

大型重载支承轴的疲劳裂纹时间序列诊断分析

李学军¹, 宾光富¹, 王裕清²

(1. 湖南科技大学振动冲击与诊断研究所, 湖南湘潭 411201;

2. 河南理工大学机械工程系, 河南焦作 454000)

[摘要] 大型重载支承轴隐蔽部位由于发生不可观测的突发性疲劳断裂, 严重影响正常生产, 给企业带来重大经济损失; 分析这类支承轴的结构特点与振动信号特征之间的关系, 运用时序分析方法对振动信号进行建模, 并采用残差 σ_a^2 和归一化残差平方和 NRSS 作为识别疲劳裂纹状态的特征指标, 有效诊断出了支承轴的疲劳裂纹程度。实验结果表明, 采用 σ_a^2 和 NRSS 作为特征指标的时序分析方法对大型重载支承轴隐蔽部位的疲劳裂纹状态进行诊断, 比常规的时频幅值特征分析法更为敏感有效、简便易行, 且具备很强的实用性。

[关键词] 大型重载; 支承轴; 隐蔽部位; 疲劳裂纹; 时间序列

[中图分类号] TQ172 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)04-0050-04

1 引言

大型重载机械结构设计的安全系数一般都取得较高, 在交变载荷下, 疲劳断裂是其失效的主要形式之一。对于这种尺寸大、载荷重的支承轴, 其隐蔽部位疲劳裂纹发展过程较长, 从结构外部往往难以直接观测, 因而疲劳断裂具有很大的突发性和不可观测性。这些重载机械往往是大型工矿企业连续生产的关键设备, 在结构部位发生不可观测的突发性断裂事故, 将导致整个生产线长时间停产, 不但造成重大的经济损失, 而且对人身和设备也存在安全隐患。其中回转窑的支承断轴便是一个例证^[1]。研究这类支承轴疲劳断裂发展过程中某些便于外部检测的特征参数, 以准确诊断结构疲劳裂纹发生、发展的过程, 具有积极的现实意义。

2 支承轴的疲劳裂纹振动特性

对大型重载支承轴疲劳裂纹进行检测, 必须先了解其疲劳裂纹振动特性, 这些特征是:

1) 由于台阶式轴的结构特点, 加上承受较大

的均布载荷, 从力学的角度分析可知, 轴肩为应力集中部位, 易出现裂纹^[2]。从大量生产现场断轴事故统计数据可知, 发生在这类支承轴隐蔽部位的疲劳断裂主要是在轴肩部位。

2) 文献[3]介绍了利用回转窑托轮轴疲劳断裂发展过程中刚度与振动响应特征之间的变化关系。通过对托轮基座振动信号的检测与分析, 可以判别托轮轴疲劳裂纹的发生、发展状况。根据轴在疲劳断裂过程中刚度变化与振动信号特征变化的这种关系, 在轴的外部(如支承座等)测取振动信号, 与无裂纹轴的振动响应信号特征进行比较, 可方便地判别支承轴是否产生裂纹及裂纹发生的程度。

3) 支承轴是低速转轴, 故障频率较小, 受环境低频噪声干扰较大, 对信号采集和故障诊断分析要求较高。可以采用时间序列分析方法对采集信号进行时序建模, 提取能反映支承轴隐蔽部位疲劳裂纹状态的特征指标, 准确判别疲劳裂纹程度^[4]。

4) 在交变应力作用下, 在轴的峰值应力较大的部位产生疲劳裂纹、裂纹扩展, 直至发生屈服或断裂。由于结构安全系数一般取值较大, 故整个过

[收稿日期] 2005-05-27; 修回日期 2005-08-17

[基金项目] 湖南省自然科学基金重点资助项目(05JJ20012); 湖南省教育厅重点科研计划资助项目(03A052); 湖南省重点实验室专项资助项目(01JZY2057-01)

[作者简介] 李学军(1969-), 男, 湖南湘潭市人; 湖南科技大学教授, 博士

程持续时间较长。根据现场经验，大型重载支承轴的疲劳裂纹从产生、扩展到断裂，长达一个多月甚至半年，因此只需对这类支承轴进行定期检测，就可知道其实际运行状态^[5]。

