

# 基于关联分析的多因素灰色模型群应用于注水管道腐蚀速率预测研究

周 昊<sup>1</sup>, 文 涛<sup>2</sup>

(1. 江苏工业学院油气储运省重点实验室, 江苏 常州 213016

2. 川庆钻探工程公司地质勘探开发研究院, 四川 成都 610051)

**摘 要:** 针对油田注水管道中腐蚀速率受到多种因素的影响, 表现出复杂的非线性规律, 腐蚀速率预测较困难的问题, 提出了基于关联分析的多因素灰色模型群预测方法。多因素灰色模型群预测方法通过关联度分析, 对原始数据进行生成处理, 生成具有较强规律性的数据系列, 然后建立相应的灰色预测模型群进行预测。实例应用表明, 基于关联分析的多因素灰色模型群预测方法预测得到的腐蚀速率和实测值能较好吻合, 预测精度较高, 计算所需数据少, 计算量小, 适用于油田注水管道、油气输送管道等复杂腐蚀体系的腐蚀速率预测。

**关键词:** 灰色关联分析; 注水管道; 灰色模型群; 腐蚀预测

**文章编号:** 1006-5539(2009)05-0026-04

**文献标识码:** A

## 0 引言

在客观世界中, 系统中某一时间序列  $X(t)$  的变化、发展通常是许多错综复杂的因素  $X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)$  综合作用的结果, 表现出复杂的非线性规律, 忽略这些因素对系统的影响则会产生较大的误差<sup>[1]</sup>。因此, 在预测工作中, 要求考虑系统时间序列预测值与其相关影响因素的关系。油田注水管道中影响腐蚀的因素较多, 各腐蚀速度影响因素之间相互影响, 具有复杂的非线性规律, 构成了一个异常复杂的腐蚀体系<sup>[2]</sup>。

人们常应用灰色 GM(1, 1)模型进行管道腐蚀速率预测, 然而这种方法仅考虑了单一变量的变化, 没有考虑其他因素变化对腐蚀速率的影响, 在多因素的影响叠加下, 这种单一的固定模式很难准确描述管道腐蚀速率预测的实际复杂变化规律。人工神经网络可以用来建立各种预测指标与影响因素之间的非线性映射, 反映多因素时间序列之间的相互关系, 具有很好的预测效果, 在多因素时间序列预测研

究中得到了普遍的应用。但神经网络方法需要大量的样本数据进行学习, 计算过程较为复杂, 不适用于少数据的腐蚀速率预测<sup>[3-5]</sup>。

基于关联分析的多因素灰色模型群预测方法是通过鉴别系统因素之间发展趋势的相异程度, 即进行关联度分析, 并对原始数据进行生成处理来寻找系统变动的规律, 生成具有较强规律性的数据系列, 然后建立相应的灰色预测模型群进行预测。基于关联分析的多因素灰色模型群预测方法考虑了多因素变化对腐蚀速率的影响, 且不需要过多的样本数据, 适用于少数据的预测问题, 能对中短期的预测以及状态变量的自身预测提供一定的参考价值, 且具有较好的精度。

## 1 基于关联分析的多因素灰色模型群预测方法

### 1.1 状态变量的验证

灰色预测模型预测结果精度的高低, 关键在于

收稿日期: 2009-06-19

作者简介: 周 昊 (1979-) 男, 四川自贡人, 讲师, 硕士, 主要从事油气储运工程教学和科研工作。电话:

13616125790

数据序列的光滑性, 光滑性越好, 预测精度就越高。在实际操作中, 只要数据序列满足准光滑性条件, 就可以直接进行灰色建模。对于给定序列  $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$ , 则称  $\rho(k)$

$$\rho(k) = \frac{x(k)}{\sum_{i=1}^{k-1} x(i)}, \quad k=2, 3, \dots, n \quad (1)$$

