

基于马尔可夫链的埋地燃气钢管管壁腐蚀预测

袁 赓^{1,2}, 王树刚³, 黄 一¹

(1. 大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024, yuangeng888@sohu.com; 2. 中国燃气控股有限公司, 广东 深圳 518033; 3. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 为适时对埋地燃气钢管腐蚀与防护系统现状进行科学评价, 建立一种埋地燃气钢管管壁腐蚀状况预测模型. 应用钢质管道管体腐蚀损伤评价方法和马尔可夫链理论, 阐述利用转移概率矩阵对管壁腐蚀状况进行预测的方法. 以某一埋地燃气管线为预测实例, 计算获得该管线管壁腐蚀状态分布的预测值. 结果显示, 对该管壁腐蚀检测的最后腐蚀状态的计算值与实际检测值对应的腐蚀状态相吻合, 同时预测结果也与拟合腐蚀深度常用的指数函数式预测的最大腐蚀深度计算值相一致. 表明将马尔可夫链应用于管壁腐蚀状况预测是可行的, 从而为合理确定管道检测和维修周期提供理论依据.

关键词: 腐蚀; 马尔可夫链; 钢管; 预测

中图分类号: TE988. 2; TU996. 7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)08-1328-04

Application of Markov chain in prediction of corrosion conditions for buried gas steel pipeline

YUAN Geng^{1,2}, WANG Shu-gang³, HUANG Yi¹

(1. Dept. of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China, yuangeng888@sohu.com; 2. China Gas Holdings Ltd., Shenzhen 518033, China; 3. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A prediction model of corrosion conditions is developed for buried gas steel pipelines in order to evaluate opportunely the existing states of their corrosion and prevention. A method of predicting corrosion states for the wall of buried gas pipelines by transition probability matrices is described by applying the evaluation method of corrosion damage of steel pipelines and the theory of Markov chain. Taking a buried gas pipeline for example, the corrosion states for the wall of the pipeline are predicted. It is shown that the calculated state for the latest detection of this pipe wall corrosion has a good agreement with corresponding state for its detected value and all predicted results also have an agreement with the corrosion depth calculated by the exponential function that commonly fits the max corrosion depth, which demonstrates that application of Markov chain in the prediction of corrosion is effective for buried pipelines. Thus it provides a theoretical basis for reasonable detection and maintenance period of buried gas pipelines.

Key words: corrosion; Markov chain; steel pipeline; prediction

埋地燃气金属管道因腐蚀穿孔发生的突发性漏气事故, 除造成巨大的经济损失和污染环境外, 还会引起爆炸和火灾, 造成人员伤亡和财产损失. 因此, 建立一种埋地燃气钢管管壁腐蚀状况预测

模型是必要的. 国内外有许多评价管道剩余使用寿命的报道, 主要评价和预测评估方法有电化学分析法、灰色系统预测方法、概率统计方法、人工神经网络预测方法、管道腐蚀信息熵及可靠度函数分析方法等. 但在实际预测中, 这些方法均需要大量的数据, 而这些数据往往很难获得. 马尔可夫链理论作为运筹学中的一种有效预测方法, 所需

收稿日期: 2008-08-12.

作者简介: 袁 赓(1966—), 男, 博士研究生;

王树刚(1963—), 男, 教授, 博士生导师;

黄 一(1964—), 男, 教授, 博士生导师.

数据少,而且随着原始数据的增加,预测的准确度会越来越高.最早应用非齐次马尔可夫过程模拟金属的蚀坑增长是由文献[1]报道的,但文中没有涉及点蚀发生过程.文献[2-3]利用波松过程和马尔可夫过程的复合过程分别模拟点蚀诱发和增长两个阶段,但其模型预测蚀坑深度平均值的生长取决于蚀坑深度的离散状态总数.文献[4-5]发展了点蚀诱发和增长模拟的新模型,并应用极值统计学确定多种蚀坑的最大深度分布.针对埋地钢管,文献[6]提出了预测油气管线管内蚀坑增长的统计性模型,体现了总体蚀坑增长速率的概率特征.该模型基于几点假设,如管线钢类型不影响腐蚀速率; H_2S 和 CO_2 的浓度不为零等,同时还考虑了点蚀速率的变化及其影响参数.文献[7]应用马尔可夫链理论,建立了燃气管道外防腐层老化状况的预测模型.