3 时序模型分析

时间序列建模有两方面的涵义：一是估计模型参数，它直接决定了模型的精度；二是模型阶次的适应性检验。阶次过低，容易漏掉当前值与前期值的依赖关系，影响模型精度；阶次过高，虽可提高模型的精度，但模型的不稳定性也相应提高。

目前对于模型的参数估计，主要有最小二乘法估计法、协方差估计法、Burg估计法、最大熵谱估计法、长自回归模型估计法和反馈线性估计等算法。一般来说，设备现场检测应用AR模型采用最小二乘法进行参数估计，其实质就是根据最小二乘法估计出 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 和 σ_a^2 这 $n+1$ 个参数，根据

$$a_i = x_i - \varphi_1 x_{i-1} - \varphi_2 x_{i-2} - \dots - \varphi_n x_{i-n} \quad (1)$$

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^n (x_i - \sum_{i=1}^n \varphi_i x_{i-1})^2 \quad (2)$$

可知，只要估计出 $\varphi_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，就可以估计出 σ_a^2 ，因此对AR(n)模型的参数估计实际就是估计 $\varphi_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的 n 个参数。AR(n)模型用矩阵形式表示为

$$y = x\varphi + a \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} y &= [y_{n+1}, y_{n+2}, \dots, y_N]^T; \\ \varphi &= [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]^T; \\ a &= [a_{n+1}, a_{n+2}, \dots, a_N]^T; \\ x &= \begin{pmatrix} x_n & x_{n-1} & \dots & x_1 \\ x_{n+1} & x_n & \dots & x_2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{N-1} & x_{N-2} & \dots & x_{N-n} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

根据多元回归理论，参数矩阵 φ 的最小二乘法估计为

$$\hat{\varphi} = (x^T x)^{-1} x^T y \quad (4)$$

对于模型阶次的判定，1971年赤池弘治提出了面向AR(n)模型的FPE (final prediction error) 定阶准则，FPE-准则函数为

$$FPE(n) = \frac{N+n}{N-n} \sigma_a^2 \quad (5)$$

显然，预测误差方差 $FPE(n)$ 是模型阶数 n 的函数， n 增大， $N+n/N-n$ 随之增大。 σ_a^2 开始随 n 的

增大而减小；当 n 超过序列的模型阶数 n_0 之后，理论上就不会减少了。由此可见，使 $FPE(n)$ 取最小值的那个 n 可判定为模型的最佳阶数^[6]。

当AR模型阶数确定后，可计算出残差信号的方差 σ_a^2 和归一化残差平方和NRSS，即

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=2}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (6)$$

$$NRSS = \sigma_a^2 / \sigma_x^2 \quad (7)$$

残差 σ_a^2 和归一化残差平方和NRSS与时序模型中的格林函数、自协方差函数、频率响应函数和自谱函数等重要参数一样，分别表示模型的时域和频域特性。在实际诊断分析中发现，它们与大型重载支承轴疲劳裂纹引起的振动状态密切相关，能够敏感地反映支承轴的运行状态变化。这种变化越大， σ_a^2 和NRSS的值增加就越多，因此，可以用它们来作为大型重载支承轴疲劳裂纹诊断的特征指标。

4 实验分析

由于支承轴大，运行周期长，特别是出现裂纹的时机难以把握，故对支承轴一般采用模拟实验的研究方法。笔者在对支承轴进行力学分析和振动特性分析的基础上，模拟实际工况建立了实验模型，如图1所示。实验采用45号钢，轴半径100mm，轴长1300mm，均布载荷 9.5×10^4 kN/m，用线切割在轴肩中间部位形成一个宽度为0.14mm的直线型裂缝代替裂纹。在支承轴的两端机座上分别安装压电式加速度传感器检测振动信号，由笔者自主研发的多功能集成式信号检测与分析系统进行放大、滤波、消噪等处理后进入计算机，再经相应的

