

罗同顺, 左剑恶, 干里里, 等. 2011. 基于模糊综合评判模型的污水管道缺陷量化评价方法[J]. 环境科学学报, 31(10): 2204-2209

Low T S, Zuo J E, Gan L L, et al. 2011. Quantitative evaluation method for sewer defects based on fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(10): 2204-2209

# 基于模糊综合评判模型的污水管道缺陷量化评价方法

罗同顺, 左剑恶\*, 干里里, 黄霞

清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084

收稿日期: 2010-12-13 修回日期: 2010-12-30 录用日期: 2011-01-17

**摘要:** 利用模糊综合评判模型, 从污水管道的密封性、稳定性和功能性三方面分别考虑不同缺陷类型的影响, 利用层次分析法确定权重, 建立量化的污水管道缺陷状况评价方法模型. 对南方某市一段污水管道进行评判, 得到污水管道缺陷综合评价指数  $H = 1.09$ , 其中密封性指数  $H_t = 0.44$ , 稳定性指数  $H_s = 0.78$ , 功能性指数  $H_f = 1.79$ , 判定结果为紧急缺陷管道; 通过对德国某市的管段进行评价, 得到管道缺陷综合评价指数  $H = 0.24$ , 其中  $H_t = 0.34$ ,  $H_s = 0.16$ ,  $H_f = 0.18$ , 判定结果为轻微缺陷管道, 与德国评价方法的结果类似, 证明本模型适用于对情况复杂的污水管道进行评价.

**关键词:** 污水管道; 管道缺陷量化状况评价; 模糊综合评判; 层次分析法

文章编号: 0253-2468(2011)10-2204-06 中图分类号: X32 文献标识码: A

## Quantitative evaluation method for sewer defects based on fuzzy comprehensive evaluation model

LOW Thong Soon, ZUO Jiane\*, GAN Lili, HUANG Xia

State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control (SKLESPC), School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084

Received 13 December 2010; received in revised form 30 December 2010; accepted 17 January 2011

**Abstract:** Based on fuzzy comprehensive evaluation model and analytical hierarchy process, a quantitative method to evaluate sewer defects is proposed by considering different defect types and their effects on the tightness, stability and functionality of sewers. Two case studies were conducted. Sewer Defect Index ( $H$ ) of 1.09, with  $H_t$  of 0.44,  $H_s$  of 0.78 and  $H_f$  of 1.79, was obtained on a sewer in a city of Southern China, suggesting that the sewer was in the rank of emergent defect. In contrast,  $H$  of 0.24, with  $H_t$  of 0.34,  $H_s$  of 0.16 and  $H_f$  of 0.18, was obtained on an example case in ATV 149, suggesting that the sewer was in the rank of minor defect. Similar results were obtained by ATV evaluation method, which confirmed the reliability of our proposed method.

**Keywords:** sewer; quantitative sewer defect assessment; fuzzy comprehensive evaluation; analytical hierarchy process

### 1 引言( Introduction)

近年来我国城市排水管网发展迅速, 2008 年在全国主要城市铺设的排水管网已长达 315220 km, 其中 1/2 以上是最近 10 年才铺设的( 中华人民共和国国家统计局, 1998—2009). 虽然我国设计规范规定, 污水管道的设计使用年限为 50 年以上, 但是随着使用时间的增加, 排水管道出现缺陷的可能性将增加. 中国污水管道管龄虽然普遍较短, 但在某些

城市, 已发生了明显的缺陷并造成损失或事故, 如渗漏引起地陷、堵塞引起污水外冒与污染、地下水内渗引起污水厂运行不正常等. 为避免发生事故, 应对排水管道进行定期检测和病害评估, 并由此制定管道维护方案, 以延长管道寿命. 目前针对排水管道的检测评估, 许多国家都提出了基于管道闭路电视检测( Closed Circuit Television Inspection, CCTV)、管道内窥声纳检测( Sonar Inspection)、管道潜望镜检测技术( Quickview) 等( 陈吉宁等, 2010)

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项( No. 2008ZX07313-004)