金属的点蚀具有随机性质已得到较广泛的认可.而应用马尔可夫过程研究埋地钢管管体腐蚀损伤的报道还较少.为此,本文着重讨论马尔可夫链在管壁腐蚀损伤预测中的应用.

1 马尔可夫链模型

令 $\{X_n, n = 1, 2, \dots\}$ 为一离散的随机变量序列, n 表示每一变量值 X_n 所对应的时间点.所有 X_n 能取到状态的全体称为状态空间,记为 E .对任意的正整数 n 及任意的状态 $i_1, i_2, \dots, i_n, i_{n+1} \in E$,如果 $\{X_n\}$ 具有以下性质:

$$P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n, \dots, X_2 = i_2, X_1 = i_1) = P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n),$$

则由 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 构成随机过程称为马尔可夫链^[8].式中 $P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n)$ 称为转移概率.

马尔可夫链应用在燃气钢管管壁腐蚀状况预测模型中,认为系统的将来状态只取决于当前状态,而与过去的状态无关.为了描述埋地管道管壁腐蚀状况随时间变化过程,需要建立状态转移概率矩阵.假设转移概率 $P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n)$ 不随着 n 的变化而变化,即转移概率不随时间变化,说明一步转移概率是不变的.对任意的状态 $i, j \in E$,一步转移概率表达式为

$$P_{i,j} = P(X_{n+1} = j | X_n = i) = P(X_2 = j | X_1 = i) = M_{i,j} / M_i. \quad (1)$$

式中: $P_{i,j}$ 为已知 $X_n = i$ 的条件下, $X_{n+1} = j$ 的转移概率; $M_{i,j}$ 为从状态 i 经过一步转移到状态 j 的转移次数; M_i 为处于状态 i 的次数.

一步转移概率矩阵通常由 $m \times m$ 方阵 P 来表

示, m 为被划分的状态数,即

$$P = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,m} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m,1} & P_{m,2} & \dots & P_{m,m} \end{bmatrix}.$$

转移概率矩阵 P 有下列性质:

$$\sum_{j=1}^m P_{i,j} = 1, i = 1, 2, \dots, m;$$

$$0 \leq P_{i,j} \leq 1, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m.$$

系统处于任一初始状态,经过 n 步,必定处于某状态.已知一步转移矩阵 P 、 n 步转移矩阵 $P^{(n)}$ 可由切普曼-柯尔莫哥洛夫方程计算: $P^{(n)} = P^{(n-1)}P = P^n$.假设系统处于某一初始状态,记为 S_0 ,经过 n 步,所处状态 S_n 可用式(2)计算.

$$S_n = S_0 P^{(n)} = S_0 P^n. \quad (2)$$

2 管壁腐蚀状况评价标准与转移矩阵

为了应用马尔可夫链理论预测埋地燃气管管壁腐蚀状况,需要确定管壁腐蚀状态.在管壁腐蚀中占较大比例的是点蚀,而在发生点蚀的情况下,管网的可靠性不取决于蚀坑平均深度,而取决于最大蚀坑深度^[9].

依据国家现行标准《钢质管道管体腐蚀损伤评价方法》SY/T6151的规定,采用最大蚀坑深度指标定性判定,将管壁腐蚀程度划分为轻、中、重、严重、穿孔5种状况,如表1^[10]所示,分别对应状态1、状态2、状态3、状态4、状态5.

表1 管体腐蚀损伤评价

级别	最大蚀坑深度/mm
轻	<1
中	1~2
重	2~50%壁厚
严重	50%~80%壁厚
穿孔	>80%壁厚

当埋地燃气钢管原始壁厚确定之后,其最大蚀坑深度评价标准具体数值即能确定.例如,对燃气管线($\Phi 720 \times 8$)进行管壁腐蚀状态划分(原始壁厚为8 mm),如表2所示.

