

基于遗传算法的喷灌管网优化设计

万年华, 胡铁松, 尹正杰

(水资源与水电工程国家重点实验室 武汉大学, 武汉 430072)

摘要: 结合管网优化设计理论和实际工程中管径计算的要求, 将遗传算法引入喷灌管网优化设计, 提出求解喷灌管网管径优化的计算思路, 增强了管网设计方案的经济性, 且求解出来的管径不需按标准管径调整。在此基础上, 提出把经济性与可靠性结合起来进行管网优化设计, 以及采用遗传算法求解该多目标问题。

关键词: 喷灌管网; 优化设计; 遗传算法; 可靠度

中图分类号: S275.5 **文献标识码:** A

Genetic Algorithms for Optimal Design of Sprinkler Pipe Network

WAN Nian-hua, HU Tie-song, YIN Zheng-jie

(State Key Lab of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan City 430072, China)

Abstract: Based on the theory of water pipe network design and the practical requirements of pipe diameter calculation in project, this paper introduces GA(Genetic Algorithms) to optimize the design of sprinkler pipe network, and puts forward a new calculating approach on solving the pipe diameter optimization. The application of GA improves the economic rationality of pipe network designing and the diameter doesn't need to adjust according to the standard diameter. With this presentation, this paper puts forward the idea of considering both the economic rationality and reliability in optimizing the design of sprinkler pipe network, and applying a multi-objective genetic algorithm to solve this problem. It is very important.

Key words: sprinkler pipe network; optimal design; GA; reliability

0 引言

喷灌管网的投资约占整个工程投资的 50%~80%^[1], 喷灌管网的优化设计对于降低成本、促进喷灌技术进一步推广具有十分重要的意义。在设计管道的管径时, 常采用传统的经济管径法初估管径, 然后根据要求进行调整, 再比较确定管径。这种方法的缺点是设计的优劣取决于设计人员的素质和经验, 且难免漏掉好的方案。近年来, 很多新的优化方法和算法不断被引入到管网的优化设计中, 如动态规划法、微分法、罚函数法、可行方向法等, 这些方法都有一定的局限性, 或计算繁杂, 求出的管径需要按工程上的标准管径进行调整等等, 难以广泛应用。

遗传算法是一种较新的工程优化算法, 具有全局性、并行性、对问题依赖性小等优点, 适用于求解离散管径的组合优化

问题, 在管网优化设计中已有一些研究^[2,3]。针对喷灌管网的特点和要求, 采用遗传算法进行管网管径的优化设计, 并通过实例验证遗传算法的性能。

1 喷灌管网优化设计的数学模型

在管网布置一定, 保证流量及压力的前提下, 求年费用(管道折旧、大修费和能耗等)最小的管径组合, 便构成一个优化问题。喷灌管网的优化设计既要考虑减少管网投资, 又要考虑降低能耗。当投资大时, 管径大, 磨损小, 能耗较小, 反之则相反, 喷灌管网的投资与能耗呈一种此消彼涨的关系, 喷灌管网的优化设计也就是要寻找投资与能耗的合理平衡, 使得管网的年费用最小。模型如下^[4]:

$$\min W = \left(p_0 + \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \right) \sum_{i=1}^n (a + bD_i^c) l_i + kH_p Q \quad (1)$$

压力约束

$$H_j^{\min} \leq H_j \leq [H] \quad (2)$$

流速约束

$$v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max} \quad (3)$$

管径约束

$$\sqrt{\frac{4Q_i}{\pi v_{\max}}} \leq D_i \leq \sqrt{\frac{4Q_i}{\pi v_{\min}}} \quad (4)$$

其中, $k = 86\ 000 \frac{\gamma \sigma}{\eta}$, $Q_i = \frac{\pi}{4} D_i^2 v_i$ 。

式中: p_0 为平均大修费率, 一般以占管网投资的百分比计, 喷灌系统取为 1%^[5]; r 为年利率; a, b, α 为管网造价系数; D_i 为管段管径; l_i 为管长; t 为喷灌管网折旧年限, 一般取 20~40 a; H_p 为水泵扬程, 是喷头工作压力水头、水泵几何扬程和喷灌装置总水头损失之和; Q 为水泵设计流量; H_j 为节点水压, H_j^{\min} 为要求的节点最低压力; $[H]$ 为管道耐压能力; v_i 为管道流速; v_{\min} 为最小流速限制; v_{\max} 为最大流速限制; Q_i 为各管段流量; i 为管段序号; j 为节点序号; n 为管段总数; k 为与抽水费用有关的经济指标; γ 为计算年限内泵站能耗变化系数, 无水塔时取 0.1~0.4; η 为泵站的效率, 一般取 0.55~0.85; σ 为电价。

表 1 管径编码

管径/mm	75	90	110	125	140	160	180	200	225	250	280
编 码	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

