

对置水塔树状管网系统优化设计的线性规划模型

白 丹

(西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

摘 要: 树状管网系统广泛用于乡镇供水工程, 通过优化设计, 可获得管网系统最经济的设计方案。该文在考虑管网系统最高用水和最大转输两种工况的基础上, 针对对置水塔树状管网系统各组成部分的压力和流量关系, 建立了该管网系统优化设计的线性规划模型, 应用这一优化设计模型, 以管网系统年费用最小为目标函数, 在保证管网系统各节点所需流量和压力条件下, 可确定管段尺寸、水塔高度和泵站扬程的最优值, 获得树状网前水塔管网系统的优化设计方案。

关键词: 对置水塔; 树状管网; 优化设计; 线性规划

中图分类号: TU 990.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0087-04

0 引 言

树状给水管网广泛用于乡镇供水, 通过优化设计, 寻求最经济的树状管网优化设计方案具有显著的经济和社会效益。

国内外许多学者在树状管网优化设计方面开展了研究, 主要方法有非线性规划法^[1]、动态规划法^[2-4]、线性规划法^[5-7]以及人工神经网络法^[8,9]等。以上成果大部分研究的是灌溉树状管网优化设计问题, 而对设有水塔的给水管网研究较少, 实际上, 设有水塔树状给水管网在水力联系上与灌溉管网并不完全相同, 但对这类有塔树状管网分级供水条件下优化设计问题研究较少。

树状管网设置水塔的目的是调节管网中的流量和压力, 这样不但可缩短二级泵站工作时间, 降低二级泵站的设计流量; 又可保证系统所需的水压。水塔一般布置在高处或用水量较为集中的区域, 以降低工程投资, 根据水塔在管网系统中的位置, 可分为网前水塔管网系统、网中水塔管网系统和对置水塔管网系统。

对置水塔树状管网水压关系如图 1 所示(图 1 中各符号与文中公式相同), 管网系统分为泵站、水塔和管网 3 个组成部分。在对置水塔管网的水力计算中, 要同时考虑两种工况, 即最高用水时和最大转输时。在最高用水时, 二级泵站和水塔同时向管网各节点供水, 在管网中形成供水分界线, 各管段流量按照最高用水时用水量计算; 当用水量小于泵站供水流量时, 多余的水量通过管网进入水塔, 这部分多余的流量称为转输流量, 当用水量达到最小时, 泵站进入水塔的流量达到最大值, 将这一流量称为最大转输流量, 最大转输流量通过管网的距离长, 水头损失大, 此时水泵所需扬程可能会大于最高用水时的扬程。管网系统流量和压力必须同时满足最高用水时和最大转输时用水要求。

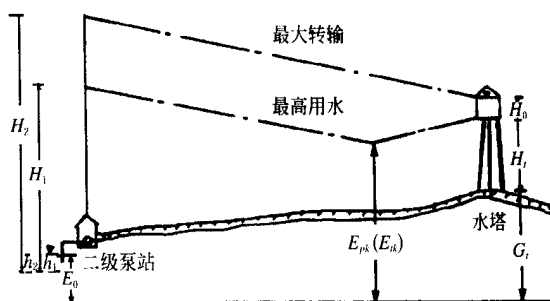


图 1 对置水塔树状管网水压关系

Fig 1 Hydraulic pressure relation of the branch network with water tower back of network

1 优化设计数学模型

管网系统优化问题分为两个方面, 其一是管网系统的优化布置问题; 其二是管网系统优化设计问题, 即在管网系统布置方案确定后, 如何确定管网流量分配方案和选择各级管道尺寸、水塔高度和水泵扬程, 以获得年费用最小的管网设计方案。本文将研究对置水塔树状管网系统的优化设计问题。

1.1 备选管径组

工程上采用标准管径, 每一管段可由一种或数种标准管径的管道组成, 但标准管径档次较多, 计算工作量较大。为减少计算量, 对某一管段, 可通过流速限制, 将管径档次限制在某一范围内。在对置水塔管网中, 泵站供水分为两级, 即最高用水时 ($m = 1$) 和最大转输时 ($m = 2$) 管道流量条件下, 为防止水击破坏, 管道内流速通常限制在 3 m/s 以下; 为防止淤积, 管内流速不应低于 0.6 m/s 。

$$0.6 \leq V_{ijm} \leq 3 \quad (m = 1, 2) \quad (1)$$

式中 V_{ijm} ——管道流速, m/s ; i ——管段序号; j ——标准管径序号; m ——泵站分级供水序号。

$$V_{ijm} = \frac{4Q_{im}}{\pi D_j^2} \quad (m = 1, 2) \quad (2)$$

式中 Q_{im} ——管段设计流量, m^3/s ; D_j ——管道计算内径, mm 。

在第 i 管段中, 可根据式(1) 选择符合这一条件的标准管径, 若这样的标准管径档次有 $M(i)$ 个, 则这

收稿日期: 2003-04-17 修订日期: 2003-10-23

作者简介: 白 丹, 男, 教授, 研究方向为节水灌溉和环境系统工程, 西安市西安理工大学 748 信箱 西安理工大学水资源研究所, 710048, Email: baidan888@sohu.com

