

# 城市供水管网漏损时间预测模型

王旭, 王颖, 田伟博

(重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 影响城市供水管网漏损的因素很多,通过层次分析法确定主要的漏损原因,在此基础上,应用多元线性回归模型对供水管道正式使用后初次漏损时间进行了预测,然后运用二次指数平滑模型对随后几年的漏损时间进行了预测,由此建立了完善的供水管网漏损时间预测模型。

**关键词:** 供水管网; 层次分析法; 多元线性回归模型; 二次指数平滑模型

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2012)04-0151-03

## Time-prediction model for leakage in urban water supply network

WANG Xu, WANG Ying, TIAN Weibo

(Faculty of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** There are a good deal of factors that affect the leakage in town water distribution pipeline. According to analytic hierarchy process, the paper identified primary reasons for leakage. Based on this conclusion, multiple linear regression models were used for prediction of the initial leakage time after the supply net came into use. Then, double exponential smoothing model was utilized to forecast leakage time in the following years. Thus perfect time-prediction models for water supply network leakage were set up.

**Key words:** water supply network; analytic hierarchy process; multiple linear regression model; double exponential smoothing model

2010年《中国城乡建设统计年鉴》显示,2009年全国城市供水漏损水量60亿 $m^3$ ,大陆地区有十个省级行政区的城市供水漏损率超过了13%<sup>[1]</sup>。管网漏损不仅浪费了稀缺的水资源,也给供水企业造成了巨额损失。因此,降低管道漏损量,控制管网漏损率蕴藏着极大的经济、环境和社会效益。对管网漏损的控制不能仅仅停留在原始的被动检漏层面上,应该主动采取有效措施对管网的漏损进行预测。建立供水管网漏损的时间预测模型,可以改变供水企业被动式的漏损管理模式,为管道漏损做到早预防、早解决提供新的思路<sup>[2]</sup>。

## 1 基于AHP的给水管网漏损影响因素评价模型<sup>[3-4]</sup>

城市供水管网在使用一定的时间后,往往会发生漏损。影响管网漏损的因素很多,像管材、管径、埋深、压力、管龄(管道使用时间)和土质情况等,究竟哪些因素在管网漏损中发挥重要作用,美国著名的运筹学家T. L. Satty提出的层次分析法解决了这一难题。

### 1.1 层次分析法(AHP)的基本思想和原理

层次分析法是指将决策问题的有关元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性分析和定量分析的一种决策方法。该方法的特点,是在对复杂决策问题的本质、影响因素以及内在关系等进行深入分析之后,构建一个层次结构模型,然后利用较少的定量信息,把决策的思维过程数学化,从而为求解多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题,提供一种简便的决策方法。

### 1.2 层次分析法的基本步骤

应用层次分析法分析问题,首先要把问题层次化,根据各因素间的相互关联影响以及隶属关系将其按不同层次聚集组合,形成一个多层次的层次结构模型。然后把系统分析归结为底层,相对于高层的相对重要性权值的确定或相对优劣次序的排序问题。在排序计算中,每一层次的因素相对于上一层某一因素的单排序问题又可简化成以系列成对因素的判断比较。为了将比较判断定量化,层次分析法引入了1-9标度法,并写成判断矩阵的形式。形成判断矩阵后,即可通过判断矩阵的最大特征值

及其对应的特征向量,计算出某一层对于上一层某一个元素的相对重要性权值。

### 1.3 基于 AHP 的评价模型的建立

根据对影响管网漏损的各因素进行层次分析,建立如图 1 模型:

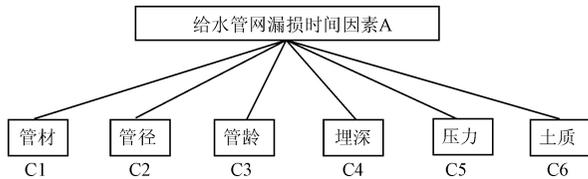


图 1 层次分析结构模型

### 1.4 判断矩阵的构建及求解

通过专家咨询和供水行业的问卷调查,确定各影响因素的相对重要程度。按 1-9 标度法列出各因子的判断矩阵,并进行求解。计算结果如表 1 所示。

表 1 判断矩阵的计算结果

A	C1	C2	C3	C4	C5	C6	W
C1	1	1/3	3	2	1/2	4	0.160
C2	3	1	5	4	2	6	0.381
C3	1/3	1/5	1	1/2	1/4	2	0.064
C4	1/2	1/4	2	1	1/3	3	0.101
C5	2	1/2	4	3	1	5	0.252
C6	1/4	1/6	1/2	1/3	1/5	1	0.042

