

# 舰用复合材料自然老化样本预测方法

李泳霖<sup>1a,2</sup>, 王威<sup>1b</sup>, 狄鹏<sup>1a</sup>

(1. 海军工程大学 a. 管理工程系; b. 舰船工程系, 武汉 430031; 2. 92301 部队, 北京 100040)

**摘要:**通过舰用复合材料样本老化试验的数据设计了一种研究方法:以10周为间隔提取样本5次,并针对材料在干燥条件以及在武汉地区的样本老化数据进行建模,利用非线性回归预测法、灰色预测法和组合预测法对样本值分别进行曲线拟合和预测,并对拟合曲线和预测点进行检验。研究过程表明,回归预测、组合预测具有较高的预测精度,增强了预测结果的可靠性。对确定复合材料以及相关部件寿命提供了研究方法,具有实践意义。

**关键词:**复合材料;非线性回归;灰色预测;组合预测

**本文引用格式:**李泳霖,王威,狄鹏.舰用复合材料自然老化样本预测方法[J].四川兵工学报,2014(11):130-132.

**中图分类号:**TB33

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2014)11-0130-04

## Forecast Method about Natural Aging Sample of Composite Materials Used in Ship

LI Yong-lin<sup>1a,2</sup>, WANG Wei<sup>1b</sup>, DI Peng<sup>1a</sup>

(1. a. Department of Systems Engineering; b. Department of Ship Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. 92301 Troops, Beijing 100040, China)

**Abstract:** This paper designed a method through the sample aging test data of ship compound material; took samples five times every 10 weeks, made model for the sample aging data aimed at the material in dry conditions and in Wuhan area, by using nonlinear regression forecasting method, grey prediction method and combination forecasting method, curve fitting and prediction was used to the samples' value, fitted curve and prediction point was tested. The research process showed that: through compared with each other, the regression prediction, combination prediction had a relatively high accuracy which enhanced the reliability of the prediction result. A research method was provided to ensure the hull and associated component's life which had a practical significance.

**Key words:** composite materials; non-linear regression; grey prediction; combination forecasting

**Citation format:** LI Yong-lin, WANG Wei, DI Peng. Forecast Method about Natural Aging Sample of Composite Materials Used in Ship[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(11):130-132.

舰船服役的全过程都在海洋环境中,始终面临着恶劣的环境。大多数舰船都采用钢铁等金属外壳,而金属在海洋环境中,受海水温度、海水含盐度、海洋大气温度、海洋大气湿度的影响,腐蚀严重的问题一直得不到有效地解决<sup>[1]</sup>。近年来,复合材料由于其树脂含量较高,防渗性和耐腐蚀性好,树脂在纤维间的浸润性好,界面强度高优点被业内所认可,在舰用结构中广泛使用,然而复合材料性脆,耐磨性差等问

题目前研究尚未深入展开。一些大型公司对复合材料的弊端进行了改进,却忽略了材料老化的影响,尽管提出了一些方法,但还不成熟。因此利用有效的数学方法去研究复合材料样本老化与时间关系的问题,具有实际意义。

目前,国内肖鹏在氧化性气氛不同拉应力下研究复合材料在不同温度的氧化失效行为,采用扫描观察的方法,为复合材料寿命长度的研究提供了依据<sup>[2]</sup>。蔡荣利用碳纤维复

复合材料层合板在常幅疲劳载荷作用下的刚度变化,来监测复合材料层合板疲劳损伤的积累,对复合材料疲劳寿命进行了分析,推导出了刚度降寿命预测模型,实现了对复合材料疲劳寿命的预测<sup>[3]</sup>。童小燕利用在循环加载下,疲劳损伤导致材料强度、刚度、密度、温度和能耗等物理性能上的变化,提出了一种基于疲劳损伤过程能量衰减的剩余能量模型,以及进行复合材料结构疲劳寿命预测的二元方法的构想<sup>[4]</sup>。本文运用非线性回归预测法、灰色预测法和组合预测法,对复合材料样本老化试验的数据分别建立了模型,然后检验了模型的有效性。