Supported by the Science and Technology Major Projects of Water Pollution Control ( No. 2008ZX07313-004)

作者简介: 罗同顺( 1985—), 男, E-mail: ltsoon41@hotmail.com; \* 通讯作者( 责任作者), E-mail: jiane.zuo@mail.tsinghua.edu.cn

**Biography:** LOW Thong Soon ( 1985—), male, E-mail: ltsoon41@hotmail.com; \* **Corresponding author**, E-mail: jiane.zuo@mail.tsinghua.edu.cn

技术的评价标准,如德国的 ATV149 标准(以下简称 ATV 标准)、英国 WRc 的排水管道状况分类手册等(Water Research Center, 2004; DWA German Association for Water, Wastewater and Waste, 2007);国内如上海、广州也分别提出了《上海市公共排水管道电视和声纳检测评估技术规程》、《广州市公共排水管道电视和声纳检测评估技术规范》(上海市水务局, 2005; 广州市市政工程安全质量监督站, 2008)。上海规程提出了对排水管道分为结构性状况与功能性状况的评估,但其中对结构性(或功能性)状况评估时,只考虑了结构性(或功能性)缺陷。ATV 标准中对污水管道缺陷进行详细分类,并提供量化缺陷严重程度的方法,但其评价过程中主要根据一段管道中缺陷等级最严重的缺陷来评价,评价结果则以该缺陷对应的分值来表示,缺乏对污水管道综合评价的量化指标。

本文首次将模糊数学相关原理引入对污水管道状况的评价中,综合考虑多种不同类型的管道缺陷,采用层次分析法确定其相应的权重,采用模糊综合评价法计算出管段的定量评价结果,弥补了国内在污水管道评价技术领域的不足。

## 2 基于模糊数学的污水排水管道缺陷状况评价方法 (Sewer defect evaluation method based on fuzzy mathematics)

污水管道缺陷状况的评价应考虑管道的 3 种要求:密封性(tightness,  $t$ )、稳定性(stability,  $s$ )及功能性(function,  $f$ )。污水管道的密封性是指管道结构是否完好、是否受到外来破坏等原因,从而导致外

来物质进入管道或内在物质流出管道的可能性;管道的稳定性主要考量污水管道在未来的一段时间内,是否能稳定运行,会不会发生严重缺陷而导致管网系统崩溃;而管道的功能性主要考量管道的基本功能,即输送污水能力。

污水管道中可能发生的缺陷有很多,其中主要的缺陷可归纳为以下 15 种:变形、裂缝、断裂/坍塌、表面腐蚀/破损、突出接口/穿管、接口损坏、接口错位/脱节、支管暗接/错接、树根突入、管壁附着物、管底沉淀物、土壤进入、其他障碍物、地下水内渗、污水外渗。对于每一种管道缺陷,按缺陷的严重程度可将其分为若干等级。上述 15 种污水管道缺陷对污水管道的密封性、稳定性和功能性的影响分别不同,部分缺陷甚至对污水管道 3 种性能都会有影响,因此在评价时应应对这 3 种管道性能进行单独判断。

排水管道内部多类型、多种严重程度、相互交叉影响的缺陷,使得对管道缺陷状况的评价很难用简单明了的数学方法来表示。模糊综合评判在考虑多种因素所影响的现象或事物进行评价时引入了模糊因素的概念,适用于情况复杂的管道内部缺陷情况。本文通过模糊综合评判(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)模型及层次分析法(AHP)来对管道缺陷进行评价。下面对污水管道缺陷状况评价的模糊综合评判方法的基本内容和步骤做简要介绍。

