

# 供水管网漏损影响因子相关性特征模拟与动态分级控制

刘晓然<sup>1</sup>, 王 威<sup>2</sup>, 杨 淳<sup>1</sup>, 甄纪亮<sup>1</sup>

(1. 北京建筑大学 理学院, 北京 102616; 2. 北京工业大学 建筑与城市规划学院, 北京 100124)

**摘要:** 针对供水管道漏损问题, 基于以往研究, 首先通过自组织网络(SOM)对样本漏损因素间的关联特征进行了仿真分析; 其次应用动态分级方法(DT)对管网漏损分类分级控制进行了研究, 得到了不同分类数下的管道漏损分级; 最终将动态分级方法与系统聚类分析方法所得计算结果进行对比分析, 结果表明动态分级方法在城市供水管道漏损控制方面研究的可行性, 为城市供水管道漏损控制提供了新的方法与思路。

**关键词:** 供水管道; 漏损控制; 动态分级方法; 自组织网络; 仿真模拟

中图分类号: TU991; X913.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)03-0440-07

## Simulation on correlation properties of leakage factors and dynamic hierarchical control in water supply network

LIU Xiaoran<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, YANG Zhun<sup>1</sup>, ZHEN Jiliang<sup>1</sup>

(1. School of science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China;

2. College of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** According to the leakage problem of water supply pipeline, based on previous research, the link between the influence factors and pipeline leakage were analyzed, and the leakage factors of samples were simulated through self-organization network (SOM); Dynamic classification method (DT) was applied to study the leakage control of water supply network, and different class number of the pipeline leakage were obtained, the results calculated by the dynamic classification were compared with system clustering analysis method, the conclusion are basically identical. The paper shows that the feasibility of dynamic classification method in the aspect of leakage control of water supply pipeline with the pipeline leakage classification more reasonable, provided a new method for leakage control of water supply pipeline.

**Key words:** water supply pipe; leakage control; dynamic classification method; self-organizing networks; simulation

供水管网是城市生命线工程的重要组成部分。大量震害经验表明, 供水管网在地震中极易遭受破坏, 造成相应的供水功能受到影响, 并有可能由之引发各种地震次生灾害。如在汶川地震中, 都江堰市供水管网约有 60% 受损, 管网渗漏点达 2 000 多处, 爆管、漏损等故障频发, 造成严重的供水困难<sup>[1]</sup>。日本阪神大地震次生火灾严重, 由于供水系统瘫痪, 只能看着大火蔓延, 造成了大量人员伤亡<sup>[2]</sup>。2015 年国发〔2015〕17 号即“水十条”明确提出到 2020 年, 供水管网漏损率控制在 10% 以内<sup>[3]</sup>。因此, 研究城市供水管网的漏损控制, 对提高供水管网的故障预警、诊断检修和抗震能力, 减轻事故危害和保障其震时运行状态具有重要的

意义。

城市供水管道漏损控制研究目前主要集中于漏损监测及漏损预测模型研究。国内外学者对供水管道的漏损控制都进行了不同程度的探索。其中, Giustolisi 等为了充分考虑各因素对管道漏损的影响, 集合传统水力模型, 水压需求和不同级别管道的漏损, 建立了一个稳态的管道漏损控制模型<sup>[4]</sup>。Gao 为了实现网络泄漏的有效控制, 建立了嵌入压力驱动的节点流量水力模型的泄漏控制模型<sup>[5]</sup>。Li 通过实验提出了新建模型的泄露系数<sup>[6]</sup>。Mohammad 等通过优化减压值, 建立了压力管理优化模型, 并以伊朗某一区域为例进行了验证<sup>[7]</sup>。Gupta 等提出了一种考虑管道长度和节点要求的泄

收稿日期: 2018-02-14 修改稿日期: 2019-05-05

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8194058); 北京市优秀人才培养资助基金项目(2016000020124G036); 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助项目(X18120); 北京市教育委员会科技计划一般基金项目(KM201810016018)

