管径/mm | 管长/m |
| 1 | 100 | 90 | | 100 | 90 |
| 2 | 80 | 110 | | 80 | 110 |
| 3 | 65 | 160 | 18.17 | 65 | 160 |
| 4 | 65 | 100 | 13.80 | 65 | 100 |
| 5 | 65/50 | 54/46 | 12.67 | 65/50 | 50/50 |
| 6 | 65 | 50 | 20.09 | 65 | 50 |
| 7 | 65/50 | 52/48 | 15.44 | 65/50 | 53/47 |
| 8 | 50 | 100 | 12.63 | 50 | 100 |
| 9 | 50 | 50 | 23.65 | 50 | 50 |
| 10 | 50 | 100 | 18.17 | 50 | 100 |
| 11 | 50 | 100 | 12.78 | 50 | 100 |
| 水泵扬程/m | | 36.88 | | | 36.64 |
| 管网年费用/元·年 ⁻¹ | | 2 472.38 | | | 2 459.44 |

2 472.38元/年,水泵扬程为 36.88 m。文献[18]计算的最优扬程为 36.64 m,管网年费用为 2 459.44 元/年,与本文优化结果基本一致。

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,结果见表 4。本文 100 次的计算结果中,相对偏差小于 1% 的概率达到 61%,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。

表4 计算结果与最优解相对偏差出现次数

Tab.4 Relative deviation of calculation result and superior solution

| 相对偏差 | <0.5% | <1% | <2% | <3% | <5% |
|------|-------|-----|-----|-----|-----|
| 出现次数 | 28 | 61 | 91 | 98 | 100 |

4 结束语

假定各管段最多由两种标准管径的管道组成,建立了以管长、标准管径为优化变量的机压树状管网优化数学模型。利用解的不可行度概念处理约束条件,采用模拟退火算法优化解的不可行度,应用遗传算法进行优化计算,克服了罚函数法的困难,能够获得全局最优。所提方法优化变量少,解算法结果稳定,具有较高的求解效率和计算精度。算法程序只需输入已知条件即可运行,无需预先确定备选管径组,获得的管径为标准管径,也不需要圆整,可适用于较大规模机压树状管网的优化设计。

参 考 文 献

- 白丹. 树状给水管网的优化[J]. 水利学报, 1996, 27(11):52~56.
Bai Dan. Optimal design of branch distribution pipe network[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 27(11):52~56. (in Chinese)
- Morgan D R, Goulter I C. Optimal urban water distribution design[J]. Water Resources Research, 1985, 21(5): 642~652.
- 蒋履祥. 喷灌管网系统的管径优化设计[J]. 喷灌技术, 1989 (1):7~11.
- Lansey K E, Mays L W. Optimizations model for water distribution system design[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(10): 1 401~1 418.
- 刘子沛. 用离散管径的动态规划法优化树状管网[J]. 喷灌技术, 1986(3):33~36.
- 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 Xinkun, Cheng Dongling, Lin Xingcui. 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)
- 魏永曜. 微分法求树状管网各管段的经济管径[J]. 喷灌技术, 1983 (3):38~42.
- Goldberg D E, Koza J R. Genetic algorithms in pipeline optimization[J]. Journal of Computing in Civ. Engrg., 1987, 1(12): 128~141.
- Halhal D G, Walters A S, Quazar D, et al. Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1997, 123(3): 137~146.
- 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.
Lü Jian, Jia Yanbing. Optimal design of water distribution system using genetic algorithms[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2001, 27(1):91~95. (in Chinese)