### 1.5 判断矩阵的一致性检验

$$\text{经计算得: } \lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} = 6.124$$

式中:  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵 A 的最大特征根;  $W_i$  为影响因素  $C_i$  相对于漏损时间因素 A 重要性的权值。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.0248$$

查表得:  $RI = 1.24$ ,

$$\text{则 } CR = \frac{CI}{RI} = 0.02$$

式中:  $CR$  为一致性比例;  $CI$  为一致性指标;  $RI$  为平均随机一致性指标。

一般当  $CR < 0.1$  时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,当  $CR > 0.1$  时,认为判断矩阵不符合一致性要求,需要对判断矩阵进行修正。本例中  $CR = 0.02 < 0.1$ ,此判断矩阵具有满意的一致性。由表 1 可以看出,C 层各元素对应 A 层元素的排序权值分别为 0.160,0.381,0.064,0.101,0.252,0.042,排序权值即为相对重要性。所以 C 层各元素对于 A 层的相对重要性由高到低排序为  $C2 > C5 > C1 > C4 > C3 > C6$ 。

## 2 多元线性回归模型<sup>[5]</sup>

根据管网漏损原因层次分析结果,把权重较大也即影响程度较大的管径  $D$ 、压力  $P$  和埋深  $H$  三个因素作为自变量,管龄和土质情况作为常量,管道投入使用后首次产生漏损的时间  $T$  作为因变量建立多元线性回归模型:

$$T = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 P + \beta_3 H \quad (1)$$

式中:  $D$  为管径,mm;  $P$  为管道运行压力,Pa;  $H$  为管道埋深,m;  $T$  为管道首次产生漏损时间;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  为回归系数。

由于管材对管网漏损的影响程度相对较大,而其不是数值,不能够直接带入模型。因此在建立模型时,应该针对不同的管材进行。对某管网球墨铸铁管  $n$  年的漏损事件记录进行采集并带入(1)式,得:

$$T_i = \beta_0 + \beta_1 D_i + \beta_2 P_i + \beta_3 H_i \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

将式(2)用矩阵表示并采用多元线性回归方法,可确定式(1)中变量系数  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ ,从而建立该种管材管网的漏损时间预测模型。

## 3 二次指数平滑模型<sup>[6]</sup>

### 3.1 指数平滑法概述

指数平滑法就是采取渐消记忆的方式,利用逐步衰减的不等权平均办法进行数据处理的一种预测方法。其显著特点一是利用了全部历史统计数据,二是遵循“重近轻远”的原则,加权平均,修匀数据。历史数据的指数平滑值介于历史数据最大值与最小值之间,利用它进行数据信息的处理,能起到抵御或减弱异常数据的影响,致使历史统计数据所包含历史规律性的信息能显著体现出来,使预测模型能排除异常干扰,更精确模拟预测对象历史的规律。

### 3.2 线性指数平滑法

当时间序列随着时间的发展不断有增加或减少的趋势时,采用线性指数平滑法是一种有效的预测方法。用这种预测方法预测时,它把平均每一期的增量考虑进去,不断地作趋势性的调整。

设时间序列为:

$$x = \{x_t \mid t = 1, 2, \dots, t, \dots, n\} \quad (3)$$

$t$  时期的单指数平滑值  $s_t^{(1)}$  和双指数平滑值  $s_t^{(2)}$  分别为:

$$s_t^{(1)} = ax_t + (1 - a)s_{t-1}^{(1)} \quad (4)$$

$$s_t^{(2)} = as_t^{(1)} + (1 - a)s_{t-1}^{(2)} \quad (5)$$

则得到  $t$  时期的水平值  $A_t$  和增量  $B_t$  分别为:

$$A_t = 2s_t^{(1)} - s_t^{(2)} \quad (6)$$

$$B_t = \frac{1}{1-a}(s_t^{(1)} - s_t^{(2)}) \quad (7)$$

据此可以得到  $t + m$  时期的预测值  $F_{t+m}$  为:

$$F_{t+m} = A_t + mB_t \quad (8)$$

线性指数平滑法的初始值依赖于前两个时期的观测值  $x_1$  和  $x_2$ , 并假设:

$$s_t^{(1)} = s_t^{(2)} = x_t$$

### 3.3 二次指数平滑法

有时时间序列虽然有增加或减少的趋势,但不一定是线性的,可能按二次曲线的形状增加或减少。对于这种非平稳时间序列,采用二次曲线指数平滑法可能要比线性指数平滑法更为有效。它的特点是不但考虑了线性增长的因素,而且也考虑了二次抛物线的增长因素。

