

# 基于优化灰色神经网络法的压力容器 裂纹扩展预测\*

马朝阳\*\*<sup>1</sup> 郑运虎<sup>2</sup> 姜 峰<sup>2</sup>

(1. 甘肃省锅炉压力检验研究院; 2. 兰州理工大学石油化工学院)

**摘 要** 根据灰色预测和神经网络理论建立了裂纹扩展预测的有效模型, 并对其进行了优化和改进, 通过实例计算表明, 改进后的灰色神经网络法的预测精度更高, 为裂纹扩展和寿命预测提供了一种参考方法。

**关键词** 压力容器 裂纹扩展 神经网络 寿命预测

**中图分类号** TQ053.2 **文献标识码** A **文章编号** 0254-6094(2015)03-0380-04

裂纹扩展预测方法可以分为两种<sup>[1~4]</sup>: 一种是考虑扩展机理的预测方法, 如有限元法、实验法、理论分析法及 Paris 裂纹寿命计算法等; 另一种是不考虑扩展机理的数学建模方法, 如线性回归预测、指数回归预测、神经网络法及传统 GM(1, 1) 预测法等<sup>[5~12]</sup>。影响裂纹扩展的不确定性因素较多, 如复杂多变的外界载荷、材料本身的不均匀性以及结构形状特点等。如果在考虑扩展机理和不确定性因素的条件下进行裂纹扩展速率计算, 将会增加计算难度, 而且预测误差较大; 若不考虑裂纹扩展机理, 运用可靠的二维裂纹扩展数据进行数学建模, 不仅计算快速, 而且预测效果好、精度高。传统 GM(1, 1) 预测法的预测精度较差, 且不利于控制; 神经网络法和传统 GM(1, 1) 预测法相结合的裂纹预测方法避免了传统 GM(1, 1) 预测法对预测精度控制不便的缺点, 同时又继承了传统 GM(1, 1) 对数据样本要求小和神经网络法自适应能力强的优点。笔者根据灰色预测和神经网络理论建立了裂纹扩展预测的有效模型, 并对其进行了优化和改进, 实例计算表明改进后的灰色神经网络法的预测精度更高, 为

裂纹扩展和寿命预测提供了一种参考方法。

## 1 灰色神经网络法

设原始离散数据序列为  $x^0 = \{x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0\}$  ( $n$  为序列长度), 对其进行一次累加生成处理, 则有  $x^1(k) = \{\sum_{j=1}^k x^0(j) \mid k=1, 2, \dots, n\}$ , 生成序列  $x^1 = \{x^1(1), x^1(2), \dots, x^1(n)\}$ , 并以此序列为基础建立灰色生成模型:

$$\frac{dx^1}{dt} + ax^1 = u \quad (1)$$

式(1)为一阶灰色微分方程, 记为 GM(1, 1)。其中  $a, u$  为待辨识参数。若  $\hat{a} = [a \ \mu]^T$  为参数向量, 且:

$$y_n = [x^0(2) \ x^0(3) \ \dots \ x^0(n)]^T \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} -(x_2^1 + x_1^1)/2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -(x_n^1 + x_{n-1}^1)/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

则最小二乘估计参数系列满足  $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T y_n$ 。其中, 时间响应方程为:

$$\hat{x}_1^1 = (x_1^1 - \frac{u}{a}) e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (4)$$

离散响应方程为:

$$\hat{x}^1(k+1) = (x_1^1 - \frac{u}{a}) e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (5)$$

\* 国家质检公益基金资助项目(201310152)。

\*\* 马朝阳, 男, 1970年1月生, 高级工程师。甘肃省兰州市, 730050。

其中  $x_1^1 = x_1^0$ 。

将  $\hat{x}^1(k+1)$  计算值做累减还原即得到数据的估计值:

$$\hat{x}^1(k+1) = \left[ \left( x^0(1) - \frac{u}{a} \right) - x^0(1) \times \frac{1}{1 - e^{-ak}} + \frac{2u}{a} \times \frac{1}{1 + e^{-ak}} \right] \times (1 + e^{-ak}) \quad (7)$$

将式(6)带入图 1 所示的神经网络中进行逐层映射。该神经网络共分 4 层: L1 为输入层, L2

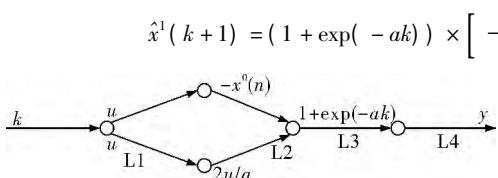


图 1 神经网络映射示意图

传统 GM(1,1) 通过 4 层神经网络的逐映隐

$$\hat{x}^1(k+1) = (1 + \exp(-ak)) \times \left[ -x^0(n) \times \frac{1}{1 + e^{-ak}} + \frac{2b}{a} \times \frac{1}{1 + e^{-ak}} - \left( \frac{b}{a} - x^0(n) \right) \right] \quad (9)$$