### 2.1 层次构建

本文建立的评价方法涉及的内容与其层次关系如图 1 所示。

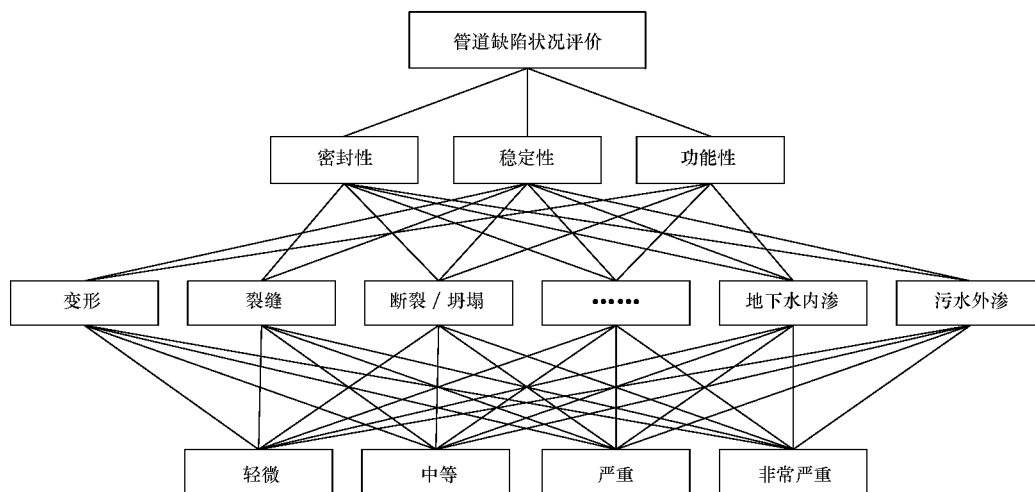


图 1 管道缺陷状况评价涉及内容及其层次关系图

Fig. 1 Sewer health assessment-related elements and their relationship

如图所示,污水管道的缺陷状况评价包含了3种管道特性:密封性、稳定性和功能性。其中,每一种特性与会对该种特性产生影响的管道缺陷对应。本文考虑了如上所述的15种污水管道缺陷。针对各种缺陷,将其分为轻微、中等、严重、紧急4个缺陷严重程度等级。由此组成了本文建立的评价方法所涉及内容的侧层次关系。

## 2.2 因素集的建立

将影响评判对象的各种因素构成的集合称为因素集  $U$ 。在本文中,

$$U = (U_t, U_s, U_f) \quad (1)$$

其中:

$U_t$ 为管道密封性,包括裂缝、断裂/坍塌、树根突入等10种管道缺陷:

$$U_t = (u_{t01}, u_{t02}, \dots, u_{t10}) \quad (2)$$

$U_s$ 为管道稳定性,包括变形、裂缝、污水外渗等10种管道缺陷:

$$U_s = (u_{s01}, u_{s02}, \dots, u_{s10}) \quad (3)$$

$U_f$ 为管道功能性,包括树根突入、管壁附着物、管底沉积物等12种管道缺陷:

$$U_f = (u_{f01}, u_{f02}, \dots, u_{f12}) \quad (4)$$

## 2.3 评价集的建立

评价集是评判者对评判对象可能作出的各种总的评判结果组成的集合,用  $V$  表示。在本文中,

$$V = (\text{轻微}, \text{中等}, \text{严重}, \text{紧急}) \quad (5)$$

## 2.4 权重集的建立

为了反映各因素的重要程度,对各个因素  $u_i$  分配一个相应的权数  $a_i, i = 1, 2, \dots, m$ , 通常要求  $a_i$  满足:

$$a_i \geq 0, \sum_{i=1}^m a_i = 1 \quad (6)$$

由于污水排水管道的缺陷种类繁多,各个缺陷之间也会相互影响,使得情况非常复杂,难以简单的、直接给出某一种因素的权重。在层次分析法中,“两两比较法”是一种简便的导出权重的方法。其具体方法是:以某个因素作为比较准则时,用一个比较标度  $a_{ij}$  来表达下一层次中第  $i$  个因素与第  $j$  个因素的相对重要性的认识,由此构造出比较判断矩阵。当判断矩阵过于偏离一致性时,可靠程度会降低,因此需要进行一致性检验。具体方法是计算一致性指标  $CI$  (Consistency Index) 与一致性比例  $CR$  (Consistency Ratio), 其中

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

式中  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值;  $n$  为判断矩阵的阶数;  $RI$  为平均随机一致性指标 (Random Index), 其取值见表1。