假设  $t$  时期的单指数平滑值  $s_t^{(1)}$ 、双指数平滑值  $s_t^{(2)}$  和三指数平滑值  $s_t^{(3)}$  分别为:

$$s_t^{(1)} = ax_t + (1-a)s_{t-1}^{(1)} \quad (9)$$

$$s_t^{(2)} = as_t^{(1)} + (1-a)s_{t-1}^{(2)} \quad (10)$$

$$s_t^{(3)} = as_t^{(2)} + (1-a)s_{t-1}^{(3)} \quad (11)$$

则得到  $t$  时期的水平值  $A_t$ 、线性增量  $B_t$  和抛物

线增量  $C_t$  分别为:

$$A_t = 3s_t^{(1)} - 3s_t^{(2)} + 3s_t^{(3)} \quad (12)$$

$$B_t = \frac{a}{2(1-a)}[(6-5a)s_t^{(1)} - (10-8a)s_t^{(2)} + (4-3a)s_t^{(3)}] \quad (13)$$

$$C_t = \frac{a^2}{(1-a)^2}(s_t^{(1)} - 2s_t^{(2)} + s_t^{(3)}) \quad (14)$$

据此可以得到  $t + m$  时期的预测值  $F_{t+m}$  为:

$$F_{t+m} = A_t + mB_t + \frac{1}{2}C_tm^2 \quad (15)$$

二次曲线指数平滑法的初始值依赖于前两个时期的观测值  $x_1$  和  $x_2$ , 并假设:

$$s_t^{(1)} = s_t^{(2)} = s_t^{(3)} = x_t$$

### 3.4 加权系数 a 的确定

根据最小二乘法原则,通过在计算机上求解,可得出给水管网漏损时间的二次指数平滑模型平滑常数的最优值  $a = 0.298$ ,此时它所对应的均方差最小。

## 4 应用实例

以西南某市 2005 - 2008 年的供水管网漏损数据为例,因为该段时间漏损数据较为丰富,包括漏损时间、管径、敷设年代、管道压力、管材、埋设深度等。表 2 列举了某管段的基本属性和漏损时间。

表 2 某管段的基本属性和漏损时间

管材	管径	埋深 /m	压力 /kPa	投入使用时间	初次漏水时间	第二次漏水时间	第三次漏水时间	第四次漏水时间
球墨铸铁	DN500	1.5	16.8	1988-06-09	2005-05-02	2006-02-11	2007-01-10	2008-02-10

### 4.1 多元线性回归模型的应用<sup>[5]</sup>

结合该市供水部门 SCADA 系统采集到的管道信息,以球墨铸铁管的漏损资料为依据,借助 MATLAB 平台对式(2)改变的矩阵进行编程,建立该种管材的漏损预测模型:

$$T = 9468.26 - 0.058D - 0.1004P - 1025.3H \quad (16)$$

把该管段的基本属性带入式(16),可得管道初次漏损的时间间隔  $T$  为 6 244 d。

实际安全使用时间为  $T' = 2005$  年 5 月 28 日 -

1988 年 6 月 9 日 = 6198(d) 预测误差为:

$$\frac{(6244 - 6198)}{6244} \times 100\% = 0.74\%$$

### 4.2 二次指数平滑模型的应用<sup>[6]</sup>

参照 3.3 节介绍的计算方法和表 2 中管段漏损的时间数据,得出每次预测的结果及误差如表 3。利用式(15)可对 2009 年和 2010 年的管网漏损时间进行预测,经计算,2009 年和 2010 年的时间间隔与实际值的相对误差为 3.8%、2.9%,预测精度较高。

表 3 二次指数平滑模型预测供水管网漏损时间

%

年度	时间间隔	单指数平滑值	双指数平滑值	三指数平滑值	水平值	线性增量	抛物线增量	预测值	误差	相对误差
2006	259	259	259	259	259	0	0			
2007	332	281	266	262	307	11.7	1.98	320	-12	3.6
2008	396	315	281	268	370	24.0	3.78	426	30	7.5

