

给水管网漏损检测周期的优化求解

耿为民, 刘遂庆, 信昆仑

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 城市供水企业迫切需要加强给水管网漏损管理, 减少漏损水量, 提高经济效益. 给水管网检测周期的优化求解以管网历史漏损统计数据为基础, 以漏损控制总费用最低为目标, 采用自回归滑动平均混合过程及叠合模型预测管网漏水量、漏损件数, 并求解管网经济漏水量, 在此基础上建立漏损检测周期的优化数学模型. 结果显示, 总漏水量因实施优化检测周期而减少, 漏损控制费用降低. 优化检测周期的确定受管线检测费用、漏损水量费用等模型参数影响.

关键词: 给水管网; 漏损管理; 优化检测周期; 管网漏损预测; 经济漏水量

中图分类号: TU 991.33

文献标识码: A

文章编号: 0253-374X(2004)04-0451-04

Optimal Solution to Inspection Interval for Water Leakage of Water Distribution Network

GENG Wei-min, LIU Sui-qing, XIN Kun-lun

(School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Water leakage management is required to minimize water loss and yields good economic returns for urban water industries. The solving procedure of optimal inspection interval was based on statistic data of water leakage, and its object was to minimize the total cost of water leakage control. Water loss and amount of water leakage were forecasted with autoregressive moving average (ARMA) model and supplementary model, and economic water loss was also estimated. Based on the above, the model to determine the optimal inspection interval for water leakage of water distribution network was established. The results indicated that water loss and the total cost of water leakage control decreased because of the optimal inspection interval. Its solution was effected by the parameters such as inspection cost, lost water cost etc. in the model.

Key words: water distribution network; water leakage management; optimal inspection interval; water leakage forecasting; economic water loss

据 2000 年城市供水统计年鉴, 全国 593 个城市的漏损率平均为 15.61%, 供水漏损总量为 43.74 亿 m^3 ^[1]. 假设城市供水平均成本为 0.9 元 $\cdot \text{m}^{-3}$, 每年我国城市供水行业因漏损而造成的经济损失高达 39.37 亿元. 因此, 加强管网漏损管理, 减少管网漏

损量是供水企业提高经济效益的重要途径之一.

管网漏点的出现主要与管网运行压力、管材、管径、敷设深度、路面交通量、地质条件、气温等因素有关. 通常管网的漏损为暗漏, 需要通过检测才能对漏点定位. 供水企业进行漏损检测, 如果周期过长, 漏

损检测将被延迟,月平均漏水量经济损失增加;周期过短,月平均检测费用将会过大.因此,需要求解管网漏损优化检测周期.

给水管网漏损优化检测周期求解过程如下:①根据历史漏损统计数据,建立管网漏损预测模型并进行预测;②求解“经济漏水量”;③建立漏损检测周期优化求解模型,并根据预测模型预测的漏损水量、漏损件数以及经济漏水量和各项经济参数值,求解优化检测周期.以下以我国南方某市管网为例求解给水管网优化漏损检测周期.

1 给水管网漏损预测

通过对历史漏损统计数据的分析,采用时间序列分析方法,建立给水管网漏水量和漏损件数预测模型并进行科学预测.

1.1 月漏损水量的预测

供水企业中漏水量通常按月份统计,1999~2002年漏水量统计数据见图1.月漏水统计量由自来水公司统计月报中的月供水总量和月售水总量之差并乘以58.2%得出(百分比数值来源于统计数据中管网漏水量占供水水差的百分比).该序列通过计算自相关系数,属于平稳时间序列.对于漏水量的预测,选用时间序列分析中自回归滑动平均混合过程(ARMA)^[2].

