

曲轴疲劳裂纹扩展模式的时序方法预测

周 迅 俞小莉

【摘要】 在外界载荷和构件内部材料特性的共同作用下,机械构件的疲劳裂纹的扩展行为往往具有阶段性,在不同的阶段内伴随不同的行为特性。为了研究这种阶段性并对这种阶段性进行预测,对曲轴疲劳试验过程中谐振台架的振动加速度进行了测录,并采用经典时序方法对这一监测信号进行建模,计算了其在各个时间段中的异常度曲线。与曲轴疲劳裂纹扩展速率曲线进行对比,结果表明时序方法对裂纹扩展模式具有一定的预测能力。

关键词: 曲轴 疲劳裂纹 预测 时序方法

中图分类号: TH113.1; TG113.25⁺⁵

文献标识码: A

Prediction of Crankshaft Fatigue Crack Growth Pattern by Time Series Analysis

Zhou Xun Yu Xiaoli
(Zhejiang University)

Abstract

By the influence of the environmental loads and the material characters, propagations of mechanical components' fatigue cracks usually have stage act. In each stage, the cracks propagate with different behavior features. For studying the behavior features and getting a method to predicting the stage transition, time series analysis method was utilized to process the vibration acceleration data, which were recorded to make identification and prediction for the fatigue crack growth behavior patterns in the fatigue test of engine crankshafts. By comparing with the test results of crack growth rate, the prediction capability of the time series analysis method for crack growth behavior pattern was verified.

Key words Crankshaft, Fatigue crack, Prediction, Time series analysis method

引言

机械构件的疲劳破坏是疲劳裂纹萌生和扩展的过程,当裂纹扩展到临界尺寸时会发生突然断裂。断裂力学应用到疲劳可靠性研究之后,大量的实验结果表明:机械构件疲劳裂纹的扩展行为呈现阶段性,在不同的阶段内其扩展模式、扩展速率等特性有所不同,各个扩展阶段之间的前后承启则表现出一定的规律性^[1~2]。如能动态、实时地识别这些行为特性并对未来的行为特性进行预测,则可为预防破坏性疲劳失效事故的发生和科学合理的制定维修计划提供参考依据。

为对这一思路的可行性进行探讨,应用经典时序方法(AR模型)对在曲轴疲劳试验过程中测得的振动加速度信号进行建模并计算各扩展阶段的模式向量相对于初始状态的异常度,通过与实测曲轴疲劳裂纹扩展速率曲线相对比,分析时序方法对裂纹扩展模式的预测能力。

1 时序方法特点

时序方法常用于从具有先后顺序的信号中提取有用信息,其主要特点可归结为^[3]:①时序方法应用尽可能少的先验知识来揭示复杂系统的隐含模式。所以同其他故障诊断方法相比,它对专家知识库的

依赖较小。②起源于预测,因此它除了具备一般数据处理方法的特点,如信息提炼、对系统规律的揭示之外,还可对未来状态和行为趋势进行预测。③相比控制论方法,时序方法的优点是可以处理“灰色”乃至“黑箱”系统。在一些工程问题中,有时缺乏明确的或完整的输入与输出因果关系,控制论中的参数建模无法使用,但时序方法不受这种因素的限制。

2 经典时序方法及其建模

在时序方法的参数化建模中,最为常用的是ARMA(auto regressive and moving average)模型。

2.1 ARMA模型与AR模型

ARMA模型是在线性回归模型基础上引申并发展而来的,可有效揭示动态数据本身的结构和规律,定量地了解观测数据之间的线性相关性,并预测未来值。

对于平稳、正态、零均值的时间序列 $\{x_t\}$,若 x_t 的取值与其前 n 步的取值 $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-n}$ 以及前 m 步的干扰 $a_{t-1}, a_{t-2}, \dots, a_{t-m}$ 有关,则按照多元线性回归的思想,可得到最一般的ARMA模型为

$$x_t = \sum_{i=1}^n \varphi_i x_{t-i} - \sum_{j=1}^m \theta_j a_{t-j} + a_t \quad (a_t \sim N(0, \sigma_a^2))$$

它是一个 n 阶自回归 m 阶滑动平均模型。

在很多情况下,系统的某一次响应特性与前面的干扰无关或相关性很弱,这时忽略干扰项而可得到ARMA模型的一种特例,即AR模型

$$x_t = \sum_{i=1}^n \varphi_i x_{t-i} + a_t \quad (a_t \sim N(0, \sigma_a^2)) \quad (1)$$

