城市污水管道维护优化决策模型的研究

颜文涛[1,2]， 陈朝晖[3]， 龙腾锐[2]， 何 强[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: 在研究污水管道维护费用函数的基础上，提出了城市污水管道维护优化决策模型，并运用该优化决策模型对四川岳池城东新区 123段城市污水管道进行了维护优化决策。优化决策结果为：需采取维护措施的污水管道共 19段，约占总管段数的 15. 44%，其中两段污水管道采取“更新”方案、两段污水管道采取“软管内衬”方案、15段污水管道采取“清淤”方案；其余 104段污水管道无需采取维护措施而只例行检查。实例计算结果表明：应用城市污水管道维护优化决策模型得到的决策是有效的，可为污水管道的维护提供决策支持。

关键词: 污水管道维护; 维护费用函数; 维护优化决策模型; 最优决策
中图分类号: X703 **文献标识码**: C **文章编号**: 1000 - 4602(2009)05 - 0095 - 05

Research on Municipal Sewer Maintenance Optimization Decision Model

YAN Wen-tao[1,2], CHEN Zhao-hui[3], LONG Teng-rui[2], HE Qiang[2]
(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: Based on the research on maintenance cost functions of sewers, a municipal sewer maintenance optimization decision model was established and used to perform the maintenance optimization decision of 123 sections of sewers at the New Eastern District of Yuechi County, Sichuan Province. There are 19 sections that need to be maintained, being about 15. 44% of the total sections, among them 2 sections need to be replaced, 2 sections need to be lined with flexible liner, and 15 sections need to be dredged. The other 104 sections need not to be maintained. It is concluded that the decision made by municipal sewer maintenance optimization model is effective, and the model can provide decision support for sewer maintenance.

Key words: sewer maintenance; maintenance cost function; maintenance optimization decision model; optimal decision

对污水管道的腐蚀机理及模型进行研究，目的是得到污水管道的预报健康度，并进而通过检测和评价得到污水管道的实际健康度，其最终目的是在多种可行的维护方案中选择一个合理的主动维护方案[1~3]。笔者讨论的局部维护方案考虑了非开挖维护技术的管道清淤和软管内衬法，综合起来共有 4

基金项目: 教育部重点科研项目(科技司[2000]156)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

种维护方案:“不处理”方案、“管道清淤”局部维护方案、“软管内衬法”局部维护方案、“更新”方案。根据每段污水管道的健康度评价结果,确定合理的维护方案,实际上是总预期费用最小的优化问题,是一类确定型决策问题[4,5]。

1 维护优化决策模型

1.1 费用函数

在建立优化决策模型前,需要先讨论第 i管段的预期费用函数(EL_i),包括检测费用 CI_i、计划维护费用 CR_i及破坏费用 CF_i。

① 检测费用 CI_i

CI_i与管道管径 D_i、交通状况 T_i有关,假设 T_i对 CI_i影响较小,通过对污水管道 CI_i的分析,则污水管道检测费用 CI_i为:

$$CI_i = f_1(D_i) = 1\,000\alpha \cdot L_i \cdot D_i \quad (1)$$

式中 α——单位管道检测费用,元/(m·mm)

L_i——第 i段管道的检测长度,m

D_i——第 i段管道的管径,m

② 计划维护费用 CR_i

a 当采用“不处理”方案时,$CR_i = 0$;

b 当采用“管道清淤”局部维护方案时,维护费用 CR_i为:

$$CR_i = 1\,000\beta \cdot RL_i \cdot D_i \quad (2)$$

式中 β——单位管道清淤费用,元/(m·mm)

RL_i——第 i段管道的维护长度,m

c 当采用“软管内衬法”局部维护方案时,根据不同管径的管道采用“软管内衬法”的维护费用占新建管道投资的百分比[6],可得到计划维护费用 CR_i:

$$CR_i = f_2(CO_i) = p \cdot RL_i \cdot CO_i = (1.035\,4 - 1.32D_i + D_i^2) \cdot RL_i \cdot CO_i \quad (3)$$