将式(8)带入式(5)可对一次累加预测值进行还原。

## 2 实例计算

为验证改进灰色神经网络法在裂纹扩展速率预测方面的精确性,笔者分别采用传统 GM(1,1)

$$\hat{x}^0(k+1) = \hat{x}^1(k+1) - \hat{x}^1(k) \quad (6)$$

对传统 GM(1,1) 白化微分方程的离散函数进行如下变换:

和 L3 为处理中间层, L4 为输出层。通过并行分布处理可得:

射后得到灰色神经网络预测模型(式 7)。GM(1,1) 以充分运用白化信息为根本对所得数据进行拟合计算,但式(6)以初始值  $x^0(1)$  作为代入值,不能充分利用新信息,与 GM(1,1) 理论思想不符。笔者以充分利用信息为目的,以最新数据替代初始值  $x^0(1)$  得到如下方程:

预测法、灰色神经网络法和改进灰色神经网络法对某海洋平台石油提炼承压容器上随时间变化的裂纹长度进行拟合和预测<sup>[13]</sup>,各方法对应的拟合值和未来两个预测值(表 1 最后两行)见表 1,残差和相对误差见表 2。

表 1 各方法的拟合值和预测值

时间 h	原始值 μm	裂纹长度拟合/预测值 μm		
		传统 GM(1,1) 预测法	灰色神经网络法	改进灰色神经网络法
504	8.9	8.900	8.900	8.900
624	46.9	47.714	48.150	47.623
744	56.5	53.081	53.536	54.821
864	61.8	56.052	59.523	59.727
984	63.5	65.694	66.180	64.983
1 101	68.0	73.084	73.581	71.257
1 224	76.4	81.306	81.811	78.352
1 344	98.2	90.452	90.960	92.856
1 464	104.0	100.627	101.133	102.769
1 584	109.1	111.947	112.443	111.235
-	-	116.785	116.323	114.532
-	-	124.696	124.897	124.798

表 2 各方法的残差与相对误差

原始值 $\mu\text{m}$	传统 GM(1,1) 预测法		灰色神经网络法		改进灰色神经网络法	
	残差/ $\mu\text{m}$	相对误差/%	残差/ $\mu\text{m}$	相对误差/%	残差/ $\mu\text{m}$	相对误差/%
8.9	0	0	0	0	0	0
46.9	0.814	1.736	1.250	2.665	0.723	1.541
56.5	-3.419	-6.051	-2.964	-5.246	-1.679	-2.971
61.8	-5.748	-9.300	-2.277	-3.684	-2.073	-3.354
63.5	2.194	3.455	2.680	4.220	1.483	2.335
68.0	5.084	7.476	5.581	8.207	3.257	4.790
76.4	4.906	6.421	5.411	7.082	1.952	2.555
98.2	-7.748	-7.890	-7.240	-7.372	-5.344	-5.442
104.0	-3.373	-3.243	-2.867	-2.757	-1.231	-1.184
109.1	2.847	2.609	3.343	3.064	2.135	1.957

从表 1 可以看出,改进灰色神经网络法的预测值与实际值非常接近;从表 2 可以看出,改进灰色神经网络法的相对误差的绝对值最小,且误差波动相对较小。根据残差数据可以计算出 3 种方法的残差绝对值的平均值依次为 3.613、3.361、1.988  $\mu\text{m}$ 。因此,改进灰色神经网络法在裂纹扩展预测方面具有较高预测精度,可以用于裂纹扩展预测。

### 3 结束语

笔者根据灰色预测和神经网络理论建立了裂纹扩展预测的有效模型,并对其进行了优化改进,通过实例计算表明,改进灰色神经网络法在裂纹扩展预测方面具有有较高预测精度,可用于裂纹扩展速率和疲劳寿命的预测,为承压设备的检修、维护及管理等工作提供一定的参考。

### 参 考 文 献

- [1] 师小红,徐章遂,孙钦蕾.基于灰色神经网络的发射塔架疲劳裂纹扩展预测[J].电测与仪表,2006,43(4):21~22.
- [2] 秦海勤,徐可君,江龙平.疲劳裂纹扩展的灰色系统预测[J].汽轮机技术,2005,47(1):76~78.
- [3] 贾法勇,霍立兴,张玉凤,等.疲劳裂纹扩展速率两种数据处理方法的比较[J].机械强度,2003,25(5):568~571.
- [4] 陈龙,蔡力勋.基于材料低周疲劳的裂纹扩展预测模型[J].工程力学,2012,29(10):34~39.
- [5] 刘思峰,郭天榜,党耀国,等.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,1999:125~176.
- [6] 邓聚龙.灰预测与决策[M].武汉:华中科技大学出版社,2002:75~96.
- [7] 罗党,刘思峰,党耀国.灰色模型 GM(1,1) 优化[J].中国工程科学,2003,5(8):50~53.
- [8] 谭冠军.GM(1,1) 模型的背景值构造方法和应用[J].系统工程理论与实践,2000,20(4):98~103.
- [9] 党耀国,刘思峰,刘斌.以  $x^{(1)}(n)$  为初始条件的 GM 模型[J].中国管理科学,2005,13(1):132~135.
- [10] 刘思峰,邓聚龙.GM(1,1) 模型的适用范围[J].系统工程理论与实践,2000,20(5):121~124.
- [11] 谭开忍,肖熙.基于灰色理论的海底管道腐蚀剩余寿命预测方法[J].上海交通大学学报,2007,41(2):186~188.
- [12] 喻西崇,赵金洲,乌亚玲,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):51~54,69.
- [13] 谢正文,孔凡玉,曲方.灰色支持向量机在疲劳裂纹扩展预测中的应用[J].湖北工业大学学报,2008,23(4):55~58.