为序列的光滑比, 若序列  $X$  满足:

$$a) \frac{\rho(k+1)}{\rho(k)} < 1, \quad k=2, 3, \dots, n-1$$

$$b) \rho(k) \in [0, \varepsilon], \quad k=3, 4, \dots, n$$

$$c) \varepsilon < 0.5$$

则称序列  $X$  为准光滑序列, 该序列可用于灰色建模。

## 1.2 状态变量的确定

影响注水管道腐蚀速率的因素很多, 因此在建模前需要对这些因素进行必要的筛选, 在保证模型有足够精度的前提下简化模型。筛选的原则是考虑各因素对腐蚀速率的影响程度。当影响程度大于某一阈值时, 该因素就作为状态变量进入模型; 如小于该阈值, 就作为干扰因素, 不进入状态变量集。根据灰色关联度分析理论, 可以用两个因素的关联度来衡量某一因素对其他因素的影响程度。

设注水管腐蚀速率数列为:  $X_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\}$ , 各影响因素数列为:  $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ 。则影响因素数列  $X_i$  与腐蚀速率数列  $X_0$  在第  $k$  个点的灰色关联系数定义为:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (2)$$

式 (2) 中  $\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|$  为两级最小差,  $\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|$  为两级最大差,  $\rho$  称为分辨系数,  $0 < \rho < 1$ , 一般取  $\rho = 0.5$ 。综合各序列点 ( $k=1, 2, \dots, n$ ) 的关联系数, 得到整个腐蚀速率数列  $\{X_0(k)\}$  和影响因素数列  $\{X_i(k)\}$  的灰色关联度, 即为:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (3)$$

设  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$  为关联度集合, 取某一阈值  $\delta$ , 对  $R$  作截割得  $R' = \{r_i | r_i \geq \delta\}$  截集,  $R'$  对应的因素就作为状态变量。

## 1.3 单因子预测模型的建立

设  $X_i(t)$  为注水管腐蚀速率状态变量,  $X_i(t) (i=2, 3, \dots, m)$  为影响因素状态变量,  $x_i^{(0)}(k) = \{x_i^{(0)}(1), x_i^{(0)}(2), x_i^{(0)}(3), \dots, x_i^{(0)}(k)\}$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, m$  为腐蚀速率及影响因素状态变量的原始数据序列, 对  $x_i^{(0)}(k)$  做一次累加生成运算, 即可得一次累加生成数列:  $x_i^{(1)}(k) = \{x_i^{(1)}(1), x_i^{(1)}(2), x_i^{(1)}(3), \dots, x_i^{(1)}(k)\}$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, m$

根据灰色理论, 可建立如下联动状态转移方程:

GM(1, m) 模型<sup>[6]</sup>:

$$\frac{dx_i^{(1)}}{dt} + \alpha_1 x_i^{(1)} = \beta_1 x_1^{(1)} + \beta_2 x_2^{(1)} + \dots + \beta_{m-1} x_{m-1}^{(1)} \quad (4)$$

GM(1, 1) 模型:

$$\frac{dx_i^{(1)}}{dt} + a_i x_i^{(1)} = \mu_i, \quad i=1, 2, 3, \dots, m \quad (5)$$

其中  $\alpha_1, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{m-1}$  以及  $a_i, \mu_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$  为待定系数。

求解上述微分方程, 并作离散处理后可得:

$$x_i^{(1)}(k+1) = [x_i^{(0)}(1) - \sum_{i=2}^m \frac{\beta_{i+1}}{\alpha_1} x_i^{(1)}(k+1) + 1] e^{-\alpha_1 k} + \sum_{i=2}^m \frac{\beta_{i+1}}{\alpha_1} x_i^{(1)}(k+1) \quad (6)$$

$$x_i^{(1)}(k+1) = [x_i^{(0)}(1) - \frac{\mu_i}{a_i}] e^{-a_i k} + \frac{\mu_i}{a_i} \quad (7)$$

其中  $i=2, 3, \dots, m$ ;  $k=1, 2, 3, \dots$ ;  $x_i^{(1)}(k+1)$  为  $x_i^{(1)}(k+1)$  的计算值。