对于一个时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_t, \dots$, 如果知道它的平均数 μ , 那么这个时间序列的ARMA(p, q)

模型如下:

$$x_t - \mu = \varphi_1(x_{t-1} - \mu) + \varphi_2(x_{t-2} - \mu) + \dots + \varphi_p(x_{t-p} - \mu) + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (1)$$

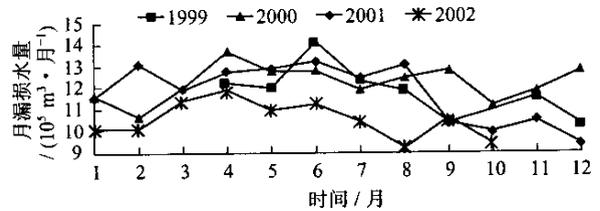


图 1 某市 1999~2002 年月漏水量变化曲线图

Fig.1 Variatim chart of monthly water loss during 1999~2002

式中: φ_i 为自回归系数; θ_i 为滑动平均系数; e_i 为预测误差; p, q 分别为自回归滑动平均混合模型的阶数. 模型参数估计步骤如下:①由自协方差 $C_{q-p+1}, \dots, C_{q+1}, \dots, C_{q+p}$ 估计自回归参数 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$; ②利用式(1)中得到的估计值 $\hat{\varphi}$ 得到导出序列为 $w'_t = w_t - \hat{\varphi}_1 w_{t-1} - \dots - \hat{\varphi}_p w_{t-p}$; ③最后用自协方差 C'_0, C'_1, \dots, C'_q 来迭代计算滑动平均参数 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 及残差方差 σ_a^2 的估计值.

对管网 4 年中月漏损量样本数据进行建模预测. ARMA 模型选用参数为: MA 阶数 $q=5$, AR 阶数 $p=11$. 部分预测数据见表 1. 据预测残差分析, 所建立自回归模型有效, 可以用于预测.

表 1 2002 年 1 至 10 月的月漏水量预测结果

Tab.1 Forecasting results of monthly water loss

月份	实际值/(10 ⁶ m ³ · 月 ⁻¹)	预测值/(10 ⁶ m ³ · 月 ⁻¹)	误差/(10 ⁶ m ³ · 月 ⁻¹)	相对误差/%
1	1.010 3	1.008 5	0.0018	0.18
2	1.010 7	1.070 9	0.0602	-5.96
3	1.135 8	1.083 8	0.0520	4.58
4	1.189 1	1.184 7	0.0044	0.37
5	1.093 5	1.133 7	0.0402	-3.68
6	1.122 2	1.120 4	0.0018	0.16
7	1.043 3	1.086 7	0.0434	-4.16
8	0.917 1	0.949 2	0.0321	-3.50
9	1.058 3	0.981 8	0.0765	7.23
10	0.933 1	0.889 3	0.0438	4.69

1.2 给水管网漏损件数的预测

月漏损件数的部分统计数据见图 2.

显然, 给水管网漏损件数时间序列是一个有趋势的时间序列, 因此采用叠合模型的建模方法^[3]. 计算式为

$$y_t = \sum_{j=1}^n A_j e^{k_j t} + x_t \quad (2)$$

式中: k_j, A_j 为实数; $\{y_t\}$ 为有趋势的时间序列; $\{x_t\}$ 为平稳随机序列. x_t 序列的预测采用 ARMA 模型, MA 阶数 $q=2$, AR 阶数 $p=3$. 趋势项采用最

小二乘法拟合,结果为 $y = 8.372 2e^{0.077 4x}$. 部分预测结果见表 2.

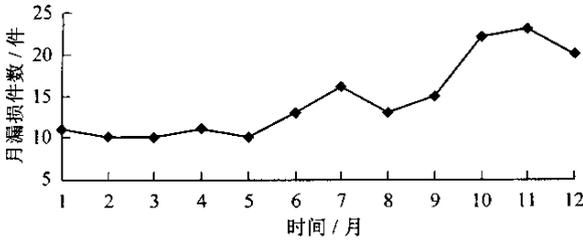


图 2 某市 2002 年月漏损件数变化图

Fig.2 Chart of amount of monthly water leakage in 2002

表 2 2002 年 1 至 10 月的月漏损件数预测结果

Tab.2 Forecasting results of amount of monthly water leakage

月份	实际值/件	预测值/件	误差/件	相对误差/%
1	11	11	0	0
2	10	10	0	0
3	10	9	1	10.00
4	11	12	-1	-9.09
5	10	12	-2	-20.00
6	13	12	1	7.69
7	16	17	-1	-6.25
8	13	15	-2	-15.38
9	15	14	1	6.67
10	22	21	1	4.55

2 给水管网经济漏水量

管网漏水量费用是由漏失水量造成的经济损失,随漏水程度的降低而减少,而漏损控制费用随着漏水程度的降低而增加.漏水量费用与漏损控制费用相加之和所构成的漏损总费用随着漏水程度变化的曲线呈凹形,在低谷处其漏损总费用最低,其所对应的漏水量称为“经济漏水量”^[4].将漏水量控制在经济漏水量是必须且合理的.