第一作者: 刘晓然(1988—), 女, 博士, 讲师, 主要从事城市与工程安全减灾、灾害仿真及模拟等方面的研究。E-mail: xiaoran1227@126.com

通信作者: 甄纪亮(1988—), 男, 讲师, 主要从事工程系统优化及不确定性分析研究。E-mail: zhenjiliang@bucea.edu.cn

露控制方法<sup>[8]</sup>.目前国内有关供水管道的漏损预测模型研究的主要理论有多元线性回归分析理论<sup>[9-10]</sup>、灰色模型<sup>[11]</sup>、指数平滑法<sup>[12]</sup>、人工神经网络<sup>[13]</sup>、支持向量机<sup>[14]</sup>、集对分析<sup>[15]</sup>等等,大多数方法,针对供水管网现状,需要大量的相关数据建立预测模型,对供水管网的漏损时间及节点进行预测.城市供水管网系统中的节点、管段数量众多,由于供水管道漏损受多方面因子影响,供水管网的漏损控制属于多指标优化分类问题,对供水管网的漏损监测应该实现分类控制.因此,本文基于对管道漏损因子的分析之上,利用动态分级方法实现供水管网中漏损控制点的优化布局.

## 1 供水管道漏损影响因子关联特征分析

### 1.1 指标数据的处理

本研究将采用自组织特征映射(self-organizing feature map)对供水管道漏损进行探索性数据分析,自组织特征映射是一种自组织神经网络,采用竞争学习机制实现对输入样本的自组织聚类,特征相似的点在聚类空间中也相邻.其以可视化方式检视各输入变量在样本空间的分布,以发现各因素间的相关性.

自组织特征映射的基本结构由输入层和输出层,两层之间相互连接,在本研究中,输入层表示聚类管道样本的特征空间,输出层表示管道聚类空间.选取管材事故率 $X_1$ 、埋深 $X_2$ 、水压 $X_3$ 、土质 $X_4$ 、接口 $X_5$ 、荷载 $X_6$ 、防腐程度 $X_7$ 这7个指标作为评价供水管网漏损控制分类指标,选取相应的参数或进行量化处理,这7个指标具有不同的单位和量纲,所以首先对指标数据进行标准化处理.

### 1.2 基于SOM的供水管网漏损因子关联特征模型

运用Matlab2014a的神经网络工具箱建立SOM网络模型.将20个管段的7个参数值标准化后标值导入SOM网络中,作为网络的输入模式 $p^k$ ( $p_1^k, p_2^k, \dots, p_7^k$ ),因此输入层的神经元个数是7.神经元数对应于聚类模式数.通过设置较多的输出神经元,可以较好地映射并检视样本特征的拓扑结构,但如果神经元数多于模式类数,可能出现类别分得过细或是出现“死神经元”.由于分类样本数仅为20个,所以采用了竞争层的结构为 $8 \times 8$ ,即8行8列64个神经元.设置网络训练的迭代最

大次数为300次,初始的学习效率为0.5,其它参数选取默认值.

## 2 城市供水管道漏损控制的动态分级模型

动态分级法(DT)是一种定量的多指标数值的“聚类分析”方法<sup>[16]</sup>.将供水管网漏损控制的影响因素作为样本的属性,应用动态分级方法反复迭代可得到满足设定条件的分类结果<sup>[17]</sup>,具体的计算步骤如下:

(1)收集管段样本漏损控制影响因子数据并建立指标特征矩阵 $X = (x_{ij})_{n \times m}$ .求样本出每个属性的平均值和标准差,结合信息熵属性权重对样本数据进行标准化处理.

$$x'_{ik} = \omega \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{S_k} \quad (1)$$

$$S_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2} \quad (2)$$

式中: $\bar{x}_k$ 为第 $k$ 个属性的平均值; $S_k$ 为第 $k$ 个属性的标准差; $n$ 为样本个数; $\omega$ 为属性权重; $x_{ik}$ 为第 $i$ 个样本的第 $k$ 个属性的原始数据; $x'_{ik}$ 为标准化处理后的第 $i$ 个样本的第 $k$ 属性值.