## 1 复合材料老化的机理和预测模型的基本原理

### 1.1 复合材料老化的含义及特征

复合材料老化性能是指其在加工、使用、储存过程中受到光、热、氧、潮湿、水分、机械应力和生物等因素作用,引起微观结构的破坏,失去原有的物理机械性能,最终丧失使用价值,这种现象通常称为老化<sup>[5]</sup>。其使用环境和工作条件的不同,老化现象和特征的表现形式也多种多样。一般呈现在下列特征:材料表面出现裂纹,崩碎,水解以及光学颜色变化;吸湿性、溶胀性、透水、透气等性能发生改变;出现氧化反应、固化反应等化学变化;冲击韧性、抗拉强度、拉伸应力、硬度等性能减弱。以玻璃纤维复合材料为例,其主要化学成分是二氧化硅,玻璃纤维的化学稳定性又主要取决于其组成成分中的二氧化硅和碱金属氧化物的百分比含量。二组分中碱金属氧化物的存在能够降低玻璃纤维的化学稳定性,发生水解反应,性质发生变化,从而使材料老化<sup>[6]</sup>。

### 1.2 复合材料预测模型的基本原理

复合材料老化虽然与其内在诸多因素及时间、地点、气候等因素有密切关系,但由于预测及研究的核心内容是复合材料拉伸强度而非单纯研究各因素对其影响的规律,因此本文不从直接影响复合材料的诸多因素出发,而从与之间接相关的随时间变化的角度出发建立预测模型。在预测的实践中,对同一问题常常采用不同的预测方法。不同的方法往往各有条件、各有特点,也各有不足所得结果也有差异。本文以船用复合材料样本为例,通过对历史数据进行处理以及对其时间序列变化曲线图的分析,比较各预测模型与历史数据的拟合程度确定了2种模型,即非线性回归模型、灰色GM(1,1)模型。再根据组合预测的基本思想,即将不同的预测方法进行适当的组合,综合利用各种方法所提供的信息,相互取长补短,从而达到提高预测精度的效果,确定了组合预测模型。

## 2 复合材料老化预测模型的建立

### 2.1 非线性回归模型<sup>[7]</sup>

将时间设为横轴  $x$ , 强度设为  $y$ , 散点图分布符合指数函数的变化趋势,即

$$y = Ae^{\frac{-B}{x}} \quad (1)$$

式中:  $x$  代表时间因素;  $\varepsilon$  表示各随机因素对  $y$  的影响的总和。对式(1)取自然对数

$$\ln y = \ln A - \frac{B}{x}$$

$$\text{令: } y' = \ln y, x' = \frac{1}{x}, a = \ln A, b = -B$$

则有

$$y' = a + bx' \quad (2)$$

根据一元线性回归分析法,此时

$$a = \bar{y}' - \frac{L_{xy'}}{L_{xx}}, b = \frac{L_{xy'}}{L_{xx}}$$

即可求出式(1)中的所有未知量。

### 2.2 灰色预测

设  $X^{(0)}$  为原始数据序列,  $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$ , 其中  $x^{(0)}(k) \geq 0, k = 1, 2, \dots, n$ 。

$X^{(1)}$  为  $X^{(0)}$  的 1-AGO 序列,  $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$

其中

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$Z^{(1)}$  为  $X^{(1)}$  的紧邻均值生成序列,  $Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$ 。

若  $\hat{a} = (a, b)^T$  为参数列,且

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & (z^{(1)}(2))^2 \\ -z^{(1)}(3) & (z^{(1)}(3))^2 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & (z^{(1)}(n))^2 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

则灰色微分方程  $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$  的最小二乘估计参数列满足  $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y$ 。

当  $a = 2$  时,称

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b(x^{(1)})^2 \quad (5)$$

为灰色 Verhulst 模型的白化方程。

灰色 Verhulst 模型的时间响应式为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \frac{ax^{(1)}(0)}{bx^{(1)}(0) + (a - bx^{(1)}(0))e^{ak}} \quad (6)$$

### 2.3 组合预测模型<sup>[8]</sup>

以2种预测模型为例,假设这2种预测结果的组合关系为

$$f_c = w_1 f_1 + w_2 f_2 \quad (7)$$

式中:  $f_1, f_2$  为2种单一模型的预测值;  $f_c$  为加权平均的组合预测值;  $w_1$  和  $w_2$  为相应的权系数,且  $w_1 + w_2 = 1$ 。

设两单一模型预测误差分别为  $e_1$  和  $e_2$ , 组合预测误差为  $e_c$ , 方差为  $D(e_c)$ , 对于组合预测误差和方差的表达式分别为

$$e_c = w_1 e_1 + w_2 e_2 \quad (8)$$

$$D(e_c) = w_1^2 D(e_1) + w_2^2 D(e_2) + 2w_1 w_2 \text{cov}(e_1, e_2) \quad (9)$$

求  $D(e_c)$  关于  $w_1$  的极小值可得

$$w_1 = \frac{D(e_2) - \text{cov}(e_1, e_2)}{D(e_1) + D(e_2) - 2\text{cov}(e_1, e_2)} \quad (10)$$