考察式(1),从数字信号处理的角度来看,AR模型实际上是对未来系统响应的一个估计器,称为 n 阶自回归平滑器。而从信息论的角度去看,时序模型是将大量数据所蕴含的信息凝缩成少数几个模型参数,故它又是一个信息的凝聚器。应用AR模型,可以比较方便地进行系统分析、历史复原、未来预测、模式识别以及故障诊断等。

2.2 建立AR模型

考虑到曲轴疲劳问题以及本文所应用的疲劳试验模型的响应受历史干扰激励影响不大,故应用AR模型。

2.2.1 数据的预处理

预处理的主要目的是将原始信号变为平稳信号。在曲轴疲劳试验中,主要需要考虑到传感器零点漂移造成的趋势项。应用多点平均方法对其进行处理^[4]。

对时间序列 $\{x_t\}$ 的一个样本 (x_1, x_2, \dots, x_n) 进行

m 点平均

$$\begin{cases} \bar{t}_i = \frac{1}{m} \sum_{t=m(i-1)+1}^{mi} t \\ \bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{t=m(i-1)+1}^{mi} x_t \end{cases}$$

得到一组平均值 $(\bar{t}_i, \bar{x}_i) (i=1, 2, \dots, l)$,其中

$$l = \text{int}\left(\frac{n}{m}\right)$$

一般 m 值的大小视具体情况而定,本文取 $m = n/10$ 。对 (\bar{t}_i, \bar{x}_i) 进行拟合,得到的拟合函数即为趋势项。

2.2.2 模型参数估计方法

在有了符合要求的观测数据后,对于形如式(1)的AR模型,其建模实际上就是对参数 φ_i 进行估计。

进行模型参数估计的数值算法有直接估计法和递推估计法两大类,根据研究目的,应用了速度较快并兼顾精度的递推Burg算法^[3]。

2.2.3 模型参数的训练

由式(1),可以建立AR模型的矩阵表达形式为

$$X\Phi = A \quad (2)$$

$$\text{其中 } X = \begin{bmatrix} x_{n+1} & x_n & \cdots & x_1 \\ x_{n+2} & x_{n+1} & \cdots & x_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & x_{N-1} & \cdots & x_{N-n} \end{bmatrix}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 \\ -\varphi_1 \\ \vdots \\ -\varphi_n \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} a_{n+1} \\ a_{n+2} \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix}$$

对于AR模型,用其自回归参数构成模式向量 Φ ,则系统的参考状态就对应于参考模式向量

$$\Phi_R = [1 \quad -\varphi_{1,R} \quad -\varphi_{2,R} \quad \cdots \quad -\varphi_{n,R}]^T$$

而系统的待检状态则对应于待检模式向量

$$\Phi_T = [1 \quad -\varphi_{1,T} \quad -\varphi_{2,T} \quad \cdots \quad -\varphi_{n,T}]^T$$

对于参考模式向量的建模而言,由于一次建模所采用的时间序列数据只是随机平稳过程的一个样本,故为了能比较准确地反映作为总体的系统状态,无论是对于参考模式向量还是待检模式向量,都有必要使用一定数量的样本,采用统计学方法对其进行训练。一般用统计所得的均值向量和协方差矩阵作为总体的参考向量或待检向量。本文试验中的样本来自相同试验过程中相同位置上3个不同传感器的实测值。

设有 Φ_R 的 K 个训练样本 $\Phi_{(j)} (j=1, 2, \dots, K)$,由其排列所成的训练样本矩阵为

$$[\Phi_{(1)} \quad \Phi_{(2)} \quad \cdots \quad \Phi_{(K)}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ -\varphi_{11} & -\varphi_{12} & \cdots & -\varphi_{1K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\varphi_{n1} & -\varphi_{n2} & \cdots & -\varphi_{nK} \end{bmatrix}$$

则总体参考均值向量估计式为

$$\hat{\Phi}_R = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \Phi_{(j)} \quad (3)$$

总体参考模式的协方差矩阵估计式为

$$\hat{C}_R = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K [\Phi_{(j)} - \hat{\Phi}_R][\Phi_{(j)} - \hat{\Phi}_R]^T \quad (4)$$

