

城市污水管道预报健康度评价模型及其应用研究

颜文涛^{1,2}, 陈朝晖³, 何强², 龙腾锐²

(1 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400045; 2 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 3 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 根据现状管道破坏的可能性及其环境影响后果等因素,建立了城市污水管道预报健康度评价指标体系,基于灰色系统理论提出了城市污水管道预报健康度灰色关联综合评价模型,并运用此模型对四川岳池城东新区城市污水管道的预报健康度进行了综合评价。结果表明:运用灰色关联综合评价模型计算得到的预报健康度可为确定污水管道检测的优先次序提供依据,健康度较低的管道应优先被检测;在灰色关联评价法中,将模的大小与夹角的大小结合起来,可以较全面地反映污水管道与虚拟最健康管道的接近程度;采用多时段管道评价矩阵可避免评价模型的奇异性。

关键词: 城市污水管道; 管道检测; 预报健康度; 灰色关联综合评价模型

中图分类号: X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000 - 4602(2009)07 - 0097 - 05

Study on Assessment Model for Predictive Health Degree of Municipal Sewer Systems and Its Application

YAN Wen-tao^{1,2}, CHEN Zhao-hui³, HE Qiang², LONG Teng-rui²

(1 College of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2 Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3 College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: An assessment indicator system for predictive health degree of municipal sewer systems was established based on breakage possibility and environmental influence consequence of actual sewer systems. The grey relation comprehensive assessment model for predictive health degree of municipal sewer systems was brought forward based on the grey theory. This model was applied to assess the predictive health degree of sewer system at new eastern district of Yuechi County in Sichuan. The results show that the sewer predictive health degree calculated by grey relation comprehensive assessment model can provide a basis for determining priority sequence of sewer inspection. The sewer with low health degree should be inspected with priority. The combination of module and corner size can reflect the similarity of sewer and virtual healthiest pipe comprehensively in grey relation assessment method. Adopting assessment matrix for different time periods can avoid the singularity of the model.

Key words: municipal sewer system; sewer inspection; predictive health degree; grey relation comprehensive assessment model

基金项目: 教育部重点科研项目 (科技司 [2000]156)

城市污水管道在使用过程中,由于水力、结构、环境等各种因素的作用会导致管道性能退化,从而缩短管道的正常使用寿命。由于目前对污水管道检测的重要性认识不足,对管道的修复大多是被动维护,不仅易引起环境污染,而且抢修费用高^[1,2]。在影响城市污水管道性能的各种因素不确定的情况下,如何在污水管道发生事故之前,合理确定管道检测的优先次序,从而避免地毯式的盲目检测,对高效管理和维护城市污水管道,就显得非常重要。为此,笔者根据现状管道破坏可能性及其环境影响后果,建立了城市污水管道预报健康度评价指标体系,基于灰色系统理论提出了城市污水管道预报健康度灰色关联综合评价模型,并运用此模型对四川岳池城东新区的污水管道的预报健康度进行了评价。

1 城市污水管道健康度的概念

城市污水管道健康度是指在规定的时间和条件下,管道稳定、持续地完成预定功能的能力,且不对社会、经济、环境造成负面影响,是表述管道综合状况好坏的指标。健康度越高的污水管道,其持续完成预定功能的能力越强,其被破坏后对环境的影响越小,管道状态越好。城市污水管道健康应包含管道破坏的可能性和环境社会影响两个方面,根据检测前对以上两个方面的综合评价而确定的污水管道健康程度称为预报健康度,因此城市污水管道预报健康度评价指标体系应由水力、结构、环境和社会 4 个因素组成,其中前 2 个因素反应了管道破坏的可能性,后 2 个因素反应了破坏后的影响后果。

2 评价方法

笔者采用指标体系综合评价法确定污水管道预报健康度等级,由于污水管道每个指标的预报健康度客观评价标准是未知的,因此不能采用模糊综合评价法;由于无法获得大量的样本指标值,因此也不能采用神经网络模式识别方法。为此,笔者基于灰色理论提出了城市污水管道预报健康度灰色关联综合评价模型,将评价管道指标集与虚拟最健康管道指标集作比较,即可确定管道的综合健康状况。