累减还原可得:

$$x_i^{(0)}(k+1) = x_i^{(1)}(k+1) - x_i^{(1)}(k) \quad (8)$$

其中  $i=1, 2, 3, \dots, m$

## 1.4 注水管腐蚀速率预测模型的构建

### 1.4.1 影响注水管腐蚀速率的各因素权重的确定

由于各因素之间的相关性相对较低, 所以可以设定腐蚀速率各个影响因素之间相互独立, 可以对腐蚀速率的预测结果进行线性权重累加, 从而确定

各因素综合影响的腐蚀速率预测结果。基于影响因素与腐蚀速率的灰色关联度,确定各影响因素的权重,各因素的权重为:

$$w_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^m r_i} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)} \quad (9)$$

### 1.4.2 注水管腐蚀速率预测模型的构建

由灰色理论的 GM(1, m) 模型,分别预测进入腐蚀速率预测模型的单状态因子变量对腐蚀速率预测值的预测值。分别记为:  $r_i = GM(x_i)$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ), 进入模型各单状态因子变量的权重计为  $w_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ), 腐蚀速率预测模型为:

$$f(r) = \sum_{i=1}^m w_i r_i = \sum_{i=1}^m w_i GM(x_i) \quad (10)$$

## 2 实例应用

为说明本文采用方法的可行性,本文以注水管道腐蚀速率为预测变量,以溶解氧含量、注水 pH 值, SRB(硫酸盐还原菌)个数、注水温度、注水压力,溶解 CO<sub>2</sub> 含量,注水流速为影响因素,原始数据来源于文献<sup>[2]</sup>,见表 1。

表 1 某油田特定实验区某注水管道水质监测数据

序号	溶解氧含量 /mg·L <sup>-1</sup>	注水 pH 值	SRB /个	注水温度 /°C	注水压力 /MPa	溶解 CO <sub>2</sub> 含量 /mg·L <sup>-1</sup>	注水流速 /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	测量腐蚀速率 /mm <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup>
1	0.023	7.14	301	61.4	10.19	2.43	1.043	0.065
2	0.065	7.45	286	59.8	10.48	2.65	1.076	0.078
3	0.104	6.73	188	54.5	10.85	3.23	1.098	0.084
4	0.143	6.66	164	55.03	11.24	3.98	1.125	0.092
5	0.254	6.6	176	54.23	11.75	4.23	1.255	0.099
6	0.456	6.58	206	56.76	11.96	4.56	1.267	0.106

### 2.1 状态变量的验证

建模之前对数据序列进行光滑性检验,检验结果表明,注水管道腐蚀速度可以应用灰色理论进行建模,在各个影响因素变量中,溶解氧含量不符合光滑性条件,所以可用灰色预测进行分析的影响因素变量为注水 pH 值、SRB 注水温度、注水压力、溶解 CO<sub>2</sub> 含量、注水流速。

### 2.2 状态变量的确定

根据灰色关联度理论,可以用两个因素的关联

度来衡量某一因素对其它因素的影响程度。通过灰色关联度分析,确定注水 pH 值、SRB 注水温度、注水压力、溶解 CO<sub>2</sub> 含量、注水流速对腐蚀速率的关联度,进而确定进入预测模型的状态变量。计算得各个状态变量关于腐蚀速率的关联度如表 2 取阈值  $\delta = 0.70$ ,对  $R = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_6\}$  作截割得  $R' = \{r_i \geq \delta\}$ ,  $R'$  对应的影响因素就作为状态变量。对于注水管腐蚀速率各个影响因素的截集为:  $R' = \{r_i \geq \delta\} = \{r_3, r_5, r_6\}$ , 对应的状态变量分别为注水压力、溶解 CO<sub>2</sub> 含量、注水流速。

表 2 各影响因素对腐蚀速率的关联度

影响因素	注水 pH 值 $r_1$	SRB $r_2$	注水温度 $r_3$	注水压力 $r_4$	溶解 CO <sub>2</sub> 含量 $r_5$	注水流速 $r_6$
关联度	0.446 14	0.448 64	0.447 33	0.900 37	0.899 82	0.814 02