这样,参考模式向量 Φ_R 的特征就可以方便地利用参考均值向量式(3)和协方差矩阵式(4)来描述。同理可对待检模式向量 Φ_T 进行训练。

时序模型的建模和训练的基本方法在 Matlab 软件中都已经进行了收录,可直接进行调用。

3 应用 AR 模型参数进行模式识别

从模式向量的几何意义出发,由于参考模式向量 Φ_R 和待检模式向量 Φ_T 都是 $n+1$ 维向量,故均可视为 $n+1$ 维 Euclid 空间中的点,称之为参考点和待检点。在模式识别和故障诊断中,通常可以将参考点和待检点之间的距离或夹角定义为异常度。定义待检点与参考总体之间的 Euclid 距离为

$$D_E(\Phi_T, \hat{\Phi}_R) = \sqrt{(\Phi_T - \hat{\Phi}_R)^T (\Phi_T - \hat{\Phi}_R)}$$

从统计学的角度讲, Euclid 距离实际上只是考虑到了 Φ_R 的统计均值,即一阶矩,未考虑到均方差的影响。为克服这一问题,引用多元统计分析中的 Mahalanobis 距离的概念,定义待检点和参考点之间的距离为

$$D_M(\Phi_T, \hat{\Phi}_R) = \sqrt{(\Phi_T - \hat{\Phi}_R)^T \hat{C}_R^{-1} (\Phi_T - \hat{\Phi}_R)}$$

Mahalanobis 距离是一种加权 Euclid 距离,其加权矩阵为协方差矩阵 C_R 的逆矩阵。这种加权的优点是:①计入了参考总体的二阶矩特征对距离的影响,其统计特性优于 Euclid 距离。②由于加权矩阵的作用, Mahalanobis 距离成为一个归一化的量,其与向量的维数,即所用 AR 模型的阶数无关,这就方便了应用中在各阶模型之间进行对比择优^[3]。

4 曲轴疲劳裂纹扩展试验

曲轴是一种结构、工艺较复杂的零部件,其裂纹一般为三维椭圆形表面裂纹,出现的位置和形态均有一定的复杂性和多变性。故应用通常的裂纹扩展试验方法,如光学法、电位法、涡流法、试验模态分析法(模态锤击法)等,往往难以实施或者无法获得较

高的精度。

4.1 扫频法基本原理

采用扫频试验方法进行疲劳裂纹扩展的测试^[5]。如图1,它应用谐振式曲轴弯曲疲劳试验台进行疲劳加载。该方法利用了疲劳试验中因试件裂纹扩展而使试验系统的振动特性发生变化这一现象。同模态锤击法类似,是一种通过测量试验系统振动响应并估算系统共振频率来测量试件裂纹扩展动态变化规律的试验方法。

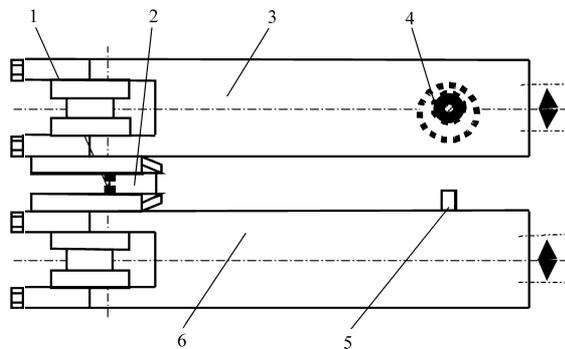


图1 谐振式曲轴疲劳试验系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of resonant crankshaft fatigue test machine

1.应变片 2.曲轴 3.主动臂 4.激振器 5.加速度传感器
6.被动臂

扫频法和模态锤击法同属于裂纹扩展测试的力学刚度方法。锤击式模态试验分析法一般将试件吊起以避免接触物的干扰,而曲轴的疲劳试验则需要较长的时间,中间停下来做锤击试验耗时过长,会影响疲劳试验的连续性^[6],且这一过程无法实现自动化操作。因此对于本文所应用的这种谐振式曲轴弯曲疲劳试验系统,曲轴自由状态下的试验模态分析并不适用。

与锤击法不同,扫频法是在受迫振动条件下,通过施加不同频率的激励并观测其响应特性来测定系统刚度的方法。可以有效保证试验的连续性。

4.2 扫频法的试验流程

扫频法的试验流程如图2所示,主要包括:

(1) 在疲劳试验过程中进行扫频试验,获取在受迫振动条件下试验系统的振动响应随试件裂纹扩展的变化情况。

(2) 结合对试验台谐振系统的模型分析,建立了相应的数据拟合方法,利用该方法对扫频试验结果进行处理,得到试验系统的共振频率 p 与循环加载次数 N 之间的关系,即 $p-N$ 曲线。