$M(i)$ 个标准管径组成第 i 管段的备选管径组。

1.2 目标函数

在确定了二级泵站供水线后, 水塔容积就确定了, 据此可计算水塔水柜造价, 在此条件下认为水柜造价为一常量。故在目标函数中只考虑由地面至水塔水柜底部分的造价。

以管网系统年费用最小为目标函数。

$$\min W = A_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M(i)} C_{ij} x_{ij} + A_2 C_d H_t + \sum_{m=1}^M R_m Q_m H_m \quad (3)$$

式中 W ——对置水塔树状管网系统年费用, 元/年;
 N ——管段数; $M(i)$ ——第 i 管段的备选管径数;
 C_{ij} ——第 i 管段中的第 j 种标准管径管道单价, 元/m;
 x_{ij} ——第 i 管段中选用的第 j 种标准管径的管长, m;
 A_1 ——管道部分考虑资金偿还与大修费的系数;
 A_2 ——水塔考虑资金偿还与大修费的系数; C_d ——单位高度水塔造价, 元/m; H_t ——地面至水塔水柜底高度, m; M ——泵站供水分级总数, 在对置水塔管网中 $M=2$; Q_m ——最高日第 m 供水阶段泵站供水流量, m^3/s ; H_m ——第 m 供水阶段泵站扬程, m; R_m ——第 m 供水阶段动力费用系数。

$$R_m = \frac{35780 b_m T_m}{\eta_m} \quad (4)$$

式中 T_m ——最高日第 m 供水阶段泵站工作时数, h;
 η_m ——最高日第 m 供水阶段泵站效率, %; σ ——系数;
 b_m ——供水能量不均匀系数。

$$A_1 = \left[\frac{e(1+e)^{t_1}}{(1+e)^{t_1}-1} + \frac{p_1}{100} \right] \quad (5)$$

$$A_2 = \left[\frac{e(1+e)^{t_2}}{(1+e)^{t_2}-1} + \frac{p_2}{100} \right] \quad (6)$$

式中 e ——年利率, %; t_1 ——管道的投资偿还期, 年; p_1 ——管道的年折旧费及大修费扣除百分数;
 t_2 ——水塔的投资偿还期, 年; p_2 ——水塔的年折旧费及大修费扣除百分数。

1.3 约束条件

1.3.1 管长约束

$$x_{ij} = L_i \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

式中 L_i ——管段长, m。

1.3.2 最高用水时压力约束

将管道节点实际水头与地面高程之和称为节点水压标高, 将管道节点最小服务水压与地面高程之和称为节点服务水压标高。

在最高用水时, 在管网中存在供水分界线, 形成泵站供水节点和水塔供水节点。

1) 供水节点水压约束

要求泵站供水各节点水压标高均不得低于该节点服务水压标高

$$\begin{aligned} I(kp)M(i) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M(i)} J_{ij1} x_{ij} - H_1 - E_0 - E_{kp} - h_1 \\ (kp=1, 2, \dots, KP) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 kp ——泵站供水节点序号; KP ——泵站供水节点总数; $I(kp)$ ——从泵站到其供水节点经过的管段

数; E_0 ——水源水面高程, m; E_{kp} ——泵站供水节点服务水压标高, m; J_{ij1} ——最高用水时管道水力坡度;
 h_1 ——最高用水时水泵吸水管水头损失, m。

2) 水塔供水节点水压约束

要求水塔供水各节点水压标高均不得低于该节点服务水压标高

$$\begin{aligned} I(kt)M(i) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M(i)} J_{ij1} x_{ij} - H_t - G_t - E_{kt} \quad (kt=1, 2, \dots, KT) \end{aligned} \quad (9)$$

式中 kt ——水塔供水节点序号; KT ——水塔供水节点总数; $I(kt)$ ——从水塔到其供水节点经过的管段数; G_t ——水塔处地面高程, m; E_{kt} ——水塔供水节点服务水压标高, m。