(2)确定管道漏损样本的初始分类.当划分为 $K$ 类时,用下式求得:

$$Nc(i) = IFLEX \left\{ \frac{(K-1)[A_{\max} - s(i)]}{A_{\max} - A_{\min}} \right\} + 1 \quad (3)$$

式中: $IFLEX$ 为取整函数; $Nc(i)$ 为第 $i$ 个样本所属的分类; $s(i) = \sum_{k=1}^m x'_{ik}$ ;  $A_{\max}$ 和 $A_{\min}$ 为各样本 $s$ 值的最大值和最小值.

(3)计算各个类别的重心,并计算样本到各类重心的距离,根据距离大小更新样本分类.

$$C_{r,k} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta \cdot x'_{ik}}{\sum_{i=1}^n \delta} \quad (4)$$

$$\delta = \begin{cases} 1, & i \in \{1, 2, \dots, n\} : Nc(i) = r \\ 0, & i \in \{1, 2, \dots, n\} : Nc(i) \neq r \end{cases} \quad (5)$$

式中, $C_{r,k}$ 为第 $r$ 类样本的第 $k$ 个属性的重心.

$$d_{i,r} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x'_{ik} - C_{r,k})^2} \quad (6)$$

$$d_{i,p} = \min(d_{i,1}, d_{i,2}, \dots, d_{i,r}) \quad (7)$$

$$Nc'(i) = p, p \in \{1, 2, \dots, r\} \quad (8)$$

式中:  $d_{i,r}$  为第  $i$  个样本到第  $r$  类的样本集重心的距离;  $Nc'(i)$  为第  $i$  个样本所属的新类;  $m$  属性项数目.

(4)重复步骤(2)、(3), 比较前后 2 次迭代得到的重心, 输出最终分类结果.

(5)分类数的确定. 通过绘制  $DS$  函数值随着分类数的变化情况, 选择适当的分类数. 在  $DT$  法中,  $DS$  具体计算公式如下:

$$DS = \sum_{i=1}^n d_{i,r}^2 \quad (9)$$

依据 Matlab 对动态分级原理进行编程, 设置

不同的参数, 反复迭代计算, 可得到分类函数值  $DS$ , 最终确定分类结果.

## 4 工程实例

### 4.1 供水管网漏损因子关联特征分析

基于上述漏损因素分析, 选取可量化因子管材事故率、埋深、水压、土质、接口、荷载、防腐程度作为评价分类因子. 以某城市局部 20 个管段(P1~P20)管道作为样本, 参考文献[16]对各个管道的漏损因子进行量化, 量化结果见表 1. 其地形西北高、东南低, 管网布置见图 1.

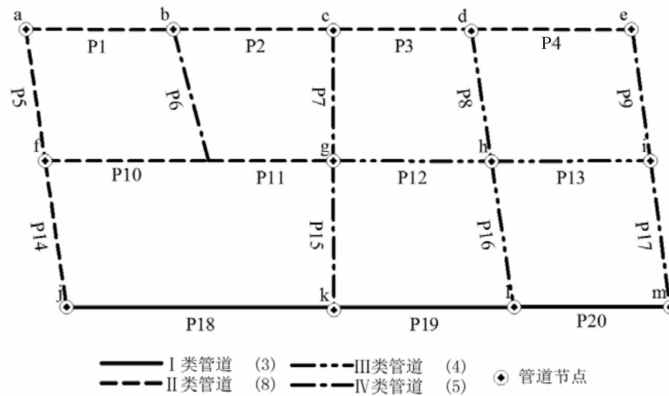


图 1 某供水管网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a water supply pipe network