2.1 指标体系

采用水力、结构、环境、社会等 4 个因素来构建城市污水管道预报健康度评价指标体系,在 4 个因素下再确定坡度、长度、管径、充满度、腐蚀介质种类、腐蚀介质浓度、覆土厚度、运行时间、管道现状位置的地下水位、管道现状位置的土壤类型、管道现状

位置的地质状况、管道周边最近距离的用地类型、管道现状位置的道路等级、管道功能等 14 个指标,即构成了完整的污水管道预报健康度评价指标体系。由于腐蚀介质种类、腐蚀介质浓度、覆土厚度、运行时间等 4 个指标有较强的相关性(均与管道结构可靠指标有关),可采用结构可靠指标(或结构失效概率)综合表示,因此污水管道预报健康度评价指标体系可由 11 个指标构成。

笔者采用改进三标度法(0, 1, 2)的 AHP 法确定评价指标的权重,将第 s 个因素中的各个指标权重相加即可得到第 s 个因素相对于目标层的权重 w_s ,将第 s 个因素中的各个指标权重归一化得到各个指标相对于该因素的权重 w_{sj} 。预报健康度指标体系权重计算结果见表 1。

表 1 城市污水管道预报健康度评价指标体系

Tab 1 Assessment indicators system for predictive health degree of municipal sewer

目标层	因素层	因素权重	指标层	指标权重
污水管道 预报健康度	水力因素	0.491 5	坡度	0.437 6
			长度	0.159 8
			管径	0.332 5
			充满度	0.070 1
	结构因素 (结构失效概率)	0.305 9	腐蚀介质种类	1
			腐蚀介质浓度	
			覆土厚度	
			运行时间	
	环境因素	0.077 7	地下水位	0.263 0
			土壤类型	0.337 4
			地质状况	0.399 6
	社会因素	0.124 9	用地类型	0.226 4
			道路等级	0.328 5
			管道功能	0.405 1

2.2 评价模型

笔者基于灰色系统理论建立了灰色关联综合评价模型,是基于多指标序列之间的几何接近,即根据多指标间的向量相似或相异程度来衡量评价方案间关联程度的系统分析方法,评价方案间关联程度采用灰色关联度表述。

设城市污水管道预报健康度评价方案集为各段管道的集合,即 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;第 i 段管道 x_i 的第 j 个指标的实际测量值为 x_{ij} ,由于管道的健康状态可由多个指标的测量值综合反映,预报健康度评价指标集可表示为 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$,其中 $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, m$ 为健康度评价指标数。对

社会、环境因素中定性描述的指标需要量化处理,处理方法是将对污水管道影响程度或污水管道破坏后对社会、环境的影响程度分为 4 级,影响最小的为 1 分,影响最大的为 4 分。

对于正向指标,即指标数值越大健康状况越好, $x_{0j} = \max_i(x_{ij})$;对于负向指标,即指标数值越大健康状况越差, $x_{0j} = \min_i(x_{ij})$;另外一类指标呈近正态分布,这类指标值过高或过低都影响污水管道的健康状况,即存在一个优化的取值范围,如充满度指标。构造参考序列向量,设 X_0 为 X_i 集合中虚拟的最健康管道指标集, $X_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0m})$ 。多管道评价矩阵 X 为:

$$X = \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0m} \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