(3) 在疲劳试验完成,试件断裂之后,观测断口形貌疲劳辉纹上所呈现的各扩展阶段相对应的裂纹尺寸和形态。据此对 CAD 模型进行裂纹预制,并进

行一系列的有限元模态分析,得到系统的共振频率 p 和试件裂纹尺寸 a 之间的动态变化关系,即 $a-p$ 曲线。

(4) 利用 $p-N$ 曲线和 $a-p$ 曲线,通过对应即可获得试件裂纹的动态扩展的 $a-N$ 曲线,利用七点二次多项式拟合得 $da/dN-N$ 曲线^[6]。

(5) 再次利用预制裂纹后的 CAD 模型,通过有限元方法计算各裂纹扩展阶段裂纹前端的应力强度因子范围 ΔK ,结合 $da/dN-N$ 曲线,即可得到裂纹扩展速率曲线 $da/dN-\Delta K$ 。

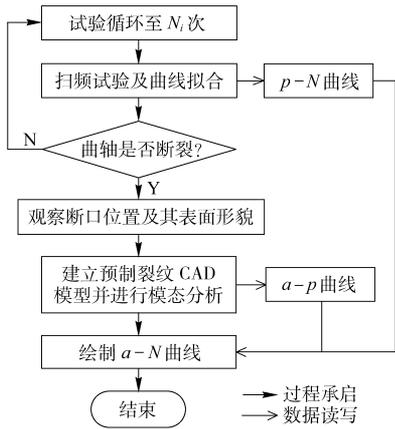


图2 扫频法曲轴裂纹扩展速率测定流程图

Fig.2 Test flow of crankshaft crack growth rate using spectrum scanning method

5 应用 AR 模型进行曲轴裂纹扩展模式识别

5.1 实测裂纹扩展行为特征

对某 6 缸增压柴油机的疲劳裂纹扩展进行了测试,试验采用恒载荷,应力水平为曲轴设计名义应力的 1.8 倍,共 4 个试件,编号为 1、2、3、4 号。应用扫频法得到的裂纹扩展速率曲线如图 3 所示。

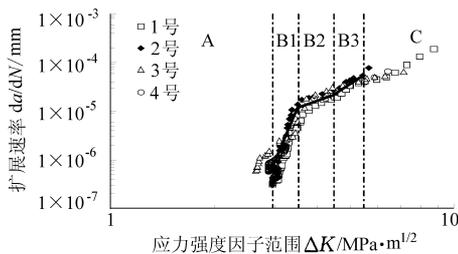


图3 曲轴裂纹扩展速率曲线及拟合曲线

Fig.3 Raw and fitted curves of the crankshafts' crack growth rate

习惯上将裂纹扩展的速率曲线分为 3 段,即近门槛区(A 区)、Paris 区(B 区)和临界区(C 区)。其中 Paris 区在 $da/dN-\Delta K$ 双对数坐标中一般呈线性规律。由于渗氮、滚压等强化处理导致材料性质变异和残余应力的影响,曲轴的疲劳裂纹在 B 区的

扩展速率曲线并非呈现单直线的线性规律,而是出现了 2 次较为明显的转折,具有三折线的形式,如图 3 所示,分别对应 B1、B2 和 B3。

严格意义上讲,疲劳裂纹扩展试验判定裂纹扩展进入 Paris 区是通过断口的理化检验为依据的,将裂纹顶端塑性区跨越多个晶粒产生双滑移机制时作为裂纹扩展进入 Paris 区的标志^[2]。工程上往往只是在形式上引用 Paris 区的定义,其判据根据具体实例各有不同。根据本例试验结果的离散程度及其呈现的规律,以扩展速率大于 1×10^{-6} mm/循环为进入 Paris 区的判据。

5.2 各阶段裂纹扩展模式异常度

对 1 号试件试验中所测得的振动系统加速度信号(位置如图 1 加速度传感器所示),建立了 AR 模型,由初始状态(无裂纹)时的模型参数构成参考模式向量,计算了各个时间段待检模式向量的异常度, Euclid 距离和 Mahalanobis 距离判据异常度分别如图 4 和图 5 所示。

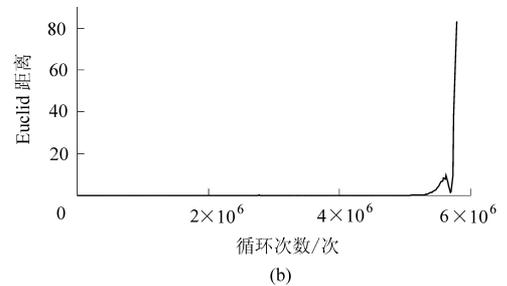
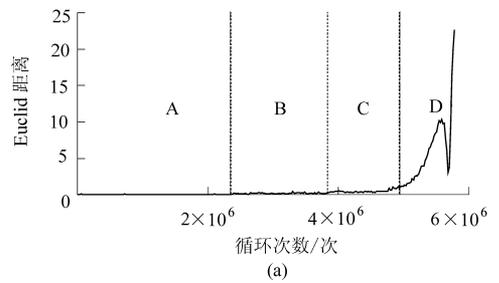