表 1 各管段的量化指标

Tab. 1 Quantitative indicators of each pipe segment

管段	管材/次·km <sup>-1</sup>	接口	埋深/m	荷载	土质	水压/kPa	防腐
1	0.55	8	1.72	5	5.5	331.73	4
2	0.55	8	1.7	5	5	314.58	4
3	0.55	8	1.7	5	5	296.94	4
4	0.55	8	1.73	5	5	278.52	4
5	0.55	8	1.71	5	5.5	331.93	4
6	0.14	7	1.62	6	5	316.15	3
7	0.14	7	1.63	4	5	316.15	3
8	0.14	7	1.64	4	7	295.96	3
9	0.14	7	1.64	4	5	261.37	3
10	0.55	8	1.7	5	5.5	316.34	4
11	0.55	8	1.69	5	5	307.92	4
12	0.55	8	1.73	5	7	315.17	3
13	0.14	7	1.72	5	7	278.81	3
14	0.55	8	1.71	5	5.5	314.87	4
15	0.14	7	1.73	4	5	299.29	3
16	0.14	7	1.7	4	7	276.85	3
17	0.14	7	1.67	4	5	244.41	3
18	0.55	8	2	7	5	289.2	4
19	0.55	8	2.04	7	5	260.97	4
20	0.55	8	2.08	7	5	242.45	4

在 MATLAB 中实现了自组织特征映射模型,应用自组织网络对以上 20 个样本中的 7 个变量值构成的矩阵输入模型,设置步长为 20、50、100、150、200、250、300 的 7 次训练.训练收敛后,各变量分别对应于输出层的一个最佳匹配神经元,特征相似的样本对应的输出神经元相邻,反之亦然.成分平面图是输出层神经元某个维度取值的可视化,由于输入样本被一一映射到输出层神经元,训练收敛后输出各因子变量的成分平面图,如图 2 所示.由图可以分析出各因素之间的关联如下:

(1)管材种类、接口形式、管道防腐程度总体上呈正相关.即管材材质的优劣对管道接口、管道的腐蚀程度都有决定性影响<sup>[18]</sup>.当管材设置较好时,对应的接口设置较好,漏水程度就会降低,

对土质环境的破坏就会减弱,进而腐蚀程度就会降低,反之亦然.

(2)管道埋深和土压荷载呈弱正相关.土压荷载分为土静荷载和地上动荷载.如若管道埋深过浅,则地上动荷载作用明显,对管道产生扰动破坏.埋深较深的话,土重力静荷载则起主要作用,埋深越大,荷载值越大.对于所研究样本,埋深较大,主要受土自身重力荷载影响.

(3)供水水压和土质情况呈弱正相关.土壤的性质是影响管道漏损的重要因素<sup>[19]</sup>,主要体现在对管道的腐蚀性、沉降性和冻胀性的影响,会进而影响到供水水压的大小,供水水压受地形状况、系统供水方式等因素的影响,当运行压力过高时爆管的几率就会增加.