表1 平均随机一致性指标  
Table 1 Random Index Values

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$RI$	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当  $CR < 0.1$ , 则认为比较判断矩阵的一致性可以接受, 否则应对判断矩阵作适当的修正。比较判断矩阵通过一致性检验后, 可求出权重向量, 即判断矩阵中的最大特征值  $\lambda_{\max}$  对应的特征向量, 权重向量归一化后得出对应元素的权重  $a_i$ 。各个  $a_i$  组成  $U_i$  上的一个模糊集:

$$\tilde{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \quad (9)$$

本文在评价每种管道特性涉及了10种至12种缺陷, 这将导致两两比较判断矩阵的阶数较大, 从而使矩阵两两比较的准确性以及一致性计算变得非常困难。但在实际情况中, 一段管道较少会同时发生一种管道特性中的所有缺陷。在实际计算中, 为计算方便, 仅需将实际发生的缺陷列入比较判断

矩阵就足够了(李柏年, 2007)。

## 2.5 模糊综合评判过程

从一个因素出发进行评判, 以确定评判对象对评价集  $V$  的隶属程度。在本文中, 评判的主要根据是污水管道的检测记录, 对于每一种管道缺陷, 按严重程度将其分为4级, 即轻微、中等、严重、紧急。本文假定缺陷记录结果与评判集的隶属关系为1, 由此可得到评判矩阵,

$$\tilde{R}_i = \begin{pmatrix} r_{i1\text{轻微}} & r_{i1\text{中等}} & r_{i1\text{严重}} & r_{i1\text{紧急}} \\ r_{i2\text{轻微}} & r_{i2\text{中等}} & r_{i2\text{严重}} & r_{i2\text{紧急}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{in_i\text{轻微}} & r_{in_i\text{中等}} & r_{in_i\text{严重}} & r_{in_i\text{紧急}} \end{pmatrix} \quad (10)$$

由层次分析法得出判断矩阵中所涉及的各项的权重,

$$\tilde{A}_i = (a_{i1} \ a_{i2} \ \cdots \ a_{in_i}) \quad (11)$$

$n_i$  为在一段管道内, 对某种管道性能会造成影响的缺陷总数  $i = t, s, f$ . 由此得到综合评判结果:

$$\tilde{B}_i = \tilde{A}_i \cdot \tilde{R}_i \quad (12)$$

## 2.6 评判指标的处理

利用数学方法对评判结果进行处理, 以得到直观、容易比较的结果. 通常采用最大隶属度法、加权平均法、模糊分布法等(宋晓秋, 2004). 本文利用加权平均法来对评判指标进行处理: 将  $b_j$  归一化, 以  $b_j$  作为权数, 对各个备择元素  $v_j$  进行加权平均, 取此平均值作为评判结果, 即:

$$v = \sum_{j=1}^n b_j v_j \quad (13)$$

首先需要将评价集里的  $v_j$  进行量化, 在此仍是利用层次分析法来给出其权重值. 针对管道发生缺陷的 4 种严重等级, 其两两比较判定矩阵如下.

表 2 管道缺陷等级的两两比较判定矩阵

Table 2 Matrix of pairwise comparison between defect severities

缺陷等级	轻微	中等	严重	紧急
轻微	1	1/3	1/6	1/9
中等	3	1	1/3	1/6
严重	6	3	1	1/3
紧急	9	6	3	1

可求出矩阵的最大特征值, 并求一致性指标:

$$\lambda_{\max} = 4.081 \quad (14)$$

$$CI = 0.027 \quad (15)$$

当  $n = 4$ , 取  $RI = 0.9$ , 可得一致性比例:

$$CR = 0.03 < 0.1 \quad (16)$$

两两比较判定矩阵通过一致性检验. 由此求出上述矩阵的归一化后的权重向量:

$$A_{\text{严重程度}} = (0.047 \ 0.105 \ 0.257 \ 0.591)^T \quad (17)$$

由上述的权重向量, 赋予每一缺陷严重等级相应的分数, 即轻微为 47、中等为 105、严重为 257、紧急为 591. 则评判结果可表示为:

$$v = 47b_1 + 105b_2 + 257b_3 + 591b_4 \quad (18)$$

上式表示在某段排水管道发生的所有缺陷的平均缺陷状况, 由于在计算过程中的归一化处理, 使得缺陷总数的影响被屏蔽了, 为了得到准确的缺陷状况评价, 应将缺陷总数列入到计算式子中. 同时, 在仅发生 1 个管道缺陷时, 管道缺陷状况的极限情况为:

$$B = (0 \ 0 \ 0 \ 1) \quad (19)$$

即完全属于紧急. 此时得出的值应为 591, 为方便比较, 将每次计算结果除以 591, 从而得到欲评价管段与单位紧急管段的比值. 因此, 最终的计算结果可表示为:

$$H_i = \frac{n \times v}{591} = \frac{n \times (47b_1 + 105b_2 + 257b_3 + 591b_4)}{591} \quad (20)$$

式中  $n$  为欲评价的管道内与某种管道特性相关的缺陷总数. 计算得到的  $H_t$ ,  $H_s$ ,  $H_f$  分别表示了管道密封性、稳定性及功能性的评价结果. 然而, 在实际应用中, 将一个污水管道的评价结果分别用 3 种指标来表示较不直观, 同时也难以与其他管道做比较. 因此, 需要由  $H_t$ ,  $H_s$ ,  $H_f$  求出污水管道综合评价指标  $H$ . 通过赋予每一种污水管道缺陷一个权重; 对应于污水管道的密封性、稳定性和功能性, 将一段污水管道内出现的各种缺陷种类的权重进行加和, 由此得到  $A_t$ 、 $A_s$ 、 $A_f$ , 将  $A_t$ 、 $A_s$ 、 $A_f$  归一, 有

$$H = A_t H_t + A_s H_s + A_f H_f \quad (21)$$

由模型计算得到污水管道综合评价指标  $H$ , 其值越靠近 1 (在缺陷数较多时有可能大于 1), 则代表管道与紧急缺陷管段越相似. 根据  $H$  的值, 将管道分为不同的缺陷等级, 由此得出对管道进行养护的优先次序, 具体如表 3 所示.

表 3  $H$  值范围与建议采取的措施

Table 3 Values of  $H_i$  and its corresponding action

	$0 < H \leq 0.25$	$0.25 < H \leq 0.50$	$0.50 < H \leq 0.75$	$H > 0.75$
缺陷等级	轻微缺陷管道	中等缺陷管道	严重缺陷管道	紧急缺陷管道
相应措施	短时间内可不采取措施; 但应在一年内再次对管道进行检测	应在半年内安排管道的局部养护措施	应在三个月内采取养护措施	应立即采取养护/抢救措施

3 案例分析与讨论 ( Case studies and discussion)

3.1 案例 1

利用潜望镜及管道 CCTV 机器人在我国南方某城市进行排水管道检测工作所获得的检测数据,本文对该城市的排水管道进行了分析与评价.现抽取其中一段污水管道,其基本信息如表 4 所示.针对该段管道的缺陷检测结果,借鉴 ATV 标准中制定的分级方法,记录如下.

表 4 南方某城市的一段排水管道缺陷记录  
Table 4 Defect records of a sewer in a city of Southern China

距检查井距离/m	管道缺陷	严重等级
1.14	管底沉积物	轻微
7.04	管底沉积物	轻微
10.27	管底沉积物	轻微
11.30	变形	轻微
15.40	断裂	严重
41.45	管底沉积物	中等

注:管材为塑料,管径为 1000 mm,管长 47 m,管道类型为污水管.