采用初值法对式 (1) 的原始数据进行归一化处理,以消除量纲的干扰。通过计算灰色关联系数 l_{ij} ,可得到多管道健康度灰色关联判断矩阵 L :

$$L = \begin{bmatrix} L_0 \\ L_1 \\ \dots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{01} & l_{02} & \dots & l_{0m} \\ l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{n1} & l_{n2} & \dots & l_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{n1} & l_{n2} & \dots & l_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过上式的计算,每根污水管道健康度其实为判断矩阵一个 m 维空间的行向量 L_i ,以虚拟最健康管道 L_0 为基准向量,计算各段管道 L_i 与 L_0 的关联度(相似或接近程度)来评价管道 L_i 的健康程度。关联度的计算实际上是确定一个由 m 个指标构成的 m 维评价点与最健康点 $(1, 1, \dots, 1)$ 的接近程度。综合考虑 L_i 模的大小 d_i 和 L_i 与 L_0 的夹角 θ_i ,灰色关联度计算模型为:

$$r_i = d_i \cdot \cos \theta_i = \frac{\sum_{j=1}^m (l_{ij} \cdot \frac{w_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j)^2}})}{\sum_{j=1}^m (l_{ij} w_j)} \quad (3)$$

式中 $w_j = w_j^2 / \sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j)^2}$,考虑了 L_i 模的大小 d_i 和

L_i 与 L_0 的夹角 θ_i 新的指标权重。式 (3) 实际上是 L_i 模的大小在 L_0 的投影值。

依据式 (3) 计算得到的灰色关联度可对各段管道进行排序,关联度越大,表明与虚拟最健康管道越接近,即健康状况越好;反之,关联度越小,表明与虚拟最健康管道的相似度越小,即健康状况越差。将全部的灰色关联度 r_i 按聚类分析法分成 4 个等级来确定各段管道的健康等级。上述方法若只对因素层指标集进行评价,则评价结果为污水管道因素层健康度和健康状况;若对目标层指标集(全部指标)进行评价,则评价结果为污水管道的综合健康度和健康状况。

3 实例研究

笔者运用上述模型及方法对基准年(1996年)四川岳池城东新区的城市污水管道进行了预报健康度评价。水力因素的指标值根据城东新区污水管道(共 123 段管道)的竣工资料得到,环境因素和社会因素的指标值根据现状或规划资料得到,各个指标值均为基准年的数据。在预报各个时段管道的健康度前,需先预测各个时段的污水管道结构可靠指标,其可根据污水管道中的腐蚀介质种类、腐蚀介质浓度、管顶埋深及管道运行时间,采用结构可靠度模型计算得到。

按上述方法构建管道参考序列指标集为 $X_0 = (20, 10, 1, 100, 0.50, 6.897, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$,根据式 (3) 计算得到 w ,再计算得到各个因素层和目标层的健康度及健康状况。在比较不同时间段管道的健康度时,为了避免评价模型的奇异性,对包含结构因素(结构单因素或综合健康度评价)的健康度计算采用了不同时间段的管道联合构成的多时段管道评价矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1^1 \\ \dots \\ X_n^1 \\ \dots \\ X_1^2 \\ \dots \\ X_n^2 \\ \dots \\ X_1^t \\ \dots \\ X_n^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0m} \\ x_{11}^1 & x_{12}^1 & \dots & x_{1m}^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1}^1 & x_{n2}^1 & \dots & x_{nm}^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{11}^2 & x_{12}^2 & \dots & x_{1m}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1}^2 & x_{n2}^2 & \dots & x_{nm}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{11}^t & x_{12}^t & \dots & x_{1m}^t \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1}^t & x_{n2}^t & \dots & x_{nm}^t \end{bmatrix} \quad (4)$$

式 (4)中最健康虚拟管道 x_0 与式 (1)相同,式 (4)中除第 5 个指标 (结构可靠指标)外其他指标在各个时段均没变化,矩阵中的第 5 列元素 x_{n5}^i (即结构可靠指标)对不同管段在不同时段是不同的,是一个动态指标。根据上述评价方法,采用式 (4)对

结构单因素或综合健康度进行评价后,按聚类分析法分成 4 个等级来确定管道的结构单因素或综合健康状况,得到在相同的标准下 (相同的 x_0 和聚类等级)不同时间段的污水管道的综合健康度及健康等级,评价结果见表 2 和表 3。

表 2 城东新区污水管道预报健康度评价结果 (1996 年)

