

# 基于灰色神经网络的有机涂层寿命预测研究

周立建<sup>1</sup>, 穆志韬<sup>1</sup>, 邢玮<sup>1</sup>, 孔光明<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041; 2. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 暴露于大气腐蚀环境下的有机涂层使用寿命涉及因素繁多, 难于精确预测。基于灰色理论和人工神经网络理论, 建立了灰色神经网络模型对有机涂层腐蚀面积进行预测, 进而预测其寿命。通过飞机结构模拟试验件加速腐蚀试验后的有机涂层寿命预测实例检验, 发现灰色神经网络模型预测有机涂层寿命精度较高, 结果理想。

**关键词:** 有机涂层; 寿命预测; 灰色理论; 人工神经网络; 灰色神经网络

**中图分类号:** TG156      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2011)05-0062-04

## Study of Service Life Prediction of Organic Coatings Based on Grey Neural Network

ZHOU Li-jian<sup>1</sup>, MU Zhi-tao<sup>1</sup>, XING Wei<sup>1</sup>, KONG Guang-ming<sup>2</sup>

(1. Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China;

2. Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China)

**Abstract:** There are numerous factors of atmospheric corrosion environment, so it is difficult to predict the service life of organic coatings. Based on gray theory and artificial neural network theory, a grey neural network model was established to predict the corrosion area of organic coatings, and then to predict service life. Accelerated test of simulated of coated aircraft structure was carried out. The results showed that the life prediction accuracy of organic coatings with grey neural network model is high, and the result is satisfactory.

**Key words:** organic coatings; life prediction; gray theory; artificial neural network; grey neural network

有机涂层防护是控制装备腐蚀最有效、最经济的方法之一, 在装备腐蚀控制中占据十分重要的地位<sup>[1]</sup>。为保证装备服役期的安全可靠, 需要在一定时间内对原有防护涂层性能进行检测和量化评估, 为涂层是否需要重新涂装提供依据。

目前国内对于涂层性能评估往往依靠经验, 存在着较大的安全隐患<sup>[2]</sup>。关于有机涂层使用寿命国内外进行了一些研究, 分别应用不同理论建立了涂层寿命预测公式<sup>[3-6]</sup>, 但是涂层的失效是一个包含诸多因素且相当复杂的过程。文献[3]和[4]的涂层寿命

收稿日期: 2011-05-28

作者简介: 周立建(1983—), 男, 河北正定人, 硕士研究生, 主要研究方向为飞机结构寿命评定技术。

预测公式需要知道腐蚀介质在涂层中的扩散系数,而扩散系数的测量是非常困难的<sup>[5]</sup>;文献[5]和[6]应用了只需小样本数据量的灰色理论进行预测,虽然短期预测精度较高,但在长期预测中精度会有一定的下降。

人工神经网络具有自学习、非线性映射和并行分布处理能力,可以实现任意函数的逼近,达到希望的精度要求。文中将灰色理论与人工神经网络相结合,建立了一个灰色神经网络模型对有机涂层腐蚀面积进行预测,进而预测有机涂层使用寿命。

## 1 模型构建

### 1.1 灰色GM(1,1)预测模型

灰色预测就是指以GM(1,1)模型为基础的预测。GM(1,1)模型由一个单变量的一阶微分方程构成,通过对原始数据进行1次累加处理,用微分方程来逼近拟合。

设原始时间序列对应的 $n$ 个观测值为: $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$ ,通过处理拟合可得到原始序列 $X^{(0)}$ 的灰色预测模型:

$$\hat{X}^{(1)}(K+1) = [X^{(0)}(1) - \frac{\mu}{\alpha}]e^{-\alpha K} + \frac{\mu}{\alpha},$$

( $K=0, 1, 2, \dots, n$ )

$$\hat{X}^{(0)}(K) = \hat{X}^{(1)}(K) - \hat{X}^{(1)}(K-1),$$

( $K=1, 2, \dots, n$ )

式中: $\alpha$ 为发展灰数; $\mu$ 为内生控制灰数; $e^{(0)}(K)$ 为残差, $e^{(0)}(K) = X^{(0)}(K) - \hat{X}^{(0)}(K)$ ;  $q(K)$ 为相对误差, $q(K) = \left| \frac{e^{(0)}(K)}{X^{(0)}(k)} \right| \times 100\%$ 。