由于  $w_2 = 1 - w_1$ , 记  $D(e_1) = \delta_{11}$ ,  $D(e_2) = \delta_{22}$ ,  $\text{cov}(e_1, e_2) = \delta_{12}$

可求得 2 种单一模型预测方法的组合权系数分别为:

$$w_1 = \frac{\delta_{22} - \delta_{12}}{\delta_{11} + \delta_{22} - 2\delta_{12}} \quad (11)$$

$$w_2 = \frac{\delta_{11} - \delta_{12}}{\delta_{11} + \delta_{22} - 2\delta_{12}} \quad (12)$$

由于各种单一预测模型之间预测结果都是相互独立的, 因此可得  $\delta_{12} = 0$ , 从而公式可以简化为

$$w_1 = \frac{\delta_{22}}{\delta_{11} + \delta_{22}}, w_2 = \frac{\delta_{11}}{\delta_{11} + \delta_{22}}$$

### 3 预测实例

用文献[9]中的实验数据, 以武汉干条件下复合材料拉伸强度为例(表1), 以10周为间隔提取样本5次, 建立回归、灰色、组合3种模型。

表1 复合材料拉伸强度的数据

周期	1	2	3	4	5
强度	382.2	372.5	369.1	368.3	365.6

设  $y(t)$  为复合材料拉伸强度预测值;  $t$  为周期  
非线性回归模型为

$$y_1(t) = 362.638e^{\frac{0.528}{t}}$$

灰色预测模型为

$$y_2(t) = \frac{-375.54972}{-1.03194 + 0.04934e^{-0.09826t}}$$

组合预测模型为

$$y_3(t) = 0.8137y_1(t) + 0.01863y_2(t)$$

3种模型的预测值列于表2。

表2 复合材料拉伸强度预测值

周期	实值	非线性回归预测值	灰色预测值	组合预测值
1	382.2	382.3	382.2	382.3
2	372.5	372.3	370.6	372
3	369.1	369.1	366.4	368.6
4	368.3	367.5	364.8	367
5	365.6	366.5	364.3	366.1

预测误差、误差平方和、平均相对误差见表3<sup>[10]</sup>。由表3可知, 非线性回归预测模型的误差平方和与平均相对误差均小于其他2种模型。在本例中应采用非线性回归模型。

表3 复合材料拉伸强度预测误差

周期	非线性回归预测		灰色预测值		组合预测值	
	误差	相对误差/%	误差	相对误差/%	误差	相对误差/%
1	-0.100	0.026	0	0	-0.081	0.021
2	0.161	0.043	1.942	0.508	0.493	0.132
3	0.093	0.025	2.719	0.730	0.525	0.142
4	0.844	0.229	3.459	0.941	1.331	0.364
5	-0.888	0.243	1.332	0.364	-0.474	0.130
S	1.54545		24.90323		2.521472	
$\Delta$		0.1132		0.5086		0.1578

### 4 结论

非线性回归模型及灰色 GM(1,1) 模型均适应于随时间增长数据变小的单变量问题。灰色模型在数据个数大于4的条件下便可有较高的预测精度, 这是非线性回归模型往往难以实现的。组合预测模型对同一问题综合利用各种预测模型, 充分发挥各种模型的优势, 显然比单一预测方法更为科学。就数据来说, 非线性回归预测和组合预测更适用于本文模型。根据复合材料拉伸强度随时间增长的特点, 建立了以上3种模型, 实际预测表明, 组合预测模型原理明确, 方法简单, 是一种具有较高的预测精度, 适应性强的预测模型。对于复合材料其他指标, 如随着时间的变化复合材料的变化率、湿度、温度、盐度等均可做类似讨论, 得出满意的预测结果。另外, 本文所建立的预测模型是在随时间变化的数据信息基础上实现的, 不能完全反映其他一些因素的影响作用, 因此对长期预测会有一定的误差, 这一问题有待于进一步探讨。

### 参考文献:

- [1] 李相波, 陈光章, 王洪仁, 等. 虚拟试验技术在舰船材料寿命预测中的应用[J]. 装备环境工程, 2006(8): 70-84.
- [2] 肖鹏, 黄辉, 栾新刚, 等. SiC 涂层 C/C 复合材料应力氧化失效行为[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008(5): 952-955.
- [3] 蔡荣. 复合材料层合板疲劳寿命分析[D]. 天津: 中国民用航空学院, 2010: 15-18.
- [4] 童小燕, 万小鹏, 孙秦, 等. 复合材料的疲劳寿命预测[J]. 工程科技, 1995(2): 91-95.
- [5] 张婷. 复合材料的耐腐蚀、耐老化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 45-49.
- [6] 关进创. 轴承橡胶密封材料寿命预测方法的研究[D]. 大连: 大连渗事大学, 2011: 114-117. (下转第139页)