式中 p——维护费用占新建管道投资的百分比

RL_i——第 i段管道的维护长度,m

CO_i——第 i管段单位长度的造价,元/m

d 当采用“更新”方案时,其维护费用除了包含新建管道费用外,还应包括对已破坏管道的处理费用、开挖已硬化地面的费用等,其维护费用 CR_i为:

$$CR_i = f_3(CO_i) = \gamma \cdot RL_i \cdot CO_i \quad (4)$$

式中 γ——管道更新费用与新建管道投资的比率,其取值为 1.1~1.3[7]

RL_i——第 i段管道的新建长度,m

③ 破坏费用 CF_i

第 i管段的破坏费用 CF_i包括污水管道直接损失费用和间接损失费用。当污水管道实际健康度为 0时(极端状况),管道的破坏费用最大(CF_{imax});当实际健康度为 1时,管道的破坏费用最小(0),因此破坏费用 CF_i可简化为:

$$CF_i = (1 - v_i) \cdot CF_{imax} = (1 - v_i) \cdot \delta \cdot RL_i \cdot CO_i \quad (5)$$

式中 $RL_i \cdot CO_i$——新建管道的费用

δ——第 i管段的区域破坏影响系数(又称惩罚系数)

$1 - v_i$——第 i管段的综合破坏程度

v_i——第 i管段的实际综合健康度

1.2 维护决策优化模型

按第 i管段总预期费用 EL_i最小这一原则确定管段 i的维护方案。

目标函数为:

$$EL_{ki} = CI_i + CR_{ki} + CF_{ki} \quad (6)$$

式中 EL_{ki}——第 i段管道第 k个维护方案的总预期费用

CR_{ki}——第 i段管道第 k个维护方案的维护费用

CF_{ki}——第 i段管道第 k个维护方案的预期破坏费用

约束条件为:

$$CI_i + CR_i < CF_{imax} = \delta \cdot RL_i \cdot CO_i \quad (7)$$

根据约束条件以及国外相关城市污水管道的破坏费用数据,δ取 1~5。

所以,计划维护最优方案 k_0为:

$$k_0 = \min\{k : EL_{ki}\} \quad (8)$$

1.3 最优决策

最优决策其实是优化模型的求解问题,污水管道维护决策优化模型的解即为最优决策。

在模型求解之前,需要先确定各个费用函数的系数,即模型求解的假设条件为:①污水管道的检测费用按 CCTV检测技术的费用确定,其单位检测费用 α取 0.072元/(m·mm);②通过调查,高压水车射流清洗技术的单位清淤费用 β取 0.25元/(m·mm);③模型中的管道检测长度与维护长度一致,即 $L_i = RL_i$;④管道更新费用与新建管道投资的比率 γ取 1.15;⑤考虑实际地方的社会、环境、经济状况,在满足式(7)的约束条件下,惩罚系数 δ取 1.6;⑥采取局部维护方案后,污水管道的实际综合健康度

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可达到较健康状况,v_i的取值约为 0.80,采取更新维护方案后新管道的实际健康度为 1;⑦局部维护均为非开挖维护技术,因此在施工中污水基本没有泄漏,不对环境造成影响。根据上述假设确定了费用函数的各个系数后,即可得到各种维护方案的费用(见表 1)。

表 1　不同维护方案的三项费用计算

Tab. 1　Costs of various maintenance schemes

方案序号	维护方案	预期费用		
		检测费用 CI_i	维护费用 CR_i	破坏费用 CF_i
1	不处理	$72 \cdot \mathbf{L}_i \cdot D_i$	0	$1.6(1-v_i) \cdot RL_i \cdot CO_i$
2	清淤	$72 \cdot \mathbf{L}_i \cdot D_i$	$250 \cdot RL_i \cdot D_i$	$0.32 \cdot RL_i \cdot CO_i$
3	软管内衬	$72 \cdot \mathbf{L}_i \cdot D_i$	$(1.0354-1.32D_i+D_i^2) \cdot RL_i \cdot CO$	$0.32 \cdot RL_i \cdot CO_i$
4	更新	$72 \cdot \mathbf{L}_i \cdot D_i$	$1.15 \cdot RL_i \cdot CO_i$	0