### 1.2 人工神经网络模型

人工神经网络(Artificial Neural Networks)是理论化的人脑神经网络的数学模型,是基于模仿大脑神经网络结构和功能而建立的一种信息处理系统,具有大规模并行处理、容错性、自组织性和自适应性等特点,广泛应用于数据预测、函数拟合、优化控制等很多领域。BP(Back Propagation)网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络,由输入层、隐含层和输出层组成,是目前应用最广泛的神经网络模

型之一。

### 1.3 灰色神经网络模型

灰色神经网络模型是将灰色理论与人工神经网络融合在一起,采用组合模型进行预测,可以充分利用灰色理论弱化数据序列波动性的特点和神经网络特有的自学习、非线性映射及并行分布处理的能力。

模型预测步骤如下。

1) 灰色预测:应用灰色GM(1,1)预测模型对原始数据序列建模预测,得到序列的预测值,并计算出 $e^{(0)}(K)$ 。

2) 灰色神经网络训练:将原始数据序列 $n-1$ 项的灰色预测值作为输入样本,对应的 $e^{(0)}(K)$ 作为输出样本,训练网络。

3) 预测:将原始数据序列第 $n$ 项的灰色预测值作为网络的输入样本,输出对应数据的 $\Delta e^{(0)}(K)$ 。

4) 最终预测值:用原始数据序列第 $n$ 项的灰色预测值加上 $\Delta e^{(0)}(K)$ ,即得到该数据项的灰色神经网络预测值。

5) 重复步骤2)~4),得到原始数据序列全部数据项的最终预测值。

## 2 基于灰色神经网络的有机涂层寿命预测实例

### 2.1 有机涂层加速腐蚀试验

某型飞机服役过程中结构件涂层发生了大面积的腐蚀破坏(如图1所示),笔者通过实验室加速腐蚀试验的方法再现其腐蚀过程,从而预测结构件涂层寿命。加速腐蚀用的飞机结构模拟试验件为2层组合试验件,下层为LY12CZ板材,作为对接带板;上层由LY12CZ板材、开有腰形孔的LC4CZ板材通过紧固件(铆钉、托板螺帽)连接在下层板上,模拟机翼前缘蒙皮与整体油箱壁板和前段蒙皮对接、整体油箱壁板与前段蒙皮和后段蒙皮对接、前段蒙皮和后段蒙皮对接、口盖与前段蒙皮对接。试验件尺寸:长400 mm,宽220 mm,板材厚度均为2 mm,外观如图2所示。

试验件外表面的保护涂层为荷兰底漆+面漆。

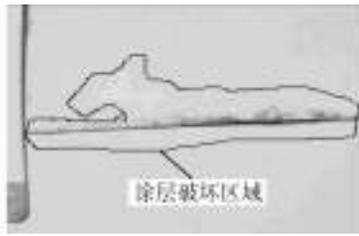


图1 飞机蒙皮涂层腐蚀破坏

Fig.1 The corrosion damage of aircraft skin coatings

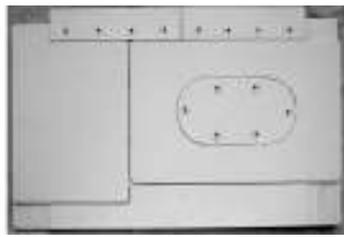


图2 加速腐蚀试验件

Fig. 2 The accelerated corrosion specimen

为模拟飞行中载荷对结构件表面涂层与基体金属粘合力的影响,试验前先在MTS810电液伺服疲劳试验机上对试验件进行预拉伸处理。试验时在配有pH值为 $4.0 \pm 0.2$ 、质量分数为5%的NaCl溶液的周期浸润试验箱内进行周期浸润试验。试验的1个周浸谱循环为16.8 min,其中溶液中浸泡时间为4.8 min,溶液外红外灯烘烤12 min,当量外场腐蚀1个日历年需周浸循环348次,共97.4 h。每加速腐蚀1个日历年,在紫外线辐射箱内对试验件进行紫外线辐照,辐照时间为24 h。综合考虑紫外照射和周浸,试验件完成1个完整的试验周期为121.4 h,相当于在外场腐蚀1个日历年。