表2 管壁腐蚀状态

级别	最大蚀坑深度/mm	管壁腐蚀状态
轻	<1	1
中	1~2	2
重	2~4	3
严重	4~6.4	4
穿孔	>6.4	5

当管壁腐蚀状况被划分为5个状态后,其转移矩阵 P 的形式如下

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} \end{bmatrix}$$

根据燃气钢管管壁最大腐蚀深度检测数据,确定其腐蚀状态,计算处于各状态的次数和各状态之间转移的次数,利用式(1)求解出所有的 $P_{i,j}$,进而构造出转移矩阵 P . 将预测前的最后一次检测数据作为初始状态 S_0 ,可以利用式(2)对管壁腐蚀状况的发展进行预测.

3 管壁腐蚀状况预测

3.1 模型验证

表3^[11]为某输气管道($\Phi 720 \times 8$)在不同时间测得的最大腐蚀深度检测数据.

表3 最大腐蚀深度数据

时间/a	最大腐蚀深度/mm
1	0.90
2	1.05
3	1.23
4	1.78
5	1.95

为了求得转移矩阵 P ,需要先求得管壁腐蚀状况对应的5个状态.为此,利用表3提供的埋地时间为1~5年的最大腐蚀深度数据,采用曲线拟合法得出最大腐蚀深度随时间变化的常用指数函数式

$$\delta = 0.709 4e^{0.207 4t} \quad (3)$$

式中: δ 为最大腐蚀深度,mm; t 为埋地时间,年.式(3)中相关系数 $R^2 = 0.965 4$.

时间 t 依次取值 1, 2, ..., 利用式(3)计算最大腐蚀深度,并根据表2确定管壁腐蚀状态,直到腐蚀状态变化到5为止.燃气钢管管壁从状态1到状态5变化过程的计算结果列于表4,时间 t 为

表5 管壁腐蚀状态分布概率预测值(初始状态为1)

时间/a	状态1	状态2	状态3	状态4	状态5	最大概率状态
2	0.250	0.625	0.125	0	0	2
3	0.125	0.594	0.240	0.041	0	2
4	0.063	0.508	0.309	0.100	0.021	2
5	0.031	0.412	0.334	0.152	0.071	2

3.2 管壁腐蚀状况预测

以预测前最近的第5年检测最大腐蚀深度为

0年时,管壁未发生腐蚀,即为原始状态,亦定义为状态1.

利用式(1)和表4中数据,计算 P_{11} ,处于状态1的次数为2,从状态1向状态1转移次数为1,则 $P_{11} = 1/2$. 计算 P_{12} ,处于状态1的次数为2,从状态1向状态2转移次数为1,则 $P_{12} = 1/2$. 同理,可以计算出转移矩阵 P 中其他概率值,从而得到转移矩阵 P ,即

$$P = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3/4 & 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2/3 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表4 管壁腐蚀状态变化值

时间/a	最大腐蚀深度/mm	状态
0	0	1
1	0.87	1
2	1.07	2
3	1.32	2
4	1.63	2
5	2.00	2
6	2.46	3
7	3.03	3
8	3.73	3
9	4.59	4
10	5.64	4
11	6.95	5

以管壁原始状态为预测的初始状态,其腐蚀状况为状态1,写成向量形式为 $S_0 = [1, 0, 0, 0, 0]$. 应用马尔可夫链理论对管壁腐蚀状态分布进行预测,即利用式(2)进行计算,得到预测值如表5所示.从表5中看出,时间为5年时,管壁进入了腐蚀状态2,并且管道发生穿孔概率为0.412.该预测值与表3中第5年检测数据对应的腐蚀状态相吻合,因此,证实了将马尔可夫链应用于管壁腐蚀状况预测是可行的.

预测的初始状态,其腐蚀状况为状态2,写成向量形式为 $S_0 = [0, 1, 0, 0, 0]$ (注意表4中拟合的

第5年最大腐蚀深度值为2.00 mm,而实际检测值为1.95 mm,在工程允许精度范围内它们同属于状态2,第1至第4年的最大腐蚀深度值也是如此。利用式(2)进行计算,得到预测值如表6所示。可以看出,时间为11年时,管壁进入了腐蚀状

态5,表明管道可能发生穿孔,其概率为0.333。该预测结果与拟合腐蚀深度常用的指数函数式所预测的最大腐蚀深度计算值(见表4)相一致,表明了应用马尔可夫链理论预测管壁腐蚀状态的可靠性。