将表 1每个维护方案的三项费用相加即可得第 i管段第 k种维护方案的总预期费用 EL_{ki}。在满足约束条件的前提下,根据式(8)可得到第 i管段的最优维护方案 k_0,按下式可得到整个污水管网在采用最优维护决策后的总维护费用。

$$L = \sum_{i=1}^{n} (\min EL_{k_0 i}) \tag{9}$$

2　实例研究

通过对运行了 10年(2006年)的四川岳池城东新区城市污水管道进行预报健康度评价,确定污水管道检测的优先顺序;然后通过采用 CCTV技术对该区的 123段城市污水管道进行实际检测,进行实际综合健康度评价,并建立了维护优化决策模型(只考虑了非开挖维护技术的管道清淤和软管内衬法两种措施),对优化决策的结果进行分析。最优决策的统计结果见表 2。

由表 2可知,实际综合健康等级为Ⅳ级的污水管道共 10段,均采取局部维护或更新措施,约占总管段数的 8.13%,其中采用"更新"方案的污水管道共两段,主要是地质原因造成的管道下陷和节点断开,无法采用其他方案进行局部维护,并且破坏费用较大;采取"软管内衬"方案的污水管道共 1段(第 86段管道),主要破坏类型为"裂缝";采取"清淤"方案的污水管道共 7段,主要破坏类型为"沉积物"。实际综合健康等级为Ⅱ级的污水管道共 21段,其中采取局部维护措施的污水管道共 9段,约占总管段数的 7.31%,主要破坏类型为"沉积物"和"裂缝",且多为深埋、大管径的污水管道,破坏费用 CF_i较大,其余 12段均采取"不处理"方案;而实际综合健康等级为Ⅰ级、Ⅱ级的污水管道共 92段,均采取"不处理"方案。综上所述,采取维护措施的污水管道共 19段,约占总管段数的 15.44%,其中采取"更新"方案的污水管道共两段、采取"软管内衬"方案的污水管道共两段、采取"清淤"方案的污水管道共 15段;采取"不处理"方案的污水管道共 104段,约占总管段数的 84.56%,即不采取任何维护措施而只例行检查。

表 2　最优维护决策统计结果(2006年)

Tab. 2　Statistical results of optimal maintenance decision (year 2006)

实际综合健康等级	最优维护决策	管段数量	比例/%
Ⅳ级	清淤	7	5.69
Ⅳ级	软管内衬	1	0.81
Ⅳ级	更新	2	1.63
Ⅳ级	不处理	0	0.00
小计		10	8.13
Ⅱ级	清淤	8	6.50
Ⅱ级	软管内衬	1	0.81
Ⅱ级	更新	0	0.00
Ⅱ级	不处理	12	9.76
小计		21	17.07
Ⅰ级、Ⅱ级	不处理	92	74.80
合计		123	100.00

假设通过传统维护方法的简单疏通后污水管道的健康度达到 0.6,且疏通费用相当于清淤费用的 25%,通过计算得到该 19段管道采取传统维护方法的总预期费用为 432.13万元,而采取上述最优决策维护方法的总预期费用为 307.99万元,减少了 124.14万元;通过上述最优决策维护方法的总维护费用为 114.30万元,采取传统维护方法的总维护费用为 74.09万元,增加了 40万元。上述结果表明,尽管采取最优决策后总维护费用增加了 40万元,但减少了 124.14万元的总预期费用,因此污水管道维护优化决策模型是有效的。

3　讨论

①　模型参数的敏感性

由于污水管道维护优化决策模型中的参数(α、β、γ、δ)均是根据具体情况得到的估计值,那么计算的最优解也是估计值,因此需讨论各参数的变化(估计的误差、维护措施的不同以及地区的差异等

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

会引起参数的变化)对上述结果的影响程度。

通过计算参数变化率(±50%、±20%、±10%、0)对决策结果的影响程度,可以了解模型中的参数跟决策结果之间的灵敏度关系,从而确定各个参数的最优域值,为决策提供参考依据。敏感性分析的结果见表 3。