经济漏水量的数学模型如下:目标函数为 $(F_1 + F_c)_{\min}$. 其中, F_1 为漏水量费用函数, $\text{元} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$, 且 $F_1 = k_1 q$; F_c 为漏损控制费用函数^[5], $\text{元} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$, 且 $F_c = k_c e^{-r_c q}$. 式中: q 为管网漏水量, $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$; k_1, k_c, r_c 为系数.

将表 3 中数据曲线拟合得出: $F_c = 7 354.7 \times e^{-0.000 4q}$. 另外, 根据供水企业现行水价, $k_1 = 1.8 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$. 故目标函数为 $(7 354.7 e^{-0.000 4q} + 1.8 q)_{\min}$, $q \geq 0$. 利用 Matlab 优化工具箱中非线性规划函数 FMINUNC, 求得最优解 $q = 1.228 2 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$, 因此管网经济漏水量为 $1.291 1 \times 10^5$

$\text{m}^3 \cdot \text{月}^{-1}$.

表 3 某市 1998~2000 年漏水量和漏损控制费用支出表

Tab.3 Water loss and cost of water leakage control during 1998~2000

年份	漏水量/(10^5 m^3)	漏损控制费用支出/万元
1998	126.884 50	65.4
1999	157.789 22	52.7
2000	119.310 00	32.0

3 给水管网漏损优化检测周期的求解

根据管网资料、现有漏损检测、维修技术和设备状况以及漏损预测模型预测结果,建立管网漏损优化检测周期数学模型,并求解检测优化周期,达到经济漏水量的目标.

3.1 管网漏损优化检测周期数学模型

目标函数为 $(E_m + E_l)_{\min}$. 式中: E_m 为检测、维修费用, $\text{元} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{月}^{-1}$; E_l 为漏损水量费用, $\text{元} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{月}^{-1}$. T 为管网漏损优化检测周期(单位为月), 则月平均漏损控制费用(漏损检测和管道修复) E_m 为

$$E_m = \frac{c_d L + c_r \sum_{i=1}^x N(i)}{TL} \quad (3)$$

式中: c_d 为单位管长的漏损检测费用; L 为管道总长度; c_r 为单件漏损的修复费用; $N(i)$ 为预测第 i 月漏损修复件数. 月平均漏损水量费用 E_l 为

$$E_l = \frac{c_1 \sum_{i=1}^x Q(i)}{TL} \quad (4)$$

式中: c_1 为单位体损漏积水量费用; $Q(i)$ 为预测第 i 月漏损水量. 边界约束条件按检测周期不大于 5 年设置, 可写为: $1 \leq T \leq 60$.

假定管网长度随着时间的增长值为一常数 $\Delta L = 1.75\%$; $c_d = 23 000 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-1}$ (注: 不同的漏损检测方式组合得出的系数值不同); $L = 1 261.45 \text{ km}$; $c_r = 3 000 \text{ 元} \cdot \text{个}^{-1}$ (漏点修复费用按平均值计算); $c_1 = 1.80 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$; 管网查漏概率 P 为 1.0; 预测水量值中小于经济漏水量者, 按经济漏水量计. 将参数值输入, 计算结果见图 3 和 4. 以此得出管网漏损优化检测周期 T 为 10 个月.

固定检测周期和优化检测周期的各种费用比较见表 4 (假定实施期限为 4 年). 给水管网漏损管理实施优化检测周期跟固定检测周期相比, 月管网漏

点的个数并不会太大的改变,但总漏水量却因优化的检测周期而减少,总控制费用降低.