表6 各工况左、右坝肩不同高程处和坝基抗滑稳定安全系数  $K$ 

工况		高程							坝基 1078
		1146	1141.5	1130	1119	1108	1097	1086	
工况1 (正常+温降)	左坝肩	3.51	3.69	3.53	3.40	4.20	6.49	8.84	26.78
	右坝肩	3.39	3.64	3.72	4.83	5.16	7.48	9.17	
工况2 (设计+温升)	左坝肩	4.45	4.51	3.71	3.30	4.10	6.21	8.96	26.97
	右坝肩	3.54	3.64	3.63	4.77	5.14	6.43	9.17	
工况3 (死水位+温升)	左坝肩	4.55	4.72	3.72	3.77	4.96	7.76	10.52	30.55
	右坝肩	3.07	3.35	3.61	4.82	5.96	8.61	12.03	
工况4 (校核+温升)	左坝肩	4.47	4.50	3.39	3.26	4.10	6.15	8.83	26.49
	右坝肩	3.54	3.62	3.63	4.75	5.74	7.60	9.38	
工况5 (正常+温降+地震)	左坝肩	4.44	4.69	3.53	3.40	4.17	6.12	8.68	24.27
	右坝肩	3.34	3.58	3.68	4.75	5.55	7.25	8.77	

## 6 结论与建议

拱坝应力分析的拱梁分载法和有限元计算表明:拱坝各部位在各工况荷载组合情况下,最大主拉应力和最大主压应力均满足相应工况的应力控制标准。抗滑稳定计算结果表明:左、右坝肩抗滑稳定和坝基抗滑稳定都满足参考文献[9]的要求。

建议坝体封拱灌浆分三个区域:坝体高程1 119.0 m 以下为一区,封拱温度为 6.5℃;坝体高程1 119.0 ~1 130.0 m 为二区,封拱温度为 12℃;坝体高程1 130.0 m 以上为三区封拱温度为 14.3℃。封拱灌浆时间应安排在低温季节。

### 参考文献:

- [1] SL252-2000. 水利水电工程等级划分及洪水标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [2] 山西省灵石县石膏山水库工程可选择性研究报告[R].

山西省水利水电勘测设计研究院,2005.

- [3] GB50288-99. 灌溉与排水工程规范[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [4] 山西省灵石县石膏山水库工程初步设计阶段地质勘察报告[R]. 山西省水利水电勘测设计研究院,2006.
- [5] GB18306-2001. 中国地震动参数区划图[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [6] 朱伯芳,高季章,陈祖煜. 拱坝设计与研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002. 12.
- [7] 李瓚,陈兴华,郑建波,等. 混凝土拱坝设计[M]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [8] 李守义,陈尧隆. 拱坝初参数分析法[J]. 水利学报,1996,27(3):30-35.
- [9] SL282-2003. 混凝土拱坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [10] SL203-97. 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,1997.

(上接第153页)

## 5 结语

本文综合运用层次分析法和多元线性回归模型预测管网的安全使用时间,用二次指数平滑模型预测管网的漏损时间,由此建立了管网漏损的时间预测模型。多元线性回归模型结构简单,可用于单个管段,但是预测精度较差;二次指数平滑模型预测精度较高,但对单个管段缺乏指导意义。将二者结合预测管网的漏损时间能取长补短,使预测更加准确。

### 参考文献:

- [1] 城镇供水存在漏损谁来给管网把门[EB/OL][2011-06-

01]. 中国供应商, [http://cn.china.cn/article/d994575\\_5ca821\\_d2098\\_7460.html](http://cn.china.cn/article/d994575_5ca821_d2098_7460.html).

- [2] 闫丽芳. 给水管网漏损分析及预测[D]. 安徽:合肥工业大学,2009. 4.
- [3] 杜栋,庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [4] 苏文龙. 基于 AHP 的给水管网漏损影响因素分析[J]. 山西建筑,2010,36(30):204-205.
- [5] 张宏伟,牛志广,陈超,等. 供水管道漏损预测模型研究[J]. 中国给水排水,2001,17(6):7-9.
- [6] 邱云龙. 给水管网漏损预测的研究与应用[D]. 重庆:重庆大学,2006.