表 3 维护优化决策模型参数的敏感性分析

Tab. 3 Parameter sensitivity analysis of maintenance optimization decision model

决策结果变化率	参数变化率						
	+50%	+20%	+10%	0	- 10%	- 20%	- 50%
R_α	0	0	0	0	0	0	0
R_β	- 5. 26%	- 5. 26%	- 5. 26%	0	0	+5. 00%	13. 64%
R_γ	×	0	0	0	0	+10. 52%	+90. 00%
R_δ	+25. 00%	+9. 52%	0	0	- 10. 53%	×	×

注: ×表示该参数的变化率不满足约束条件; R_α、R_β、R_γ、R_δ 分别表示参数 α、β、γ、δ的变化率对决策结果的影响程度。

参数 α、β、γ、δ的基准值分别为 0. 072、0. 25、1. 15、1. 6,由于决策结果是最优维护方案,因此影响程度采用结果的变化率表示(以参数 α为例进行说明)。

$$R_\alpha = \pm S_\alpha / (S + S_\alpha) \tag{10}$$

式中 S——α在基准值及一定的变化率时(其他参数不变),通过优化决策后采取的维护措施相同的管段数

S_α——α在基准值及一定的变化率时(其他参数不变),通过优化决策后采取的维护措施不相同的管段数

上述"采取的维护措施"是指采取维护行动的管段,不含"不处理"方案的管段。当 α在一定变化率时(其他参数不变)通过优化决策后采取维护措施的管段数少于基准值时采取维护措施的管段数,式(10)则取负号。R_β、R_γ、R_δ 的含义同 R_α。

从表 3可知,在参数增大的方向上,决策结果对惩罚系数 δ的变化最敏感,其次是单位清淤费用 β,决策结果对管道更新费用与新建管道投资的比率参数 γ和单位检测费用 α的变化都不敏感;在参数减小的方向上,决策结果对参数 γ的变化最敏感,其次是惩罚系数 δ和单位清淤费用 β,决策结果对参数 α的变化不敏感。

② 模型参数的最优域

保持污水管道维护最优决策基本不变时(决策结果变化率 <5%),各个参数允许的最大变化范围称为优化决策模型参数的最优域。当参数估计值在最优域内时,说明决策结果是有效的,否则就要重新进行决策优化,然后选择最优方案。

由于单位检测费用 α对决策结果无影响,因此不存在最优域的问题;单位清淤费用 β若大于 0. 45,将不满足约束条件,若小于 0. 16,则决策结果变化率 R_β 将大于 5%,因此确定其最优域为(0. 16, 0. 45),即如果 β估计不准确,但只要在最优域的范围内,则与参数在基准值时的决策结果是基本一样的;管道更新费用与新建管道投资的比率 γ若大于 1. 38,将不满足约束条件,若小于 0. 98,则决策结果变化率 R_γ 将大于 5%,因此确定其最优域为(0. 98, 1. 38);惩罚系数 δ若小于 1. 40,则不满足约束条件,若大于 1. 84,则决策结果变化率 R_δ 将大于 5%,因此确定其最优域为(1. 40, 1. 84)。

4 结论

① 通过分析费用函数,基于实际健康度提出了城市污水管道维护优化决策模型,既考虑了把维护工作重点放在有早期破坏趋势的管道上,又考虑了维护费用的节约。实例计算结果表明,根据提出的城市污水管道维护优化决策模型得到的决策是有效的,可为城市污水管道维护提供决策支持。

② 优化决策模型中,惩罚系数 δ与管道破坏后对区域环境和社会的影响相关,管道对区域环境和社会的影响越大,惩罚系数选取越大;当惩罚系数 δ增大时采取维护措施的管段数将增加,当惩罚系数 δ减小时"不处理"方案的管段数将增加。

系数 $(1 - v_i)$表示第 i管段的综合破坏程度,与管道状态因素及管道的局部环境社会因素有关,管道状态越差,其对局部环境和社会的影响越大,$(1 - v_i)$将越大。因此维护优化决策模型得到的决策结果实际上是基于经济、环境和社会效益综合最优的维护方案。

