

喷微灌输水管网优化设计

朱德兰^{1,2}, 吴普特^{1,2}

1. 西北农林科技大学资环学院; 2. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西 杨凌, 712100

摘要: 以连续管径和水泵扬程为设计变量, 以管网年费用最低为目标函数建立非线性规划模型, 采用拉格朗日法求解, 获得一组最优管径组合; 参考第一级优化的连续管径组合, 结合施工中要求的变径数选择标准管径组合, 以具有标准管径的管长为决策变量, 以管道年费用为目标函数, 建立相应的线性规划模型, 采用单纯形法求解获得全局最优解。通过实例说明, 借助于 Visual-Basic 语言编制的该设计程序, 设计界面友好, 使用直观方便, 运行速度快, 即使非专业人员也可在短时间内进行工程设计, 且适用于任何压力输水管网的设计。

关键词: 压力输水管网; 非线性规划模型; 拉格朗日法; 线性规划模型

中图分类号: S275 文献标识码: A 文章编号: 1005-6254(2005)01-0035-05

0 引言

压力输水管网大多数为树状管网, 即单一水源向多点供水, 只有分流而无汇流的管网, 传统的设计方法一般是先根据具体条件确定管线、各管段运行流量及所用管材, 然后采用经济流速的经验值逐段确定管径。由于影响经济坡降的因素很多, 仅凭经验选取数值很难使管网系统的管径组合达到最优。求解管网系统经济管径的方法较多, 如微分法、线性规划法、非线性规划法、动态规划法均有应用的例子。这些方法均有其相应的适用条件, 理论成熟但使用不便。影响干管管径大小的主要因素有两个, 一是管道投资, 二是动力费用, 二者相互影响。管径大, 则投资大, 但水头损失小, 水泵扬程低, 动力费低; 反之亦然。因此研究从全局最优考虑以年费用作为目标函数, 利用两级优化法寻求树状管网各段管径的最优值。该优化设计方法适用于机压、自压、地形变化复杂、管网轮流工作、进口压力随流量的变化而变化等多种条件。

1 设计方法及思路

线性规划模型和非线性规划模型是树状管网优化设计中常用的两种优化模型。线性规划模

型有通用的求解方法如单纯形法, 能获得全局最优解, 但变量较多, 最优管径集合难以确定。非线性规划模型变量较少, 求解速度快, 但仅能得到近似最优解。因此, 若将非线性规划模型与线性规划模型有机结合起来, 充分利用两者的优点, 是一种理想的管网优化设计方法。基于这种思路, 研究利用两级优化设计模型。第一级优化模型采用非线性规划模型, 以连续管径和水泵扬程(机压系统)为设计变量, 以管网年费用最低为目标函数, 获得一组最优管径组合。第二级优化采用线性规划模型, 参考第一级优化的连续管径组合, 结合施工中要求的变径数选择标准管径组合, 使标准管径包含了最大和最小的连续管径, 然后以具有标准管径的管长为决策变量, 以管道年费用最低为目标函数, 建立相应的线性规划模型, 从而获得全局最优解。

在树状管网的两级优化模型中, 线性规划模型将采用单纯形法求解, 非线性模型采用拉格朗日法求解。两级优化模型充分利用了非线性规划模型能快速定位出最优解范围和线性规划模型能准确搜索出最优解的特点, 既可以弥补非线性规划模型的近似解需要圆整化处理的缺点, 又解决了线性规划模型求解问题规模有限的不足, 可以得到一个真正的全局最优解。

基金项目: “十五”国家区域攻关项目(2001BA508B20); 中国科学院知识创新项目(2002AA₂Z4101); 中国科学院知识创新项目(KZCX1-06-02-03)