Tab 2 Assessment result of predictive health degree of municipal sewers in new eastern district in 1996

管道 编号	水力因素		结构因素		环境因素		社会因素		综合		
	健康度	健康等级	健康度	健康等级	健康度	影响程度	健康度	影响程度	健康度	健康排序	健康等级
1	0. 525 8	级	0. 995 6	级	0. 585 4	级	0. 399 6	级	0. 408 1	33	级
2	0. 518 9	级	0. 983 3	级	0. 585 4	级	0. 431 2	级	0. 406 0	75	级
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
7	0. 514 7	级	0. 984 7	级	0. 398 5	级	0. 431 2	级	0. 404 3	98	级
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
122	0. 537 5	级	0. 919 3	级	0. 279 1	级	0. 411 1	级	0. 410 7	12	级
123	0. 526 8	级	0. 401 8	级	0. 267 9	级	0. 329 6	级	0. 398 7	121	级

表 3 城东新区污水管道在不同时段的预报综合健康度评价结果

Tab 3 Assessment result of predictive health degree of municipal sewers in new eastern district in different time periods

管道 编号	第 10 年		第 20 年		第 30 年		第 40 年		第 50 年	
	健康度	健康等级	健康度	健康等级	健康度	健康等级	健康度	健康等级	健康度	健康等级
1	0. 405 3	级	0. 403 7	级	0. 402 6	级	0. 401 5	级	0. 400 5	级
2	0. 403 2	级	0. 401 6	级	0. 400 5	级	0. 399 4	级	0. 398 4	级
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
7	0. 401 6	级	0. 400 0	级	0. 398 8	级	0. 397 8	级	0. 396 7	级
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
122	0. 408 1	级	0. 406 5	级	0. 405 4	级	0. 404 4	级	0. 403 4	级
123	0. 396 0	级	0. 395 2	级	0. 394 5	级	0. 393 9	级	0. 393 3	级

根据表 2 和表 3 的评价结果,污水管道可分为以下几类:第一类为结构和功能性破坏性高、对社会环境影响大的管道,此类管道健康评价等级低,一般处于 级或 级,综合健康度小,如第 118 段和第 123 段管道;第二类为功能性或结构性破坏的可能性高、对社会环境影响较小的管道,此类管道健康评价等级较低,一般处于 级或 级,综合健康度较小,如第 2 段、第 7 段和第 77 段管道;第三类为破坏的可能性低或较低、对社会环境影响大的管道,此类管道健康评价等级一般处于 级或 级,如第 122 段管道;第四类为破坏的可能性低或较低、对社会环境影响小或较小的管道,如第 1、82、119、120 段管道。

对污水管道的检测顺序按健康度排序确定,健康排序在最后的管道将最先被检测。例如,第 118 段管道的健康度排序为 123 位,将作为优先检测的管道,此类管道均为破坏可能性较高和影响后果较

严重的管道;破坏可能性较高但影响后果较轻的管道 (如第 86 段管道)比破坏可能性较低但影响后果较严重的管道 (如第 122 段管道)的综合健康度低,将被优先检测;破坏可能性较低和影响后果较轻的管道 (如第 1、82、119、121 段管道),检测的优先度相对靠后。

根据城市污水腐蚀介质对污水管道混凝土强度的作用规律研究可知^[3],随着运行时间的增长,混凝土损伤增大,污水管道结构失效概率将增大,结构可靠指标减小,污水管道的结构因素的健康状况总体上都会变差,从而影响综合健康度及健康等级,因此,在各个时间段,管道检测的优先顺序应根据相应时间段的健康度排序来确定。如在基准年、第 10 年、第 20 年、第 30 年、第 40 年、第 50 年,第 82 段管道健康等级的变化趋势是: 级 → 级 → 级 → 级 → 级 → 级,而第 120 段管道健康等级的变化趋势是: 级 → 级 → 级 → 级 → 级 → 级。