表2 灰色神经网络预测结果

Table 2 The prediction results with grey neural network

加速腐蚀时间/a	腐蚀面积比例实测值/%	灰色预测值	残差值	残差的误差修正值	灰色神经网络预测值
6	1.5	1.500 000	0	0.003 985	1.503 985
8	2.1	2.044 819	0.055 181	0.072 081	2.116 900
10	2.7	2.659 162	0.040 838	0.038 828	2.697 990
12	3.4	3.458 079	-0.058 079	-0.092 493	3.365 586
14	4.6	4.497 021	0.102 979	0.173 819	4.670 840
16	7.4	5.848 099	1.551 901	0.946 632	6.794 731

面积进行灰色神经网络预测。笔者采用的BP神经网络拓扑结构为5-4-1,即5个输入节点,单隐层(隐层节点数为4,由经验公式 $m = \sqrt{n + l} + a$  [7]求

## 2.2 有机涂层腐蚀面积预测

试验中每完成2个试验周期测量一次涂层腐蚀面积。测量时出于保守考虑,对涂层腐蚀破坏区域进行图形规则化处理,测量其最大腐蚀面积。如图3所示,矩形和圆形框内为腐蚀破坏区,整个试验件表面小腐蚀区域面积之和即为总的腐蚀面积。

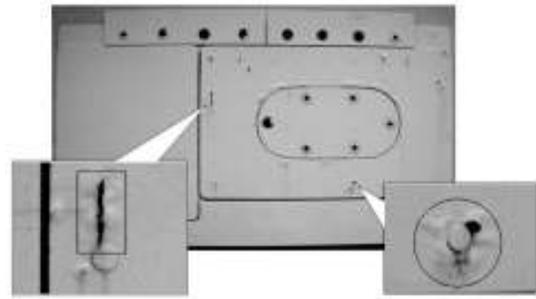


图3 试验件涂层腐蚀面积测量

Fig. 3 The measurement of corrosion area of coated specimen

加速腐蚀到6 a时涂层开始出现腐蚀,加速腐蚀到16 a时的腐蚀面积数据见表1。

表1 试验件涂层腐蚀面积

Table 1 The corrosion area of coated specimen

加速腐蚀时间/a	6	8	10	12	14	16
腐蚀面积比例/%	1.5	2.1	2.7	3.4	4.6	7.4

应用灰色GM(1,1)模型对涂层腐蚀面积进行预测。为评估预测精度,只对前5组数据建模,最后1组留作精度检验用,计算结果见表2。由表2可知,预测加速腐蚀16 a涂层腐蚀面积的误差是比较大的。

得到灰色预测值后,按照2.3节所述步骤对腐蚀

得。式中: $m$ 为隐层节点数; $n$ 为输入节点数; $l$ 为输出节点数; $a$ 为1~10之间的常数),1个输出节点,学习速率为0.1,总体误差为0.000 000 1。涂层腐蚀面

积预测结果见表2,相对误差见表3。

由表2及表3可知,灰色理论的预测结果经神经

表3 预测结果相对误差

Table 3 The relative error of the prediction results

加速腐蚀时间/a	6	8	10	12	14	16
腐蚀面积比例实测值/%	1.5	2.1	2.7	3.4	4.6	7.4
灰色理论预测相对误差/%	0	2.627 667	1.512 519	1.708 206	2.238 674	20.971 635
平均相对误差/%			4.843 117			
灰色神经网络预测相对误差/%	0.265 667	0.804 762	0.0744 44	1.012 176	1.540 000	8.179 311
平均相对误差/%			1.979 393			

网络模型修正后,误差大大减小,因此应用灰色神经网络模型对涂层腐蚀面积进行预测,精度将远高于单独的灰色理论预测,预测结果较为理想。

应用灰色神经网络模型,对试验件加速腐蚀18,20,22,24 a的涂层腐蚀面积进行预测,结果分别为9.638 743%,12.450 289%,15.247 541%及18.300 607%。