作者简介: 朱德兰, 1969-, 女, 青海乐都县人, 副教授, 博士, 主要从事水资源高效利用研究。

2 输水管网初步优化设计

在管材、管网线路布置、各段流量确定的情况下，管网工程造价和年运行费主要与各段管径组合、进口所需提高的工作水头有关。因此，问题可归结为求解系统的最优管径组合和进口水头。由于造价是管径的非线性函数，所以输水管网初步优化设计的目的是将管径和进口水头作为决策变量，年运行费作为目标函数，因而可应用非线性规划模型进行设计。

2.1 单根管道优化设计方法

输水管网设计思路是将管网系统分解成单根管道进行设计，所以先对单根串联管道这一基本形式的算法进行阐述，进一步说明整个输水管网系统设计。

2.1.1 管道进口水压力已知时优化设计方法

以管道投资最小为目标函数，可建立如下的非线性规划优化设计模型。

$$\begin{aligned} \text{Min } W &= \sum_{i=1}^N (A_1 D_i^2 L_i) + a Q_0 H_0 \quad (1) \\ A_1 &= \frac{7.85 \times 10^{-5} C [H]^2}{s^2 t} + \frac{1.75 \times 10^{-5} C [H]}{s t} \\ a &= 2.777 \times 10^{-3} E T \end{aligned}$$

式中， W 为干管年费用，元； D_i 、 L_i 为第 i 管段的直径，mm、长度，m； H_0 为拟设计管网进口水压力，m； Q_0 为拟设计管网进口流量， m^3/h ； C 为管道材料单价，元/ m^3 ； E 为电费，元/ $kW \cdot h$ ； T 为管道年工作小时数，h； t 为管道使用寿命，年； s 为管道允许拉应力， kN/m^2 ； $[H]$ 为管材耐压等级，m。

约束条件：

$$\sum_{i=1}^n K f \frac{Q_i^m}{D_i^n} L_i - (E_0 - E_n) = 0 \quad (2)$$

式中， K 为考虑局部水头损失的扩大系数； f 、 m 、 n 为材料有关的摩擦损失系数； E_0 、 E_n 为拟设计管网进口、出口处水流总能量，m，若忽略动能，水流总能量为位能和压能之和，即 $E_0 = H_0 + Z_0$ ， $E_n = H_n + Z_n$ ； H_0 、 H_n 为拟设计管网进口、出口处的水压力，m； Z_0 、 Z_n 为拟设计管网进口、出口处的地面高程，m。

令 $H_f = E_0 - E_n$

式中， H_f 为允许水头损失，m。

当管道进口水压力已知时， H_0 为常数，优

化时可省去。利用拉格朗日法求解模型，构造拉格朗日函数

$$\begin{aligned} Z(D_i, H_f, I) &= \sum_{i=1}^N (A_1 D_i^2 L_i) + \\ &I \left(\sum_{i=1}^n K f \frac{Q_i^m}{D_i^n} L_i - H_f \right) \quad (3) \end{aligned}$$

函数 Z 对 D_i 求导等于零，得到

$$D_i = Q_i^{\frac{2m}{2+n}} \left(\frac{\sum_{i=1}^N K f l_i Q_i^{\frac{2m}{2+n}}}{H_f} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

式(4)为管道进口水压力已知和未知情况下的优化管径求解公式。

2.1.2 管道进口水压力未知时优化设计方法

管道进口水压力未知时，目标函数与约束条件的表示方法与水泵型号已知情况相同。

$$H_0 = H_f + E_n - Z_0 \quad (5)$$

式中， H_f 为管道水头损失，m。

由于 E_n 、 Z_0 为常数，优化时可省去。则拉格朗日函数可表示为

$$\begin{aligned} Z(D_i, H_f, I) &= \sum_{i=1}^N (A_1 D_i^2 L_i) + a Q_0 H_f + \\ &I \left(\sum_{i=1}^n K f \frac{Q_i^m}{D_i^n} L_i - H_f \right) \quad (6) \end{aligned}$$