表6 管壁腐蚀状态分布概率预测值(初始状态为5)

时间/a	状态1	状态2	状态3	状态4	状态5	最大概率状态
6	0	0.750	0.250	0	0	2
7	0	0.563	0.355	0.083	0	2
8	0	0.422	0.379	0.158	0.041	2
9	0	0.316	0.359	0.204	0.121	3
10	0	0.237	0.320	0.221	0.223	3
11	0	0.178	0.274	0.216	0.333	5
12	0	0.134	0.223	0.198	0.441	5

值得指出的是,表4中的计算结果只能按照指数函数规律变化,必然会出现管壁进入严重腐蚀状态4。而从表6的预测结果可以看出,管壁腐蚀进入状态3(重级别)以后,极有可能经过一定时间就达到状态5(穿孔),而由状态3(重级别)转化到状态4(严重腐蚀)的时间可能不到1年,即少于预测的间隔时间。由此可以得出结论,在该管道运行到第10年时,就需要更换新管。因此,采用马尔可夫链,以预测前的最后一次检测数据作为初始状态,预测埋地燃气管管壁腐蚀状况更具可靠性,并且能够确定出合理的埋管更换时间。

4 结 论

1) 根据管体腐蚀损伤评价标准,将燃气管管壁腐蚀状况按照最大蚀坑深度进行划分,确定为5个腐蚀状态。依据这5个腐蚀状态,构造马尔可夫链预测模型中转移概率矩阵。

2) 利用输气管道的最大腐蚀深度检测数据与拟合腐蚀深度常用的指数函数式计算的最大腐蚀深度值求得转移矩阵中各元素,用所建马尔可夫链预测模型对埋地钢管管壁腐蚀检测的最后腐蚀状态进行预测计算,其计算值与实际检测值对应的腐蚀状态相吻合。

3) 以预测前的最后一次检测数据作为初始状态,应用马尔可夫链模型进行预测的结果表明,管壁腐蚀进入重级别(状态3)以后,在预测间隔时间1年以内有可能越过严重级别(状态4)达到穿孔级别(状态5)。这为管线大修或更换提供了决策依据,以确保管线的使用寿命,保障管道安全运行。

参考文献:

[1] PROVAN J W, RODRIGUEZ III E S. Part I: Develop-

ment of a Markov description of pitting corrosion [J]. Corrosion (Houston), 1989, 45(3): 178 - 192.

- [2] HONG H P. Application of stochastic process to pitting corrosion [J]. Corrosion, 1999, 55(1): 10 - 16.
- [3] HONG H P. Inspection and maintenance planning of pipeline under external corrosion considering generation of new defects [J]. Structural Safety, 1999, 21(3): 203 - 222.
- [4] VALOR A, CALEYO F, ALFONSO L, *et al.* Stochastic modeling of pitting corrosion: A new model for initiation and growth of multiple corrosion pits [J]. Corrosion Science, 2007, 49(2): 559 - 579.
- [5] CALEYO F, VELÁZQUEZ J C, VALOR A, *et al.* Markov chain modelling of pitting corrosion in underground pipelines [J]. Corrosion Science, 2009, 51(9): 2197 - 2207.
- [6] PAPA VINASAM S, DOIRON A, REVIE R W, *et al.* Model predicts internal pitting corrosion of oil, gas pipelines [J]. Oil & Gas Journal, 2007, 105(44): 68 - 73.
- [7] 李恒, 王树刚, 袁赓. 马尔可夫链在燃气管道外防腐层预测中的应用 [J]. 全面腐蚀控制, 2007, 21(6): 11 - 13.
- [8] HILLIER F S, LIEBERMAN G J. Introduction to Operations Research [M]. 8th edition. Boston: McGraw - Hill Higher Education, 2005.
- [9] 王蕾, 李帆. 埋地钢质燃气管道点蚀数据的概率统计分析 [J]. 煤气与热力, 2004, 24(12): 657 - 659.
- [10] 中华人民共和国建设部. CJJ95 - 2003/J273 - 2003 城镇燃气埋地钢质管道腐蚀控制技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [11] 谢英, 袁宗明. 灰色动态模型在预测输气管道腐蚀中的应用 [J]. 西南石油学院学报, 1999, 21(3): 50 - 51.