- 11 邹林, 马光文, 丁晶. 给水管网管径优化设计的遗传算法[J]. 四川大学学报:工程科学版, 1998, 2(1):1~6.
Zou Lin, Ma Guangwen, Ding Jing. Optimal diameter design of water networks using genetic algorithms[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 1998, 2(1):1~6. (in Chinese)
- 12 王圃, 衡洪飞, 岳健. 基于退火遗传算法的给水管网优化[J]. 中国给水排水, 2007, 23(1):60~63.
Wang Pu, Heng Hongfei, Yue Jian. Optimization of urban water network by annealing genetic algorithm[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(1):60~63. (in Chinese)
- 13 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):1 012~1 016.
Wang Xinkun. Optimization of gravity pipe network based on annealing genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(8):1 012~1 016. (in Chinese)
- 14 王新坤, 蔡焕杰. 多重群体遗传算法优化树状给水管网[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6):20~22.
Wang Xinkun, Cai Huanjie. Multi-group genetic algorithms for optimization of pumping tree pipe network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(6):20~22. (in Chinese)
- 15 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 Rongmin, Mai Wenning, Lei Yanfeng, et al. Artificial neural networks optimal design of gravity tree pipe network [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(2):66~70. (in Chinese)
- 16 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):117~122.
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):117~122. (in Chinese)
- 17 王跃宣, 吴澄, 胡昔祥, 等. 求解约束问题的退火遗传算法[J]. 高技术通讯, 2004(7):10~14.
Wang Yuexuan, Wu Cheng, Hu Xixiang, et al. Annealing-genetic algorithm for constrained optimization problems[J]. Chinese High Technology Letters, 2004(7):10~14. (in Chinese)
- 18 白丹, 李占斌, 宋立勋. 模糊线性规划在微灌干管管网系统优化中的应用[J]. 水利学报, 2003, 34(7):36~41.
Bai Dan, Li Zhanbin, Song Lixun. Application of fuzzy linear programming to optimal design of micro-irrigation main pipe network[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(7):36~41. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 55 页)

- 16 阮驰, 孙传东, 白永林, 等. 水流场 PIV 测试系统示踪粒子特性研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(2):72~77.  
Ruan Chi, Sun Chuandong, Bai Yonglin, et al. The characteristics of the tracer particles used in water flow field for PIV system[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(2):72~77. (in Chinese)
- 17 赵宇. PIV 测试中示踪粒子性能的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2004.  
Zhao Yu. Study to the performance of tracer in the PIV test [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004. (in Chinese)
- 18 胡华, 刘书亮, 王天友, 等. 关于测量内燃机缸内流场用示踪粒子的研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2002, 31(1):5~8.
- 19 Koutsiaris A G, Mathioulakis D S, Tsangaris S. Microscope PIV for velocity-field measurement of particle suspensions flowing inside glass capillaries[J]. Measurement Science & Technology, 1999, 10(11):1 037~1 046.
- 20 Klank H, Goranovic Q, Kutter J P. PIV measurements in a microfluidic 3D-sheathing structure with three-dimensional flow behaviour[J]. Journal Micromechanics & Microengineering, 2002, 12(2):862~869.
- 21 Zhang Jun, Zhao Wanhua, Wei Zhengying, et al. Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitter with arc labyrinth channels[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2):120~129.
- 22 魏正英, 唐一平, 温聚英, 等. 灌水器细微流道水沙两相流分析和微 PIV 及抗堵试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6):1~9.  
Wei Zhengying, Tang Yiping, Wen Juying, et al. Two-phase flow analysis and experimental investigation of micro-PIV and anti-clogging for micro-channels of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6):1~9. (in Chinese)
- 23 张俊, 魏公际, 赵万华, 等. 灌水器内圆弧形流道的液固二相流场分析[J]. 中国机械工程, 2007, 18(5):589~593.  
Zhang Jun, Wei Gongji, Zhao Wanhua, et al. Numerical analysis on liquid-solid two-phase flows in arc-type channel of the emitter[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(5):589~593. (in Chinese)
- 24 唐学林, 余欣, 任松长, 等. 固-液两相流体动力学及其在水力机械中的应用[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2006.
- 25 喻黎明, 吴普特, 牛文全, 等. 迷宫流道转角对灌水器水力性能的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2):63~67.  
Yu Liming, Wu Pute, Niu Wenquan, et al. Influence of angle of labyrinth channels on hydraulic performance of emitter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2):63~67. (in Chinese)