表 4 固定检测周期和优化检测周期费用比较表

Tab.4 Comparison of cost of constant inspection interval and optimal inspection interval

费用种类	固定检测周期 (24个月)	优化检测周期 (10个月)	费用节省/%
E_m /万元	6 085	14 272	-134.53
E_l /万元	38 470	25 488	33.75
$(E_m + E_l)$ /万元	445 580	397 570	10.77

3.2 影响因素分析

① 管线检测费用对优化检测周期的影响见图 5,优化检测周期随漏损检测费用的增加而延长;② 单位体积漏损水量费用对优化检测周期的影响见图 6,优化检测周期随漏水量费用的增加而缩短;③ 优化检测周期随漏点修复费用的增加而延长,但变化不太明显.供水企业技术管理工作中,管网管线漏损探测技术可以逐步得到提高和改进.从图 5 中可以看出,漏损探测费用的增加导致了优化检测周期的延长,因此,探测技术的改进将有利于管网漏损程度的降低.

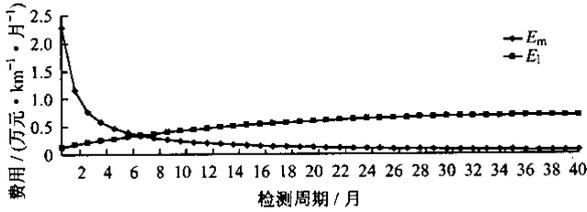


图 3 检测、维修费用 E_m 和漏损水量费用 E_l 随检测周期变化曲线

Fig.3 Curves of inspection and repair cost E_m and lost water cost E_l with optimal inspection interval

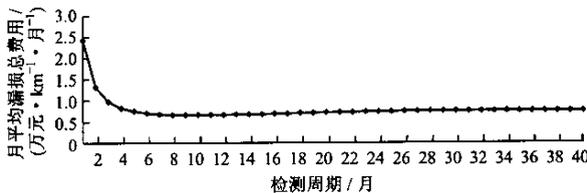


图 4 漏损总费用随最优检测周期变化曲线

Fig.4 Curve of total cost of water leakage control with optimal inspection interval

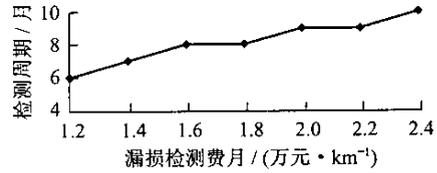


图 5 优化检测周期随管线漏损检测费用的变化

Fig.5 Variation of optimum inspection interval with inspection cost

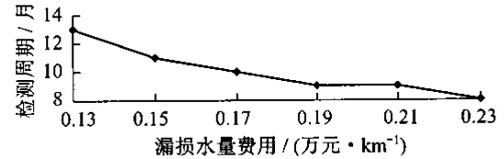


图 6 优化检测周期随漏损水量费用的变化

Fig.6 Variation of optimum inspection interval with cost of lost water

4 结语

给水管网漏损管理在供水企业的管理工作中变得越来越重要,应根据具体情况制定漏损控制计划,降低管网漏水量,实施经济优化检测周期.同时,管网优化漏损检测周期的实施是一项复杂的过程,需要建立在详细掌握管网基础资料和历史漏损统计数据的基础上.

管网漏损优化检测周期以及经济漏水量的求解将有助于供水企业了解漏损管理现状,制定漏损控制计划,加强管网漏损管理,减少漏损水量,降低漏损控制总费用.

参考文献:

[1] 中国城镇供水协会. 2000 年城市供水统计年鉴[M][s.l.]: [s.n.]2001.

[2] Box G E P, Jenkins G M, Reinsel G C. 时间序列分析预测与控制[M]. 顾岚主译. 北京: 中国统计出版社, 1997. 87-96.

[3] 项静恬, 杜今观, 史久恩. 动态数据处理——时间序列分析[M]. 北京: 气象出版社, 1986. 196-199.

[4] Cabrera E, Garcia-Serra J. Drought management planning in water supply system[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1997. 2-3.

[5] Walski T M. Replacement rules for water mains[J]. J AWWA, 1987, 71(5): 248-251.