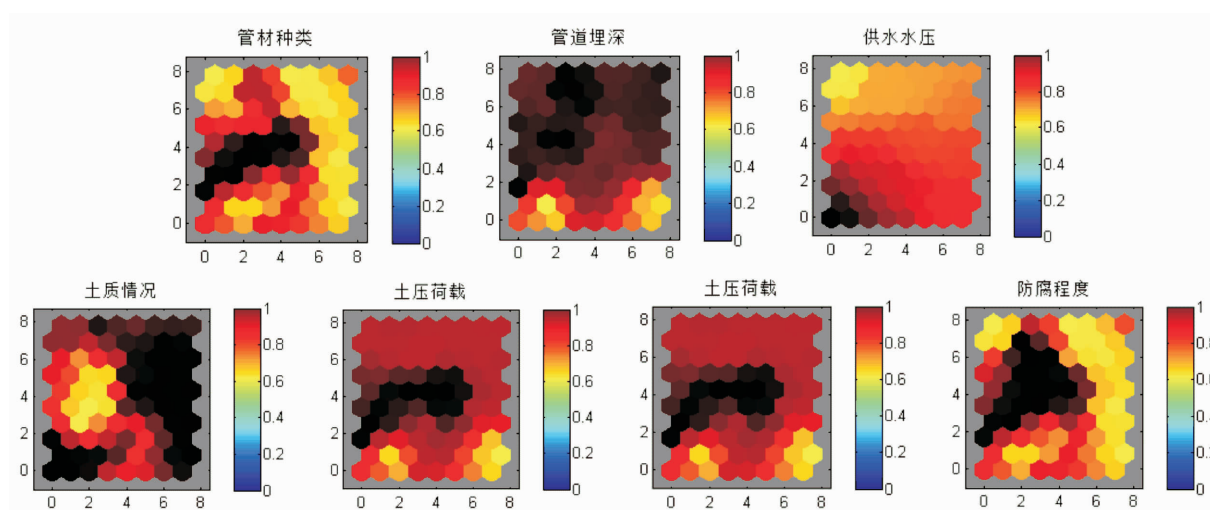


图 2 基于 SOM 管道漏损因子仿真平面图

Fig. 2 Simulation plan of pipeline leakage factor based on SOM

虽然 SOM 模型可以较好的反映出管道漏损各因子间的关联,也可以给出管道漏损分类.但基于 SOM 的分类数取决于依据经验所设定的神经元数目及训练步长,结果具有可变动性.因此,基于 SOM 能够较好反映影响因素关联性的优势,本文只采用其进行因素平面图的分析.

### 3.2 供水管网漏损动态分级优化

首先,依据表 1 中的数据,利用信息熵理论得到各属性的权重  $w=[0.133\ 8, 0.133\ 8, 0.127\ 0, 0.286\ 8, 0.116\ 8, 0.045\ 5, 0.156\ 4]$ ;设置输入样本总个数  $n$  为 20,属性总个数  $m$  为 7,误差限值  $e$  为 0.001,最大分类限值  $Ka$  为 20.按照上述步骤计算得到最终分类结果及分类函数值  $DS$ ,见表 2.

以表 2 中分级数目  $K$  为横坐标,分类函数值  $DS$  为纵坐标,绘制出  $DS$  随  $K$  变化的曲线.图 3 显示了分级函数  $DS$  的变化率,随着划分级别数目  $K$  的增大而不断减小,即  $DS-K$  曲线越来越平滑. $DS$  减小表示分级得到了进一步合理调整,但  $DS-K$  曲线是非线性降低的,当分级数  $K \geq 4$  后趋于平缓,其变化率较小,表明其后的分级差别不大.具体分级数不仅依据  $DS-K$  曲线的形态,还需结合工程实际情况来确定.考虑管道漏损分类的经济性及合理性,选择曲线拐点附近的 4 级作为管段分级数,经多次迭代,当  $DS$  函数不再变化时,表明前后两次分类重心重合,即为最终分类,将供水管网中的所有管段为 4 级时,每个管段的分类等级如图 4 所示.

表 2 管段分类结果

Tab. 2 Classification results of pipe segments

分类编号	管道样本																				DS
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1.816
3	1	1	1	1	1	3	3	2	3	1	1	2	2	1	3	2	3	1	1	1	0.635
4	2	2	2	2	2	4	4	3	4	2	2	3	3	2	4	3	4	1	1	1	0.277
5	2	2	2	2	2	4	5	3	5	2	2	3	3	2	5	3	5	1	1	1	0.221
6	2	2	2	2	2	5	6	4	6	2	2	4	4	2	6	4	6	1	1	1	0.221
7	2	3	3	3	2	6	7	4	7	2	3	4	4	2	7	4	7	1	1	1	0.152
8	2	3	3	3	2	7	8	5	8	2	3	4	5	2	8	5	8	1	1	1	0.037
9	2	3	3	3	2	7	9	5	9	2	3	5	5	2	8	5	9	1	1	1	0.147
10	2	4	4	4	2	8	10	6	10	3	4	5	6	3	9	6	10	1	1	1	0.031
11	3	4	4	4	3	9	10	6	11	3	4	5	6	3	10	6	11	1	1	1	0.028
12	3	4	4	4	3	10	11	7	12	3	4	6	7	3	11	7	12	1	1	1	0.028
13	3	5	5	5	3	10	12	7	13	3	5	6	7	3	12	7	13	1	1	1	0.028
14	3	5	5	5	3	11	13	8	14	3	5	6	7	3	13	8	14	1	1	1	0.016
15	3	5	5	5	3	12	14	8	15	4	5	7	8	4	14	8	15	1	1	1	0.028
16	3	5	6	6	3	13	15	9	16	4	5	7	8	4	15	9	16	1	1	1	0.014
17	4	6	6	6	4	14	16	9	17	4	6	7	9	4	16	9	17	1	1	1	0.028
18	4	6	6	6	4	14	17	10	18	4	6	8	9	4	16	10	18	1	1	1	0.012
19	4	7	7	7	4	16	19	11	20	4	7	9	10	4	18	11	20	1	1	1	0.022