③ 若上述优化决策模型中考虑其他可行的维护措施,则优化决策模型中还应补充相应维护方案及其维护费用,然后再进行决策分析,并选择最优方

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

案;若考虑各种局部维护措施的使用寿命,则在维护费用中应补充考虑使用年限的现值维护费用;由于采取不同局部维护方案后的综合健康度实际上是不同的,若进一步考虑采取不同局部维护方案后的破坏费用 (可能是不同的),就需修改表 1中的破坏费用,然后再进行决策分析。

④ 随着污水管道运行时间的增加,由于传统维护方法是一种被动维护方法,其总预期费用将变得更大,故采用维护优化决策方法将有更大的价值。

致谢:郭益硕士参与本文的编程和计算工作。

参考文献:

[1] 颜文涛,龙腾锐,何强,等. 生活污水腐蚀介质对混凝土强度作用规律研究 [J]. 中国给水排水, 2006, 22 (z1): 109 - 114.

[2] 王永恒,刘继香. 寒冷地区污水管道浅埋的追踪观察 [J]. 中国给水排水, 2001, 17 (7): 74 - 76.

[3] 何强,龙腾锐. 水污染控制规划的数值管理研究 [J]. 中国给水排水, 2001, 17 (7): 14 - 16.

[4] 韦鹤平. 环境系统工程 [M]. 上海:同济大学出版社, 1993.

[5] 曾波,施青军. 城市污水处理与中水回用系统分析与优化 [J]. 中国给水排水, 2002, 18 (6): 82 - 84.

[6] 冯士明,王宗玉,钱茹. 国外管道修复工程的技术经济分析 [J]. 管道技术与设备, 1998, (5): 10 - 12.

[7] Gupta B S, Chandrasekaran S, Ibrahim S. A survey of sewer rehabilitation in Malaysia: application of trenchless technologies[J]. Urban Water, 2001, 3 (4): 309 - 315.

电话: (023) 86868158　13808359015

E - mail: yan24839@vip. sina. com

收稿日期: 2008 - 09 - 30

(上接第 94页)

用水量为 445. 96 ×10^4 m^3 /d,其中工业用水量所占比例超过用水总量的 50%,公建用水量与现状相比有较大幅度的增加;对自来水、再生水、海水进行综合配置,得出 2020年滨海新区自来水总需水量为 251. 58 ×10^4 m^3 /d。

② 根据滨海新区供水设施现状及规划情况,对系统中各水厂的供水量进行优化,并用 MATLAB对所建优化模型进行求解,得到优化后各水厂向各用水区块的供水量,最终确定在滨海新区内新建 2座水厂、扩建 6座水厂、其余 4座水厂暂时维持现状。

参考文献:

[1] 张雅君,刘全胜. 需水量预测方法的评析与择优 [J]. 中国给水排水, 2001, 17 (7): 27 - 29.

[2] 李斌,柏光明. 灰色 —神经网络组合模型预测城市用水量 [J]. 中国给水排水, 2002, 18 (2): 66 - 68.

[3] 单金林,戴雄奇. 利用 BP网络建立预测城市用水量模型 [J]. 中国给水排水, 2001, 17 (8): 61 - 63.

[4] 李红艳,崔建国,张星全. 城市用水量预测模型的优选研究 [J]. 中国给水排水, 2004, 20 (2): 41 - 42.

[5] 刘洪波,田林. 人工神经网络法预测时用水量 [J]. 中国给水排水, 2002, 18 (12): 39 - 41.

[6] 李琳,左其亭. 城市用水量预测方法及应用比较研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16 (3): 6 - 10.

[7] 吴育华,杜纲. 管理科学基础 [M]. 天津:天津大学出版社, 2004.

电话: (022) 28011807　13821452510

E - mail: katharinekate@163. com

收稿日期: 2008 - 09 - 04

国家对水资源依法实行取水许可制度和有偿使用制度

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net