(收稿日期:2014-07-20,修回日期:2014-08-06)

## Crack Propagation Prediction Method for Pressure Vessels Based on Gray Neural Network Optimization

(Continued on Page 394)

部处于弹性状态,复合材料层的应力强度明显高于自紧处理前。说明自紧处理能够提高复合材料气瓶的承载能力和纤维强度的利用率。

4.2 利用 DOT-CFFC 和 ISO-11119 两个标准对 35.0MPa 全缠绕复合材料气瓶进行自紧压力优化。结果表明当自紧压力为 64.4MPa 时,全缠绕复合材料气瓶的性能可达到最佳状态。

4.3 经 64.4MPa 自紧压力处理后,35.0MPa 全缠绕复合材料气瓶内衬层的承载能力提高了 42.1%,复合材料层的纤维性能提高了 38.7%。

### 参 考 文 献

- [1] 王荣国,赫晓东,胡照会,等.超薄金属内衬复合材料压力容器的结构分析[J].复合材料学报,2010,27(4):131~138.
- [2] 黄再满,蒋鞠慧,薛忠民,等.复合材料天然气气瓶预紧压力的研究[J].玻璃钢/复合材料,2001,(5):29~32.
- [3] DOT-CFFC, Basic Requirements for Fully Wrapped Carbon-fiber Reinforced Aluminum Lined Cylinders [S]. Washington: United States Department of Transportation, 2000.
- [4] 陈亮,孙红卫,陈国清,等.碳纤维缠绕复合气瓶自紧力和疲劳的数值模拟[J].宇航材料工艺,2012,42(4):16~20.
- [5] 张广哲,王和慧,关凯书.碳纤维缠绕储氢气瓶的有限元自紧分析和爆破压力预测[J].压力容器,2011,28(8):27~34,43.
- [6] ISO-11119, Gas Cylinders of Composite Construction—Specification and Test Methods—Part 2: Fully Wrapped Fibre Reinforced Composite Gas Cylinders with Load-sharing Metal Liners [S]. Switzerland: ISO, 2002.
- [7] 嵇醒,戴瑛,顾星若.碳纤维缠绕铝内胆气瓶的有限元分析与自紧设计[J].力学季刊,2003,24(3):385~389.
- [8] 徐君臣,银建中.纤维缠绕复合材料气瓶研究进展[J].应用科技,2012,39(4):64~71.

(收稿日期:2014-07-12,修回日期:2015-05-10)

## Self-tight Optimization Analysis for High-pressure Fully-wrapped Composite Cylinder

WU Ze-min<sup>1</sup>, SONG Li-bin<sup>2</sup>, MA Yuan<sup>1</sup>

(1. College of Chemical Machinery, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

**Abstract** Self-tight operation can effectively improve composite cylinder's anti-fatigue performance and carbon fiber utilization. Taking fully-wrapped composite cylinder with 140L volume and 35.0MPa operating pressure as an example, the method of optimizing self-tight pressure was investigated, including adopting the finite element method to analyze the cylinder's self-tight operation. The results demonstrate that both DOT-CFFC and ISO-11119 standards can implement this self-tight optimization of the cylinder with over 34.5MPa working pressure; and after it, the liner's bearing capacity of this 35.0MPa fully-wrapped composite cylinder and the fiber utilization can be increased by 42.1% and 38.7% respectively under the working pressure.

**Key words** storage tank, composite cylinder, self-tight analysis, optimization analysis

(Continued from Page 382)

MA Zhao-yang<sup>1</sup>, ZHENG Yun-hu<sup>2</sup>, JIANG Feng<sup>2</sup>

(1. Gansu Province Boiler & Pressure Vessel Supervision and Inspection Institute, Lanzhou 730030, China;

2. College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract** Based on neural network (NN) and gray prediction theory, the gray NN prediction model for crack growth rate was established and optimized. Application in practice shows that the modified gray neural network model can greatly improve the prediction accuracy, and it provides the reference for predicting the fatigue crack growth and vessel's serving life.

**Key words** pressure vessel, crack growth, NN, serving life prediction