对10个不同加速腐蚀年限及其对应的涂层腐蚀面积比例进行拟合,其中涂层腐蚀面积比例前6个采用实测值,后4个采用灰色神经网络的预测值,拟合结果如图4所示。

即发现涂层表面1个部位生锈、金属基体穿孔以及涂层的生锈面积达到某一预定值。

假设试验件经过某一加速腐蚀年限 $t'$ ,涂层腐蚀面积比例为 $S'$ ,定义此时涂层达到了使用寿命,则根据涂层腐蚀面积预测公式可求出涂层的使用寿命 $t'$ 。例如,设涂层腐蚀面积比例为10%时,涂层达到了使用寿命,求解涂层腐蚀面积预测公式可得涂层的使用寿命 $t'$ 约为18 a。

### 3 结论

1) 将灰色理论和神经网络理论相融合,充分发挥了灰色预测所需样本量少、方法简单的优点和神经网络非线性映射能力强、并行处理能力突出的特点,计算结果表明,灰色神经网络模型预测的精度高,结果理想,完全可以应用于有机涂层腐蚀面积的预测。

2) 通过飞机结构模拟试验件加速腐蚀试验,运用灰色神经网络模型建立了试验件有机防护涂层腐蚀面积预测的曲线模型,并结合前人经验,得出了计算涂层使用寿命的一种方法。通过该实例获得的有机涂层寿命预测方法具有一定理论基础,计算简便,可用于装备的有机防护涂层寿命预测。

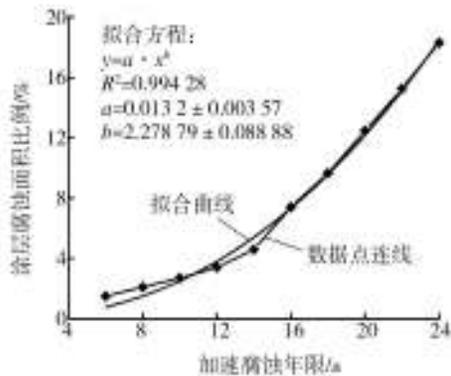


图4 涂层腐蚀面积比例与加速腐蚀年限的曲线拟合  
Fig. 4 The curve fitting of coating corrosion area and accelerated corrosion time

由图4可见,拟合曲线模型相关系数 $R=0.997 136$ ,相关性很高,因此采用该曲线方程来描述涂层腐蚀面积与加速腐蚀年限的关系可信度较高。令 $S$ 为涂层腐蚀面积比例,拟合后的涂层腐蚀面积预测公式为: $S=1.32 \times t^{2.278 79}$

### 2.3 有机涂层寿命预测

目前,关于涂层的使用寿命没有一个统一的定义,但有以下作为判定涂层达到使用寿命的依据<sup>[8]</sup>,

### 参考文献:

[1] 王俊芳,杨晓然. 军用防腐涂料涂装的发展探讨[J]. 装备环境工程,2005,2(6):45—47.  
 [2] 周小敏,刘钧泉. 有机涂层使用寿命探讨[J]. 装备环境工程,2010,7(1):57—60.  
 [3] CMAITLAND C, MAYNE J E O. Factors Affecting the Electrolytic Resistance of Polymer Films[J]. Official Digest, 1962,34(1):972.

(下转第81页)