3) 分界点水压平衡约束

泵站和水塔供水分界点处水压值应相等。

$$\begin{aligned} H_t - H_1 + \sum_{i=1}^{PF} \sum_{j=1}^{M(i)} J_{ij1} x_{ij} - \sum_{i=1}^{TF} \sum_{j=1}^{M(i)} J_{ij1} x_{ij} \\ = E_0 - G_t - h_1 \end{aligned} \quad (10)$$

式中 PF ——最高用水时泵站至分界点经过的管段数; TF ——最高用水时水塔至分界点经过的管段数。

1.3.3 最大转输时压力约束

这时所有节点均由泵站供水, 多余的水量流入水塔。

1) 节点水压约束

$$\begin{aligned} I(kp)M(i) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M(i)} J_{ij2} x_{ij} - H_2 - E_0 - E_{kp} - h_2 \\ (kp=1, 2, \dots, KP) \end{aligned} \quad (11)$$

式中 J_{ij2} ——最大转输时管道水力坡度。

2) 泵站扬程约束

在最大转输时, 泵站扬程要能满足向水塔供水的要求。

$$\begin{aligned} PT \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M(i)} J_{ij2} x_{ij} + H_t - H_2 - E_0 - G_t - H_0 - h_2 \end{aligned} \quad (12)$$

式中 PT ——泵站至水塔经过的管段数; H_0 ——水塔水柜有效深度, m; h_2 ——最高转输时水泵吸水管水头损失, m。

1.3.4 管道承压约束

泵站扬程不能大于管道承压。

$$H_m - 102H_c + h_m \quad (m=1, 2) \quad (13)$$

式中 H_c ——管道承压, MPa。

1.3.5 非负约束

$$x_{ij} \geq 0 \quad (14)$$

$$H_t \geq 0 \quad (15)$$

$$H_m \geq 0 \quad (16)$$

2 模型求解

以上是一个线性规划问题, 优化变量为 x_{ij} 、 H_t 和 H_m , 可用单纯形法^[11]计算。

3 应用

对置水塔树状管网如图 2 所示, 图 2a 为最高用水时

各管段流量分布情况,水泵和水塔的供水分界点为节点 2;图 2b 为最大转输时各管段流量分布情况。采用钢筋混凝土管, $n=0.013$,管道单价见表 1,管道承压能力为 0.6MPa , $\sigma=0.3\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $e=8\%$, $C_i=510\text{元}/\text{m}$ 。 $t_1=30\text{年}$, $p_1=4\%$; $t_2=20\text{年}$, $p_2=3\%$ 。水源水面高程 10.4m ,水塔处地面高程 15.3m ,水塔水柜有效深度 2m ,节点最小服务水压 12m ,各节点地面高程和服务水压标高见表 2。泵站分两级供水,各供水阶段技术参数见表 3。

表 1 管道单价

Table 1 Cost of the unit pipe length

管径/m	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
单价/元·m ⁻¹	25	30.8	38.7	42	55.2	64	83.2

表 2 节点水压

Table 2 Hydraulic pressure of node

节点序号	1	2	3	4	5	6	7
地面高程/m	14.3	14.5	13.8	13.5	14.1	14.6	14.2
服务水压标高/m	30.3	30.5	29.8	29.5	30.1	30.6	30.2
最高用水水压标高(优化设计)/m	36.6	35.9	36.0	33.6	30.1	30.6	30.2
最大转输水压标高(优化设计)/m	40.5	38.9	38.0	40.2	39.9	40.0	38.4
最高用水水压标高(常规设计)/m	40.9	40.2	40.3	37.9	33.9	33.8	34.5
最大转输水压标高(常规设计)/m	44.8	43.2	42.3	44.5	43.9	43.8	42.7

表 3 各级供水有关技术参数

Table 3 Technical parameters in each load

m	$Q_m/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	T_m/h	η_h	b_m	h_m/m
1	0.061	11	0.72	0.3	0.3
2	0.0382	8	0.68	0.4	0.3