2.2 计算适应度

分析计算群体中每个个体的水力特性, 并对管网费用目标函数进行处理。对目标函数进行归一化处理, 使其值位于 [0, 1] 之间, 取 $W' = W/(1+W)$ 。由于遗传算法不能直接求解带约束的优化问题, 对于约束解决的方法之一是引入罚函数, 对个体违反约束的情况给予相应的惩罚, 并将此惩罚体现在目标函数中, 得到带惩罚项的目标函数:

$$W'' = W' + \sum_{i=1}^m \phi_i(P) \quad (5)$$

式中: P 代表约束, $\phi_i(P)$ 为惩罚函数, 通常根据约束类别和违背约束的程度进行取值, 使对约束违背的惩罚分量适当。

以流速约束式(3)为例, 惩罚函数如下, 式中 σ 可根据试算确定。

$$\phi_1(P_1) = \begin{cases} 2\sigma & v_i < 0.5v_{\min} \\ \sigma & 0.5v_{\min} \leq v_i < v_{\min} \\ 0 & v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max} \\ \sigma & v_{\max} < v_i \leq 1.5v_{\max} \\ 2\sigma & v_i > 1.5v_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

设种群规模为 M , 计算种群中个体 $X^{(m)}$ 对应的目标函数 $W^{(m)}$ ($m = 1, \dots, M$), 根据 $W^{(m)}$ 从大到小的次序对 $X^{(m)}$ 排序, 设 $X^{(m)}$ 的排序号为 $R^{(m)}$, 则其适应度定义为:

$$F^{(m)} = R^{(m)} \quad (7)$$

2.3 选择、交叉与变异

采用轮盘赌的方法进行个体选择。个体的适应度越高, 被选中的机会越大, 产生的后代就越多。按交叉概率 P_c 选出参与交叉的个体, 随机配对, 在配对个体中随机设定交叉处, 进行单点交叉, 一般为 0.7~1.0。采用均匀变异, 设个体 X 中的某

2 模型算法

遗传算法是一种基于自然选择和生物进化的启发式搜索算法, 通过群体优化搜索和随机进化机制控制优化过程。其基本思想是: 通过编码将待求解问题的决策变量转化为遗传染色体, 由决策变量的目标函数值决定染色体的适应度, 再经过三个基本遗传算子: 选择、交叉和变异, 产生新的个体。那些适应度较高的个体有更多的机会被选择产生后代, 子代个体包含父代染色体的有利信息, 随着遗传代数的增加, 个体的适应度不断提高, 直至满足收敛条件, 这时群体中适值最高的个体即可作为待优化参数的(近似)最优解^[6]。

2.1 编 码

以各管段管径为决策变量, 考虑到工程上常采用标准管径, 采用整数编码, 将不同的标准管径规格用整数编码对应表示, 具体见表 1。那么决策变量组合 $D = (D_1, D_2, \dots, D_n)$ 可以编码为染色体 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。整数编码大大减少了染色体的长度, 避免了编码冗长的问题^[2], 同时改进和提高了算法的操作性和实用性。

个基因 x_i 需要变异, 将 x_i 替换均匀分布的随机整数 \hat{r} 。通常取变异概率 p_m 为 0.001 左右。

经过试算, 遗传算法参数设定如下: 种群规模 $N = 50$, 交叉概率 $p_c = 0.75$, 变异概率 $p_m = 0.001$, 最大进化代数取 500。

3 实例分析

某节水示范区采用固定管道式喷灌系统, 由泵站从河中引水进行灌溉, 干管管网布置如图 1 所示, 0 为管网入口点, 一共 18 个控制节点。0—1 段采用铸铁管, 其他管道选用聚氯乙烯塑料管。按随机用水计算出喷灌设计流量为 0.207 m³/s, 参考点所需最小压力水头为 46.24 m, 管网基本数据见表 2。管段允许最小流速 $v_{\min} = 0.6$ m/s, 最大流速 $v_{\max} = 3$ m/s。

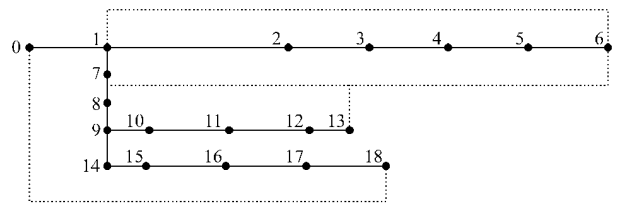


图 1 干管管网布置示意图

聚氯乙烯塑料管沿程水头损失计算:

$$h_f = \frac{0.948 \times 10^5 \times L \times (Q/3\ 600)^{1.77}}{D^{4.77}} \quad (8)$$

铸铁管沿程水头损失计算:

$$h_f = \frac{6.25 \times 10^5 \times L \times (Q/3\ 600)^{1.9}}{D^{5.1}} \quad (9)$$