案例 1 管道中发生的三种缺陷都与管道的功能性有关,在此以评价管道功能性为例.首先作出评判矩阵,并利用层次分析法两两比较方法得出判定矩阵:

$$R_f = \begin{pmatrix} R_{\text{变形}} \\ R_{\text{断裂}} \\ R_{\text{管底沉积物}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

表 5 缺陷两两比较判定矩阵

Table 5 Matrix of pair wise comparisons among defects

功能性缺陷	变形	断裂	管底沉积物
变形	1	0.167	2
断裂	6	1	7
管底沉积物	0.5	0.143	1

可求出:

$$\lambda_{\max} = 3.032 \quad (23)$$

$$CI = 0.016 \quad (24)$$

$$CR = 0.028 < 0.1 \quad (25)$$

两两比较判定矩阵通过一致性检验.由此求出上述矩阵的权重向量:

$$A_f = (0.151 \ 0.758 \ 0.091) \quad (26)$$

$$B_f = A_f R_f \quad (27)$$

可得:

$$B_f = (0.424 \ 0.091 \ 0.758 \ 0) \quad (28)$$

将结果归一化,得:

$$B_f = (0.333 \ 0.072 \ 0.595 \ 0) \quad (29)$$

同理,可得:

$$B_s = (0 \ 0.174 \ 0.826 \ 0) \quad (30)$$

$$B_l = (0 \ 0 \ 1 \ 0) \quad (31)$$

上述结果表明,此段管道的功能性缺陷状况 33.3% 属于轻微的、7.2% 属于中等、59.5% 属于严重情况.此管道的稳定性缺陷状况 17.4% 属于中等情况、82.6% 属于严重情况.其密封性缺陷状况为 100% 严重,这是因为对管道密封性造成影响的缺陷只有一项,即断裂,该缺陷的等级为严重,因此导致了此特殊结果.对评价指标进行处理,有:

$$H_l = \frac{1 \times (257 \times 1)}{591} = 0.44 \quad (32)$$

$$H_s = \frac{2 \times (105 \times 0.174 + 257 \times 0.826)}{591} = 0.78 \quad (33)$$

$$H_f =$$

$$\frac{6 \times (47 \times 0.333 + 105 \times 0.072 + 257 \times 0.595)}{591} = 1.79 \quad (34)$$

根据此段污水管道发生的缺陷,可得到  $A_l = 0.262$ ,  $A_s = 0.339$ ,  $A_f = 0.399$ , 则污水管道综合评价指标

$$H = 1.09 \quad (35)$$

该污水管道的评价结果  $H = 1.09$ , 属于紧急缺陷管道,其中  $H_l = 0.44$ ,  $H_s = 0.78$ ,  $H_f = 1.79$ . 对于此污水管道,其功能性缺陷状况最差,属于紧急缺陷管道,应立即通过清洗、疏通等方法来解决.此外,由管道变形与断裂引起的功能性(与稳定性)问题也较严重,应在 3 个月内通过局部修复来解决.而由断裂引起的密封性问题较小,若仅从密封性考虑,只要在半年内对此缺陷进行局部养护就足够了.但在此案例中,在对污水管道的密封性问题采取措施前,断裂这个缺陷应该已在对功能性(或稳定性)问题采取的养护措施中被解决了.

3.2 案例 2

德国 ATV 149 标准中附带案例,管道的基本信息与缺陷记录如下.

表6 德国 ATV149 标准中案例缺陷记录

Table 6 Defect records of an example in ATV 149

距检查井距离/m	管道缺陷	严重等级
3.9	裂缝	轻微
12.3	接口损坏	轻微
33.0	树根突入	中等

注: 管材为陶土, 管径为 400 mm, 管长 37 m, 管道类型为合流管。

由模型计算得到的结果, 有:

$$H_l = \frac{3 \times (47 \times 0.66 + 105 \times 0.33)}{591} = 0.34 \quad (36)$$

$$H_s = \frac{2 \times (47 \times 1)}{591} = 0.16 \quad (37)$$

$$H_f = \frac{1 \times (105 \times 1)}{591} = 0.18 \quad (38)$$

根据此段污水管道发生的缺陷, 可得到  $A_l = 0.424$ ,  $A_s = 0.440$ ,  $A_f = 0.136$  则污水管道综合评价指标

$$H = 0.24 \quad (39)$$

该污水管道的评价结果  $H = 0.24$  属于轻微缺陷管道  $H_l = 0.34$   $H_s = 0.16$   $H_f = 0.18$ 。ATV 标准中将此管段判定为中等缺陷管道, 但其分值接近中等缺陷管道的判断下限。本模型评价得出的结果为轻微缺陷管道, 但污水管道综合评价指数的分值接近轻微缺陷管道的判断上限(0.25), 因此本文的评价结果与德国方法的评价结果类似。根据评价结果, 此段污水管道的密封性问题相对较大, 根据建议, 应在半年内对此管道采取养护措施。