电、蒸汽管道破损事故以及反应堆冷却剂丧失等。同时,对初因事件详细分析核动力装置在假设的设备故障或损坏下的响应,其目的是验证安全系统设计的有效性,评价事故下核动力装置和人员的安全性。

## 2) 事故处理规程导向方式

目前国内外核电厂主要采用事件导向事故规程或部分状态导向事故规程;状态导向事故处理规程需要核电厂具备一定的软、硬两方面的技术条件。而舰船核动力装置由于各种限制条件导致状态导向型规程并不适宜。因此,舰船核动力装置事故处理规程宜采用事件导向型。

因此,根据国内外核电厂应急运行规程的研制经验,舰船核动力装置事故处理规程的研制应遵循安全可靠、科学合理、经济实用的原则,充分体现事故诊断的多重性、实用性、全面性和事故处理的安全性、科学性、有效性,以逻辑图式和方框图式等形式,采用事件定向规程和非事件定向规程相结合的办法,注重事故处理规程的完整性、可读性和可操作性以及在核动力装置的事故预防和缓解方面的有效性。

## 3) 事故处理规程的研制方案

在典型事故运行分析以及事故判断与处理方法研究的基础上,逐项编制典型故障和事故处理规程。可借鉴已有的核电厂事故处理规程研制中优化多层次、多岗位协作关系的经验,确定事故处置程序。编制事故处理规程的总引导规程,突出状态导向的作用,并辅助操纵员快速判断,正确找到事故处理规程的入口。

## 4) 规程的验证和核安全审评

研究制定的事故处理规程,必须经过模拟器验证或仿真校核,并进行核安全审评,按照反馈意见修改完善。

## 4 结束语

事故处理规程是核动力装置设计中减轻放射性事故后果的重要工作,也是执行核安全法规中纵深防御要求的体现。本文全面介绍了国内外事故处理规程的发展和现状,并

从核电厂和船用核动力装置2个不同的角度阐述了其作用。分别从核电厂和船用核动力装置的实际情况出发,讨论了各类型事故处理规程的使用条件,并提出了舰船核动力装置事故处理规程开发的基本原则和改进方案,为规程的持续改进完善提供了借鉴。

## 参考文献:

- [1] 林诚格. 核电厂紧急运行规程的开发与使用[J]. 核科学与工程,1990,10(4):301-314.
- [2] 凌备,杨延洲. 核反应堆工程原理[M]. 2版. 北京:原子能出版社,1982.
- [3] 刘飞. 核电厂计算机化操作规程系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
- [4] 刘明章. 秦山核电二期扩建工程严重事故对策分析[D]. 上海:上海交通大学,2008.
- [5] 吴广君,刘玉华,刘志云. 状态导向法事故规程在我国核电厂中的应用[J]. 能源工程,2011,1(2):21-24.
- [6] Yuji Niwa, Takahashi, M. Kitamura. The Design of Human—Machine Interface for Accident Support in Nuclear Power Plants Cognition[J]. Technology & Work, 2001(3):161-176.
- [7] Soon Heung Chang, Seong Soo Choi, Jin Kyun Park. Development of an advanced human-machine interface for next generation nuclear power plants[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999(64):109-126.
- [8] 贾明,刘燕子,张建波. 岭澳二期核电厂 SOP 程序验证[J]. 核科学与工程,2010(S1):26-29.
- [9] 张禄庆. 核电厂应急操作规程的现状与发展趋势[J]. 核动力工程,1993,14(4):310-313.
- [10] 梅亮,罗宏. 核电厂 SOP 事故规程原理[J]. 科技视界,12(1):361.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 132 页)

- [7] 宁宣熙,刘思峰. 管理预测与决策方法[M]. 北京:科学出版社,2003:54-56.
- [8] 刘军,赵丹. 基于组合预测模型的弹药管理系统设计与实现[J]. 舰船电子工程,2013:34-36.
- [9] 张颖军. 船用结构复合材料老化及损伤机理研究[D]. 武汉:海军工程大学,2012:34-36.

- [10] 卢金柱,鲁小强. 火炮射击初速灰色预测方法研究[J]. 舰船电子工程,2010(11):140-142.
- [11] 黄超,陶春虎,王占彬,等. T300/648 复合材料湿热老化行为与贮存寿命预测[J]. 四川兵工学报,2013(11):137-140.

(责任编辑 杨继森)