式中: L 为管段长度, m; Q 为管段流量, m³/s; D 为管内径, mm。局部水头损失按沿程水头损失的 10% 计算。将有关数据

带入优化数学模型进行计算,得到节点 1 至节点 18 之间各管段的优化结果,见表 2。

表 2 遗传算法优化结果

管段	序号	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	长度/ m	优化管径/ mm
1—2	1	0.106	461.28	250
2—3	2	0.083	203.00	225
3—4	3	0.065	203.00	225
4—5	4	0.035	203.00	225
5—6	5	0.015	203.00	125
1—7	6	0.112	103.00	250
7—8	7	0.099	203.00	225
8—9	8	0.092	76.02	225
9—10	9	0.018	107.34	125
10—11	10	0.015	203.00	125
11—12	11	0.007	203.00	110
12—13	12	0.003	103.00	90
9—14	13	0.056	58.63	225
14—15	14	0.044	100.26	180
15—16	15	0.032	203.00	180
16—17	16	0.020	203.00	140
17—18	17	0.008	203.00	140

表 3 分别列出了采用经济管径法与遗传算法得到的干管各管段的尺寸。原设计方案直接采用传统的经济管径法推求管径,管网的年费用为 6.494 7 万元;应用遗传算法寻优,年费用值为 6.097 1 万元,相比前者降低 6.12%,在没有过多增加水泵扬程的同时,有效降低了管网的年费用。可以看出,将遗传算法引入喷灌管网设计,以年费用为优化目标,收到较好的优化效果,增强了管网设计方案的经济合理性。本文遗传算法采用整数编码方法,得到一组直接以标准管径表示的满足要求的优化解,无需再进行调整,更能适应管网计算要求。

4 结 语

遗传算法具有全局性、并行性、对问题依赖性小等优点,适用于求解离散管径的组合优化问题;其独特的设计思路和卓越的求解性能,使其在喷灌管网优化设计中具有较强的实用性。不仅如此,对于多目标优化问题,遗传算法能克服传统算法依赖权重向量的局限性,利用自身强大的全局搜索能力,找出所有可能的优化解,供决策者参考。

随着喷灌、微喷灌等技术的推广应用,管网系统常会出现管道破裂、给水栓损坏等机械故障,以及压力变化、管网老化、漏水引起的水力故障。特别地,树枝状网在故障条件下会产生严重后果,当某处管线发生故障的时候,下游管线将会断水,供水可靠性较差。这一方面影响了作物的生长,另一方面增加系统的维修费用,从而严重阻碍微喷灌技术的大力推广。因此,

表 3 计算结果对比

管段	序号	原设计方案		最优设计方案	
		管径/ mm	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	管径/ mm	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1—2	1	280	1.95	250	2.45
2—3	2	250	1.92	225	2.38
3—4	3	225	1.86	225	1.86
4—5	4	180	1.57	225	1.01
5—6	5	125	1.39	125	1.39
1—7	6	280	2.56	250	2.58
7—8	7	280	1.83	225	2.84
8—9	8	280	1.70	225	2.64
9—10	9	140	1.35	125	1.70
10—11	10	125	1.39	125	1.39
11—12	11	90	1.20	110	0.80
12—13	12	63	1.07	90	0.60
9—14	13	225	1.62	225	1.62
14—15	14	200	1.60	180	1.98
15—16	15	180	1.44	180	1.44
16—17	16	140	1.51	140	1.51
17—18	17	90	1.49	140	0.61
扬程/m		66.56		66.72	

管网系统的设计不仅要考虑到尽可能降低费用,还要最好地发挥管网的效益,改进管网的效率^[7]。管网优化设计除了经济性这个目标外,还要考虑其他的优化目标。为提高管网在故障条件下的性能,将经济指标与管网可靠性结合起来进行管网系统的设计,这对于灌溉管网和城市给水管网的设计都具有非常重要的意义。

科学地定义管网可靠度,并应用遗传算法求解管网优化设计的多目标问题,将获得更有意义的成果,具有更大的科学价值和研究意义,值得进一步探讨、研究。

参考文献:

- [1] 魏永耀,林性粹. 农业供水工程[M]. 北京:水利电力出版社,1992:225—226.
- [2] 周荣敏,林性粹. 用基于整数编码的改进遗传算法进行环状管网优化设计[J]. 灌溉排水,2001.
- [3] 张 华,吴普特. 灌溉管网优化研究进展[J]. 节水灌溉,2004,(2).
- [4] 严熙世,赵洪宾. 给水管网理论和计算[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1986:172—178.
- [5] 喷灌工程设计手册编写组. 喷灌工程设计手册[M]. 北京:水利电力出版社,1988:393—395.
- [6] Reed, P., B. Minsker, D. E. Goldberg. Designing a competent simple genetic algorithm for search and optimization. Water Resources Research, 2000,36(12): 3757—3761.
- [7] Devi T, Park N S. Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks, 2004,130(1): 73—82.