由案例的评价结果可知, 本模型可对包括单缺陷、多种缺陷、严重程度由轻微至严重等情况的污水管道进行评价, 并能得到直观、准确的评价结果, 证明本模型适用于对情况复杂的污水管道进行评价。

#### 4 结论 (Conclusions)

1) 通过模糊综合评判与层次分析法, 本文首次基于模糊数学建立了一种对污水管道的缺陷状况的评价方法, 弥补了国内在污水管道评价技术领域的不足。

2) 在污水管道缺陷状况评价中, 不应只将某类型缺陷局限于该类型的评价中, 而应针对管道的密封性、稳定性和功能性将缺陷进行归类再评估。

3) 本文对南方某城市的一段污水管道进行缺陷状况评判, 得到污水管道缺陷综合评价指数  $H =$

1.09, 其中  $H_l = 0.44$   $H_s = 0.78$   $H_f = 1.79$  属于紧急缺陷管道。根据建议, 应立即对污水管道采取相应的养护措施。

4) 通过对一段德国的案例管段进行评价, 本文得出的评价结果  $H = 0.24$ , 其中  $H_l = 0.34$   $H_s = 0.16$   $H_f = 0.18$  属于轻微缺陷管道, 但其分值接近轻微缺陷管道的判断上限, 与德国评价方法得出的结果类似, 证明了本评价模型的准确性。

责任作者简介: 左剑恶(1968—), 男, 博士, 清华大学环境学院教授。电话: 010-62772455, E-mail: jiane.zuo@mail.tsinghua.edu.cn。

#### 参考文献 (References):

- 陈吉宁, 赵冬泉. 2010. 城市排水管网数字化管理理论与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 213-214
- Chen J N, Zhao D Q. 2010. Digital management of urban drainage network: theory and applications [M]. Beijing: China Architecture & Building Press. 213-214 (in Chinese)
- DWA German Association for Water, Wastewater and Waste. 2007. German DWA Rules and Standards, DWA-M 149-3E Conditions and Assessment of Drain and Sewer Systems Outside Buildings Part 3: Condition Classification and Assessment [S]. Hennef: DWA German Association for Water, Wastewater and Waste
- 广州市市政工程安全质量监督站. 2008. 标准代号广州市公共排水管道电视和声纳检测评估技术规范(试行) [S]. 广州
- Guangzhou Municipal Engineering Safety and Quality Monitoring Station. 2008. Guide for Guangzhou municipal drainage television and sonar inspection/evaluation techniques (Trial) [S]. Guangzhou (in Chinese)
- 李柏年. 2007. 模糊数学及其应用 [M]. 合肥: 合肥工业大学出版社. 113-114
- Li B N. 2007. Fuzzy Math and its Applications [M]. Hefei: Hefei University of Technology Press. 113-114 (in Chinese)
- 中华人民共和国国家统计局. 1998—2009. 中国统计年鉴 1998—2009 [M]. 北京: 中国统计出版社
- National Bureau of Statistics of China. 1998—2009. China Statistical Yearbook 1998—2009 [M]. Beijing: China Statistics Press (in Chinese)
- 上海市水务局. 2005. DB31/T444—2009. 标准代号上海市公共排水管道电视和声纳检测评估技术规程 [S]. 上海: 上海质量技术监督局
- Shanghai Water Authority. 2005. DB31/T444—2009. Guide for Shanghai municipal drainage television and sonar inspection/evaluation techniques [S]. Shanghai: Shanghai Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision (in Chinese)
- 宋晓秋. 2004. 模糊数学原理与方法 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社. 201-203
- Song X Q. 2004. Fuzzy Math and its Applications [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press. 201-203 (in Chinese)
- Water Research Center. 2004. Manual of Sewer Condition Classification 4<sup>th</sup> Edition [M]. United Kingdom: Water Research Center. 20-25