注：同一行中标有相同数字的管段，认为其归类级别划分为同一等级。

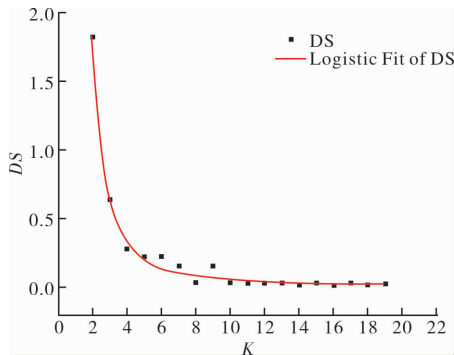


图 3 DS-K 曲线  
Fig. 3 Curve of DS-K

### 3.3 分类等级中代表性管段选取

计算各分类等级包含的所有管段到该类重心的欧式距离，欧式距离最小的管段即为该分类等级中的关键管段。第 1 级分类中 P19 为关键管段， $d=0.00$ 。除此 1 级还包括 P18、P20；第 3 级分类中，P2-P4 管段受水压的影响较大；第 4 级分类中 P17 为关键管段， $d=0.00$ ，其受管材影响较大。从表 2 中分类结果可以看出，无论分类等级如何变化，管段 P18-P20 都属于第 1 类，这也说明了低地

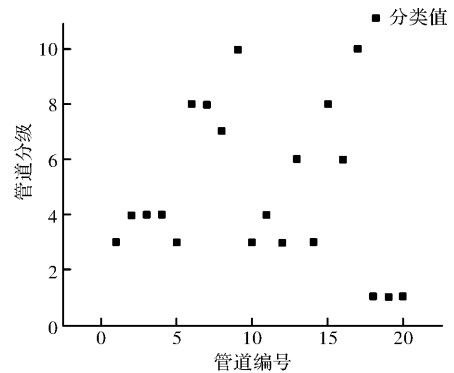


图 4 管段漏损分类等级结果

Fig. 4 classification results of leakage in pipe section  
势管段受荷载和埋深的变化影响较大，其在整个供水管网中的重要性较大，需重点监测。

### 3.4 计算结果对比

文献中[20]采用系统聚类分析方法将管道漏损等级分成四类，具体对比分级见表 3。除了 P12 管段所在的等级在Ⅱ、Ⅲ级间稍有变动，其余结果相同。P12 由于受所在土质影响，经对比分析，属Ⅲ等级较为合适。总体结果验证了动态分级方法的可行性，实现了聚类分类的优化。

表 3 计算结果与聚类分析方法对比

Tab. 3 Comparison of calculation with cluster analysis method

漏损分级	聚类分析方法	动态分级
I	P18、P19、P20	P18、P19、P20
II	P1、P2、P3、P4、P5、P10、P11、P12、P14	P1、P2、P3、P4、P5、P10、P11、P14
III	P8、P13、P16	P8、P12、P13、P16
IV	P6、P7、P9、P15、P17	P6、P7、P9、P15、P17

4 结语

本文提出了城市供水管道漏损控制的动态分级模型, 针对管道漏损问题, 选取指标应用动态分级方法(DT)进行供水管网漏水等级判定, 依据信息熵确定指标权重, 应用 MATLAB 编程, 借助计算机处理, 依据  $DS-K$  曲线确定分级数为 4 级, 与系统聚类分析方法的分级评价所得结果大体一致。结果表明应用动态分级法进行管道漏损分析, 分级评价结果多样, 实现了系统聚类分析的优化, 对城市供水管道漏损控制具有一定的指导意义。

参考文献 References

[1] 刘遂庆,关小明,王永.“5·12”特大地震中供水管网损坏调查分析[A]//2010 中日给水技术国际交流会论文集. 兰州: 中国土木工程学会水工业分会给水委员会, 2010.