### 2.3 构建灰色预测模型群

#### 2.3.1 单因子预测模型的建立

对于上述三个状态变量,分别运用单因子预测模型预测注水管道腐蚀速率,记为  $GM(x_1)$ ,  $GM(x_2)$ ,  $GM(x_3)$ 。

#### 2.3.2 各单因素对于腐蚀速率的权重计算

基于影响因素与腐蚀速率的灰色关联度,进而

确定各影响因素的权重,按式(9)计算各单因素的权重值见表 3。

表 3 各单因素权重值

影响因素	注水压力	溶解 CO <sub>2</sub> 含量	注水流速
权重值	0.344 41	0.344 2	0.311 38

#### 2.3.3 腐蚀速度预测模型的构建

基于各单因素变化对腐蚀速率的预测,进而构

建注水管道腐蚀速率预测模型。模型如下:

$$\begin{aligned} \hat{f}(P) = & \sum_{i=1}^m w_i GM(x_i) = 0.34441 GM(x_1) \\ & + 0.3442 GM(x_2) + 0.31138 GM(x_3) \end{aligned} \quad (11)$$

由式 (11) 计算可得注水管道腐蚀预测速率, 并同文献<sup>[2]</sup>采用的标准 GM(1, 1)、灰色遗传算法和灰色神经网络方法的预测结果相比较见表 4。

## 2.4 结果分析

从预测结果来看, 采用本文方法的预测结果平均相对误差为 2.62%, 标准 GM(1, 1)法的平均相

表 4 注水管道腐蚀速率预测结果

序号	测量腐蚀速率 /mm a <sup>-1</sup>	标准 GM (1, 1) /mm a <sup>-1</sup>	灰色遗传算法 /mm a <sup>-1</sup>	灰色神经网络 /mm a <sup>-1</sup>	本文方法 /mm a <sup>-1</sup>
7	0.109	0.142	0.117	0.114	0.11
8	0.1134	0.153	0.1175	0.1149	0.1154
9	0.1167	0.1221	0.1191	0.1189	0.1199
10	0.1195	0.1297	0.1215	0.1212	0.1226
11	0.1213	0.1343	0.1253	0.1239	0.126
12	0.1234	0.1404	0.1289	0.1267	0.1281

对误差为 17.15%, 灰色遗传算法的平均相对误差为 3.74%, 灰色神经网络法的平均相对误差为 2.34%, 说明本文方法的预测精度高于标准 GM(1, 1)法和灰色遗传算法, 同灰色神经网络法的精度接

近。但本文预测方法所需样本数据远少于灰色神经网络法, 计算过程也较灰色神经网络法简单。

## 3 结论

基于关联分析的多因素灰色模型群预测方法与一般时间序列分析、回归分析建立的预测模型不同, 它不需要大量的原始数据, 具有计算量小、计算方便和预测精度高等优点。且该方法充分考虑了多因素变量对预测变量的影响, 适用于油田注水管道、油气输送管道等复杂腐蚀体系的腐蚀速率预测。

参考文献:

- [1] 伍长荣, 胡学钢. 基于 GRA-PCA 的 RBF神经网络预测方法应用研究[J]. 巢湖学院学报, 2005, 7(3): 52-54.
- [2] 喻西崇, 赵金洲, 郭亚玲, 等. 利用灰色理论预测注水管道腐蚀速率的变化趋势[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24(2): 51-54.
- [3] 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.
- [4] 李秀娟, 梅甫定. 灰色神经网络模型在油气管道腐蚀速度预测中的应用[J]. 安全与环境工程, 2006, 13(4): 77-80.
- [5] 秦政先, 李长俊, 胡安鑫, 等. 基于 Niche GA 的灰色模型预测天然气管道腐蚀速率[J]. 油气储运, 2007, 26(2): 47-50.
- [6] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国, 等. 灰色系统理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.