4 结论

灰色关联度可以作为衡量污水管道健康状况的指标,依据灰色关联度的大小可以得到污水管道的预报健康度排序,由此可以确定污水管道检测的优先顺序,健康排序在最后的管道将最先被检测。

在灰色关联综合评价法中,把模的大小和夹角的大小结合起来,可以较全面地反映出污水管道与虚拟最健康管道之间的接近程度。本文计算得到的预报健康度是一个相对的概念,只是评价研究区域内不同管段污水管道的相对健康状况,不同城市和区域由于虚拟最健康管道指标集的不同,其健康度评价结果也不同。

如采用实际健康度校核预报健康度,调整预报健康度评价指标的权重和评价结果的聚类区间,可得到与污水管道实际健康状况更接近的预报健康度。本文提出的污水管道预报健康度评价的指标体系具有较强的实践应用价值,能够较全面地表征污水管道的健康状况,构建的预报健康度灰色关联综合评价模型,能够较好地预测污水管道的整体健康状况,可为管道检测提供依据。

致谢:郭益硕士参与本文的编程和计算工作。

参考文献:

- [1] MacLeod CW, Ariaratnam S T, Chua K. Evaluation of emergency repair attributes for sewer infrastructure management [A]. Proceedings of CSCE 2000 Conference [C]. Toronto, Canada: Canadian Society for Civil Engineering, 2000.
- [2] Cardoso M A, Coelho S T, Mats J S, et al. A new approach to the diagnosis and rehabilitation of sewerage systems through the development of performance indicators [A]. Proceedings of the Eighth International Conference on Urban Storm Drainage [C]. Sydney, Australia: IEA, AHR and AWQ, 1999.
- [3] Yan Wen-tao, He Qiang, Long Teng-rui, et al. Effects of corrosive medium in domestic sewage on concrete strength [J]. J Cent South Univ Technol, 2006, 22 (21): 484 - 489.

电话: 13808359015

E-mail: yan24839@vip. sina. com

收稿日期: 2008 - 10 - 19

(上接第 96 页)

降解腐殖酸的过程中, AOC 先升高后降低,说明在 TiO_2 光催化氧化过程中,腐殖酸首先被氧化成可生物降解的小分子有机物,然后被进一步氧化。

参考文献:

- [1] Li X Z, Fan C M, Sun Y P. Enhancement of photocatalytic oxidation of humic acid in TiO_2 suspensions by increasing cation strength [J]. Chemosphere, 2002, 48 (4): 453 - 460.
- [2] Liu G, Zhang X, Talley J W, et al. Effect of NOM on arsenic adsorption by TiO_2 in simulated As(III)-contaminated raw waters [J]. Water Res, 2008, 42 (8 - 9): 2309 - 2319.
- [3] Rincón A G, Pulgarin C. Effect of pH, inorganic ions, organic matter and H_2O_2 on *E. coli* K12 photocatalytic inactivation by TiO_2 : Implications in solar water disinfection [J]. Appl Catal B: Environ, 2004, 51 (4): 283 - 302.

- [4] Uyguner C S, Bekbolet M. A comparative study on the photocatalytic degradation of humic substances of various origins [J]. Desalination, 2005, 176 (1 - 3): 167 - 176.
- [5] Edzwald J K, Tobiasson J E. Enhanced coagulation: US requirements and a broader view [J]. Water Sci Technol, 1999, 40 (9): 63 - 70.
- [6] Huang X, Leal M, Li Q. Degradation of natural organic matter by TiO_2 photocatalytic oxidation and its effect on fouling of low-pressure membranes [J]. Water Res, 2008, 42 (4 - 5): 1142 - 1150.
- [7] Wiszniowski J, Robert D, Sumacz-Gorska J, et al. Photocatalytic decomposition of humic acids on TiO_2 : Part I. Discussion of adsorption and mechanism [J]. J Photochem Photobiol A: Chem, 2002, 152 (1 - 3): 267 - 273.

电话: 13704802868

E-mail: wshyxj@126. com

收稿日期: 2008 - 10 - 28