LIU Suiqing, ZHENG Xiaoming, WANG Yong. Investigation and analysis of water supply pipe network damage in the “May 12” earthquake [A]//2010 Proceedings of the International Conference on Water Supply Technology between China and Japan. Lanzhou: Water supply committee, water industry branch, Chinese Society of Civil Engineering, 2010.

[2] 孙绍平. 阪神地震中给水管道震害及其分析[J]. 特种结构,1997,14(2):51-55.

SUN Shaoping. Seismic damage of water supply pipeline and its analysis in Hanshin earthquake [J]. Special Structures,1997,14(2):51-55

[3] 中华人民共和国国务院. 水污染防治行动计划[EB/OL]. <http://szy.wr.gov.cn/>,2015,4-2.

The state council of the People’s Republic of China. Action plan for the prevention and control of water pollution [EB/OL] . <http://szy.wr.gov.cn/>, 2015, 4-2.

[4] GIUSTOLISI O, SAVIC D, KAPELAN Z. Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,134(5): 626-635.

[5] GAO J L, CHANG K, ZHANG M, et al. Research on leakage control of water distribution network based on pressure-driven demand model[C]. Tucson, Arizona, United States,2010,1103 -1109.

[6] LI B , LIU W, LI J. Leakage model of water distribution network[C]. Chengdu, 2013, 121-128.

[7] MOHAMMAD MM, KHOSRO H, KOUROSH B, et al. Leakage control in water distribution networks by using optimal pressure management: a case study[C]. Tucson, Arizona, United States, 2012: 1110-1123.

[8] GUPTA R, NAIR AGR, ORMSBEE L. Leakage as pressure-driven demand in design of water distribution networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2016,142(6): 1-14.

[9] 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.

ZHANG Hongwei, NIU Zhiguang, CHEN Chao, et al. Study on the prediction model for water supply net leakage [J]. China Water & Wastewater, 2001,17 (6):7-9.

[10] URI S, CHARLES D D H. An analytic approach to scheduling pipe replacement [J]. American Water Works Association,1979 , 71 ( 5 ) : 248-258.

[11] 傅玉芬. 城市供水管网漏损控制[D]. 天津:天津大学,2004. 6.

FU Yufen. Leakage control of urban water supply network [D]. Tianjin:Tianjin University,2004. 6.

[12] 赵洪宾,陈兵,伍悦滨. 给水管网漏失预测模型的研究[J]. 给水排水,2001, 27 (10 ): 94-96.

ZHAO Hongbin, CHEN Bing, WU Yuebin. Research on leakage prediction model of water supply network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2001, 27 (10): 94-96.

[13] 闫丽芳. 给水管网漏损分析及预测[D]. 合肥工业大学,2009.

YANG Lifang. Analysis and forecast of leakage in water distribution systems[D]. Hefei university of technology,2009.

[14] 韩阳,王威. 给水管网实时故障诊断的支持向量机模型[J]. 给水排水,2007,33(2):109-112.