因 $\frac{\partial Z}{\partial H_f} = 0$ 得到

$$H_f = \left(\frac{G_2}{a Q_0} \right)^{\frac{n}{2+n}} \quad (7)$$

式中， $G_2 = \frac{2 A_1 f^n}{n} \left(\sum_{i=1}^n l_i Q_i^{\frac{2m}{2+n}} \right)^{\frac{2+n}{n}}$

则 $H_0 = H_f + H_n + Z_n - Z_0$ (8)

利用式(7)、式(8)可计算管道进口水压力，管段直径计算公式仍利用式(4)。

2.2 分叉干管优化设计方法

对于具有公用管道的输水干管，首先计算每条干管的经济因子，经济因子最大的干管为不利干管，按上述单根管道设计方法进行不利干管设计。当不利干管各管段直径确定后，可推算出不利干管上各节点的水压力。输水干管上节点水压力公式如下：

$$H_k = H_0 + Z_0 - \sum_{i=1}^k K f \frac{Q_i^m}{D_i^n} L_i - Z_k \quad (9)$$

表1 干管管网基本数据

管段编号	管段长(m)	管段流量(m ³ /h)	节点编号	节点流量(m ³ /h)	节点地面高程(m)	水源到需水节点的管段编号
			0	38.46	103.41	
1	80.0	38.46	1	38.46	102.80	
2	142.5	19.23	2	19.23	101.35	
3	90.0	19.23	3	19.23	102.35	0,1,3
4	90.0	19.23	4	19.23	100.90	0,1,2,4
5	180.0	19.23	5	19.23	101.45	0,1,3,5
6	180.0	19.23	6	19.23	100.00	0,1,2,4,6

表2 计算模型输入参数表

名称	单位	数值	名称	单位	数值
管材单价 C	元/m ³	18000	摩擦损失系数 f		94800
管材使用寿命 t	年	10	考虑局部水头损失的扩大系数 K		1.1
电费单价 E	元/kW·h	0.5	摩擦损失系数 m		1.77
年抽水工作时数 T	h/年	200	摩擦损失系数 n		4.77
管材许用应力 $[\sigma]$	kN/m ²	2500	管材耐压	m	25

表3 干管水力计算结果

管段编号	管段长(m)	初步优化管径(m)	标准管径(m)	标准管径对应管长(m)	节点编号	节点水头(m)
					0	35.00
1	80.0	82.99	90	80.0	1	31.24
2	142.5	82.99	90	142.5	2	28.41
3	90.0	72.90	80	90.0	3	27.90
4	90.0	82.99	90	90.0	4	25.34
5	180.0	60.80	60	180.0	5	16.49
6	180.0	60.30	60	180.0	6	16.49

5 结语

1) 首先以连续管径和水泵扬程(机压系统)为设计变量,以管网年费用最低为目标函数建立非线性规划模型,采用拉格朗日法求解,获得一组最优管径组合;然后参考第一级优化的连续管径组合,结合施工中要求的变径数选择标准管径组合,以具有标准管径的管长为决策变量,以管道年费用为目标函数,建立相应的线性规划模型,采用单纯形法求解获得全局最优解。

2) 两级优化模型充分利用了非线性规划模型能快速定位出最优解范围和线性规划模型能准确搜索出最优解的特点,既可以弥补非线性规划模型的近似解需要圆整化处理的缺点,又解

决了线性规划模型求解问题规模有限的不足,可以得到一个真正的全局最优解,树状管网两级优化模型在求解速度、适用问题规模、获得全局最优解的能力上,均比单一的非线性规划模型和线性规划模型更具有优越性。

3) 利用 Visual-Basic 语言编程,设计界面友好,使用直观方便,即使非专业人员也可进行工程设计,该程序适用于任何压力输水管网。

参考文献:

[1] Wu. I. P., and Gitlin. H.M., Energy Gradient Line For Drip Irrigation Laterals[J], Journal of The Irrigation and Drainage Division, ASCE, 1975, 101(4): 323-326.
 [2] 白丹. 微灌田间管网的优化[J]. 水利学报, 1996, (8).