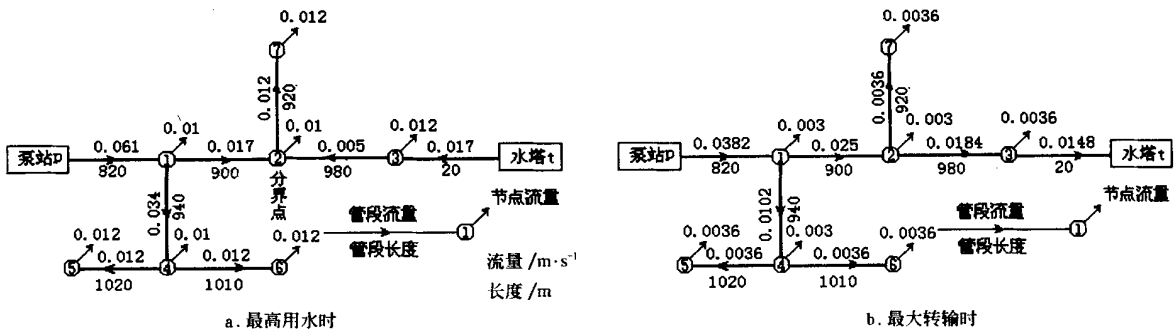


图 2 管网示意图

Fig 2 Layout of network

首先确定各管段备选管径组(见表 4),对于混凝土管及钢筋混凝土管,用巴甫洛夫斯基公式^[11]计算管道水力坡度,取粗糙系数 $n=0.013$ 。将有关数据代入以上对置水塔树状优化设计线性规划

模型,通过计算, $H_i=20.67\text{m}$, $H_1=29.78\text{m}$, $H_2=31.68\text{m}$ 。管网优化计算结果见表 4。管网系统年费用 $50\,592\text{元}/\text{a}$ 。

表 4 管段备选管径组及其计算结果

Table 4 Design result and selecting diameter of each pipe segment

管段	备选管径组管径/m	优化设计	常规设计
		选用管径/m/最优长度/m	选用管径/m/长度/m
p- 1	0.35 0.30 0.25 0.20	0.30/820	0.30/820
3- t	0.35 0.30 0.25 0.20	0.25/20	0.25/20
1- 2	0.25 0.20 0.15	0.25/900	0.25/900
2- 3	0.25 0.20 0.15	0.25/980	0.25/980
1- 4	0.25 0.20 0.15	0.25/940	0.25/940
4- 5	0.20 0.15 0.10	0.20/588 0.15/432	0.15/1020
4- 6	0.20 0.15 0.10	0.20/678 0.15/332	0.15/1010
2- 7	0.20 0.15 0.10	0.15/920	0.15/920

根据优化计算结果,可分别计算出最高用水时水压标高值和最大转输时水压标高值(见表 2)。

按照常规设计, $H_1 = 25.00\text{ m}$, $H_2 = 34.11\text{ m}$, $H_3 = 36.01\text{ m}$ 。管网计算结果见表 4。管网系统年费用 53 110 元/a。根据常规设计结果,可分别计算出最高用水时水压标高值和最大转输时水压标高值(见表 2)。

优化设计较常规设计节省年费用 4.74%。

[参 考 文 献]

- [1] 魏永曜. 微分法求树状网各管段的经济管径[J]. 喷灌技术, 1983, (3): 38- 42
- [2] Liang T. Design of conduit system by dynamic programming[J]. Journal of Hydraulics, ASCE, 1971, (3): 383- 393
- [3] Kwang P, et al. Design of conduit system with diverging branches[J]. Journal of Hydraulics, ASCE, 1975, (3): 167- 187
- [4] 魏永曜. 动态规划法求开式管网的经济管径[J]. 喷灌技术, 1984, (3): 22- 28
- [5] Kameli D, Gadish Y, Meyers S. Design of optimal distribution network[J]. Journal of Pipeline, ASCE, 1968, 94 (1): 1- 10
- [6] Gupta I. Linear programming analysis of a water supply system[J]. Trans Amer Inst Eng, 1969, 9(1): 56- 61
- [7] Gupta I, Cook J. Linear programming analysis of a water supply system with multiple supply points[J]. Trans Amer Inst Eng, 1972, 11(3): 200- 204
- [8] 周荣敏, 等. 自压式树状管网神经网络优化设计[J]. 水利学报, 2002, (2): 66- 70
- [9] 周荣敏, 林性粹. 自压式树状管网遗传优化布置和神经网络优化设计[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 41- 44
- [10] 李维铮, 等. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1982
- [11] 马树升. 乡镇供排水[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999

Linear programming model of optimal design for branch network with water tower back of network

Bai Dan

(Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The branch networks are widely applied to the water supply engineering of villages and small towns. The most economical network design was obtained by using the optimal design. Considering the two types of load both maximum load and transfer load of network, the linear programming model was presented to optimize branch network with water tower back of network, based on the relation of the hydraulic pressure and discharge of the parts in network. Assured demand for the pressure and discharge of network nodes, the dimensions of network, the lift of pump and the height of water tower were determined, thereby the optimal design of branch network with water tower back of network was obtained, based on the linear programming model.

Key words: water tower back of network; branch network; optimal design; linear programming