图4 Euclid 距离判据异常度曲线

Fig.4 Abnormality curve based on Euclid-distance
(a) AR(5) (b) AR(6)

由图 4 可见,5 阶 AR 模型的 Euclid 距离异常度曲线可分为 4 个区段:A、B、C、D。同样在 Mahalanobis 距离判据异常度曲线上也可分为 4 个区段。通过对比可以看出:Mahalanobis 由于考虑到了二阶矩,故其在阶段的区分上较 Euclid 距离明显一些。

5.3 计算结果对比分析

对于裂纹扩展速率,根据裂纹扩展区段分界点上的应力强度因子值得到相应的裂纹深度,再从 1 号试件的 $a-N$ 曲线上得到区段之间的跨越时间

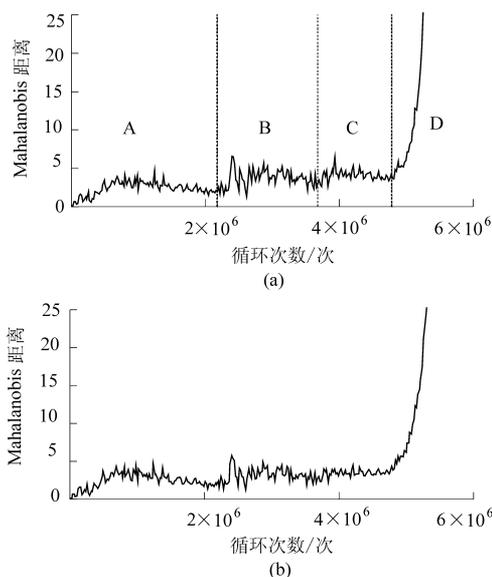


图5 Mahalanobis距离判据异常度曲线

Fig. 5 Abnormality curve based on Mahalanobis-distance
(a) AR (7) (b) AR (8)

对比可见,在裂纹扩展速率出现第一次明显转折,即A→B1之前,时序模型的计算结果已经出现了2次变化,即A→B和B→C。图3显示的裂纹扩展速率测试数据在其A区表现的比较散乱,有限的试样未能得出更多结论。而时序模型则在这一时期的裂纹扩展中出现了某一模式上的细微变化。

实际上,时序方法在其后的裂纹扩展中也有更多的大异常度变化,但由于这一期间裂纹扩展速率已经极快,且也接近寿命的极限,故在时序模型中仅给出了主要的4个区段。很显然C→D两区间的过渡是整个异常度曲线上突变最为明显的,这说明系统的某一隐含模式发生了明确的质变。而对比1号试件的试验结果也的确发现,在这个质变之后,曲轴的扩展进入了另一个不同的状态。外在的表现是此后的裂纹进入了一种“势如破竹”的发展态势,直至曲轴的完全断裂。

同时可以发现,时序模型的C→D过渡均出现于力学模型的B3→C跨越之前,即系统的力学模型在发生明确的裂纹扩展突变之前,时序模型已经提前感知。这说明时序模型对裂纹扩展的缓变参数是具有预测能力的。

6 结束语

探讨了将时间序列分析方法应用于谐振式曲轴弯曲疲劳试验系统的试验过程。用经典时序方法中的AR模型对试验系统加速度响应信号,以初始状态为参考总体进行了异常度的计算,并绘制了相应的异常度曲线。对比实测的疲劳裂纹扩展速率曲线可知,时序方法对曲轴弯曲疲劳裂纹扩展的跨区段形态具有预测性识别能力。

参 考 文 献

- 1 赵建生. 断裂力学及断裂物理[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2003.
- 2 Suresh S. 材料的疲劳[M]. 2版. 王中光,等,译. 北京:国防工业出版社, 1998.
- 3 杨叔子, 吴雅, 轩建平,等. 时间序列分析的工程应用(上、下册)[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1991.
- 4 傅惠民, 刘成瑞, 马小兵. 时间序列均值和方差函数的确定方法[J]. 机械强度, 2004, 26(2):164~169.
- 5 周迅. 曲轴疲劳行为及可靠性的理论与试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- 6 GB/T 6398—2000 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法[S].