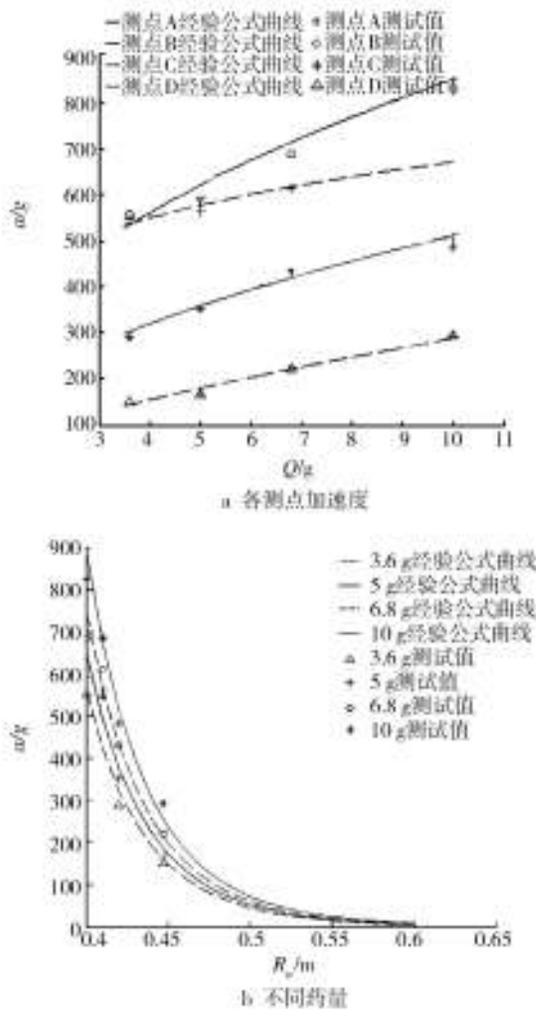


图5 拟合效果对比

Fig. 5 Comparison of fitted results

### 3 结语

通过以上讨论和分析,可以得到如下几点认识。

1) 密闭结构上振动参数值(如加速度)与装药量以及爆心距有关,并且随着装药量的增大(或爆心距的减小)而增大,其经验公式可以通过对试验数据的回归分析得到。

2) 密闭结构在内爆炸载荷作用下,不同部位或

构件会呈现出不同的振动主频,且与载荷大小无关。因此,可以通过结构某一部位或构件完好时的振动主频作为判断其受损状况的标准,如某次测出的振动主频低于这个标准,即可判定此处可能发生损伤。同时,可以通过改变局部尺寸和减少非对称结构等方法防止和减少共振响应。

3) 对于密闭结构上的振动参数,由试验数据回归分析得到的经验公式具有一定的工程应用价值,如已知起爆装药量,先由经验公式算出振动加速度,再由相似律推算出与爆炸容器结构相似的密闭结构的振动情况,加上安全系数,即可判断其结构是否受到破坏,检验安全设计是否合理;也可以根据爆炸容器正常工作的加速度耐振值,反算出最大起爆装药量,从而指导内爆炸试验。不过,该经验公式是由特定尺寸爆炸容器试验得出的,仅适用于与其结构相似的密闭结构加速度值计算,因而具有一定的局限性。

### 参考文献:

- [1] DUFFY T A, GREENE J M. Containment of Explosions in Spherical Vessels[J]. Explosion and Shock Waves, 1992, 23(2): 215—237.
- [2] 钟方平,陈春毅,林俊德,等.带平板封头的双层爆炸容器动力响应的实验研究[J].爆炸与冲击,1999,19(3):199—203.
- [3] 蔡军峰,易律政.弹药洞库内爆毁伤数值分析[J].地下空间与工程学报,2010,4(6):751—755.
- [4] 朱文辉.爆炸容器承受内部加载的实验研究[J].爆炸与冲击,1995,15(4):374—381.
- [5] 钟方平,陈春毅,林俊德,等.脉冲激励下组合圆柱壳振动特性的理论和实验研究[C]/第三届全国工程结构安全防护学术会议论文集.1999:231—237.(余不详)
- [6] 谢峻,韩大建.一种改进的基于频率测量的结构损伤识别方法[J].工程力学,2004,3(4):21—25.
- [7] 孙杰,朱立新.爆炸荷载作用下浅埋结构内振动实验研究与计算[J].爆破,2003,20(4):8—9.
- [8] 汪冬华.多元统计分析与SPSS应用[M].上海:华东理工大学出版社,2010.

(上接第65页)

- [4] 任必年.公路钢桥腐蚀与防护[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [5] 耿刚强,林杰,刘来君,等.钢桥防腐涂层寿命的预测方法[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(5):43—47.
- [6] 林杰.桥梁钢结构防腐涂层保护、失效规律及其寿命

预测研究[D].西安:长安大学,2006:46—53.

- [7] 周开利,康耀红.神经网络模型及其MATLAB仿真程序设计[M].北京:清华大学出版社,2005:90.
- [8] ZHEN Fang. Simple Talk about the Forecast Theory about Coating's Life[J]. Coating Application and Electric Plating, 2005, (3): 3—5.