- HAN Yang, WANG Wei. SVM based model for real-time diagnostic of water distribution network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(2): 109-112.
- [15] 张明, 李鹏, 周润娟. 基于集对分析的供水管网漏损预测模型[J]. 供水技术, 2012, 6(3): 28-31.
- ZHANG Ming, LI Peng, ZHOU Runjuan. Leakage forecast model of water supply network based on set pair analysis [J]. Water Technology, 2012, 6(3): 28-31.
- [16] 林韵梅. 岩石分级的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 69-86.
- LIN Yunmei. Theory and practice of rock classification [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996: 69-86.
- [17] 胥旋, 钟茂华, 史聪灵, 等. 基于动态分级法的地铁设备设施风险评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(7): 61-66.
- XU Xuan, ZHONG Maohua, SHI Congling, et al. Risk assessment of equipment and facilities in metro based on dynamic classification method [J]. Chinese journal of safety science, 2013, 23(7): 61-66.
- [18] 江海潮. 管材之间的接口形式探讨[J]. 安徽建筑, 2003, 10(1): 49-49.
- JIANG Haichao. Discussion on the interface form between pipes [J]. Anhui architecture, 2003, 10(1): 49-49.
- [19] 郎鹏凯. 基于GIS系统的城市供水管网漏损评价方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- LANG Pengkai. Study on urban water supply pipe network leakage evaluation based on gis technology [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [20] 马力辉, 崔建国, 刘遂庆, 等. 系统聚类分析用于供水管道漏损控制的研究[J]. 中国给水排水, 2006(23): 9-13.
- MA Lihui, CUI Jianguo, LIU Suiqing, et al. Study on application of system clustering analysis in leakage control of water supply pipelines [J]. China Water & Wastewater, 2006(23): 9-13.

(编辑 吴海西 沈波)

(上接第 439 页)

- [11] 张再鹏, 陈焰华, 符永正. 压差控制对变流量空调水系统水力稳定性的影响[J]. 暖通空调, 2009, 39(6): 63-66.
- ZHANG Zaipeng, CHEN Yanhua, FU Yongzheng. Effect of pressure difference control on hydraulic stability of variable flow air conditioning water systems [J]. HV&AC, 2009, 39(6): 63-66.
- [12] BYNUM Harris, MERWIN Ed. Variable flow-a control engineer's perspective [J]. ASHRAE Journal, 1999, 41(1): 26-30.
- [13] ZHAO Tianyi, ZHANG Jili, SUN D. Experimental analysis of the thermal stability of the pressure control method for a variable flow air-conditioning water system [J]. Building and Environment, 2013, 70(12): 1-9.
- [14] QIANG J, GUO J, SUI Z. Study on the pressure difference control in variable flow rate central heating systems [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 193-194: 1239-1242.
- [15] WU X, YANG C, WU D, et al. Energy saving analysis of pressure difference control of frequency conversion variable water flow system [J]. Proceedings Building Simulation, 2007, 1-3: 624-628.
- [16] 迟光亮, 张吉礼. 基于 TRNSYS 的空调水系统管网模型的建立[J]. 建筑热能通风空调, 2011, 30(04): 6-10.
- CHI Guangliang, ZHANG Jili. Establishment of pipe network model in air Conditioning water system based on TRNSYS [J]. Building Energy & Environment, 2011, 30(04): 6-10.
- [17] 季科, 张永贵, 刘冰冰, 等. 基于 TRNSYS 的空调水系统仿真平台[J]. 暖通空调, 2015, 45(05): 93-96.
- JI Ke, ZHANG Yonggui, LIU Bingbing, et al. Simulation platform of air conditioning water system based on TRNSYS [J]. HV&AC, 2015, 45(05): 93-96.
- [18] 林兴斌, 潘毅群, 黄治钟. 变风量空调系统不同控制策略下的能耗分析[J]. 建筑热能通风空调, 2010, 29(5): 20-24.
- LIN Xingbin, PAN Yiqun, HUANG Zhizhong. Analyses of the Energy Performance of VAV System with Different Control Strategies [J]. Building Energy & Environment, 2010, 29(5): 20-24.
- [19] 赵天怡, 张吉礼, 孙德兴. 变流量空调水系统热力稳定性动态分析[J]. 天津大学学报, 2009, 42(9): 833-838.
- ZHAO Tianyi, ZHANG Jili, SUN Dexing. Dynamic analysis of thermodynamic stability in variable water flow HVAC system [J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(9): 833-838.

(编辑 吴海西 沈波)