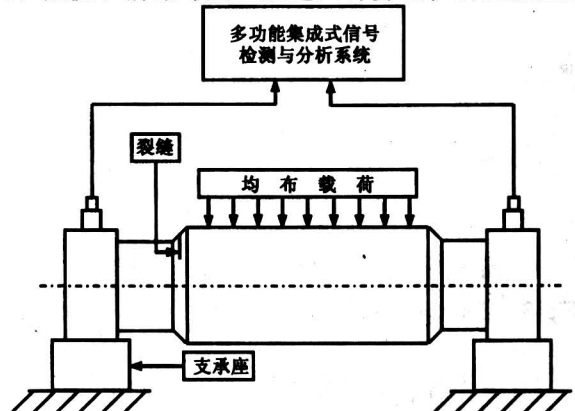


图1 支承轴模拟实验检测系统

Fig.1 The imitates experiment examination system of supporting shafts

信号分析与处理后在显示器上得到分析结果。

笔者取支承轴运行中裂纹产生、发展、断裂的 6 种状态作为分析数据进行状态建模、监测与故障诊断,如图 2 至图 7 所示。设 t 为支承轴裂纹深度, R 为支承轴半径,这 6 种状态以及所代表的情况分别为: $t/R = 0$ (正常运行), $t/R = 0.1/4$ (刚出现裂纹), $t/R = 1/4$ (裂纹较小), $t/R = 2/4$ (裂纹较大), $t/R = 3/4$ (裂纹很大), $t/R = 1$ (裂纹断裂前后)。由测试系统在 6 种模拟状态下测得的 6 组信号经处理后,得出 6 组时域、频域特性曲线。

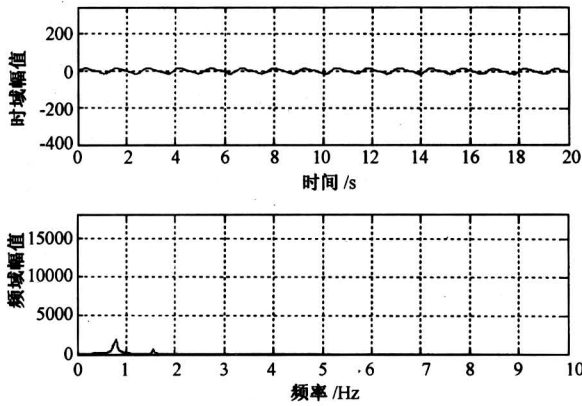


图 2 正常运行的时域、频域图

Fig.2 The time and frequency domain of working order

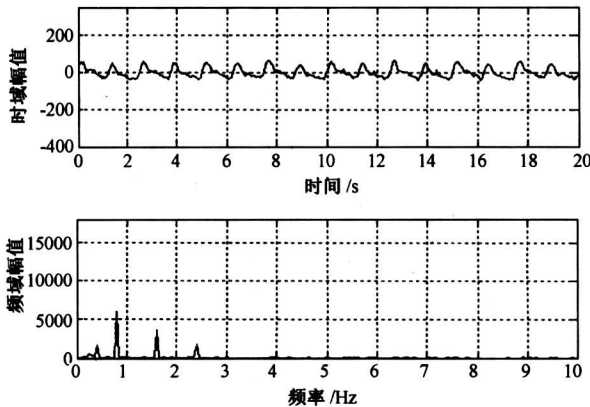


图 3 $t/R = 0.1/4$ 时的时域、频域图

Fig.3 The time and frequency domain of $t/R = 0.1/4$

笔者选用最小二乘法建立时间序列 AR 模型,并通过改变不同的模型阶次比较模型参数的变化以及模型估计误差的变化,最后应用 FPE 定阶准则来确定 AR 模型阶次。根据计算结果进行比较,可得出时序模型阶次为 5。

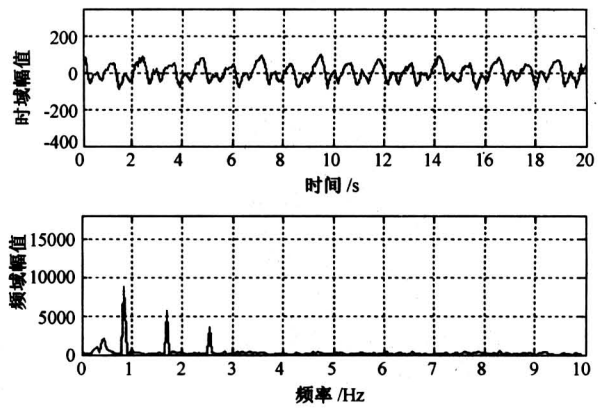


图 4 $t/R = 1/4$ 时的时域、频域图

Fig.4 The time and frequency domain of $t/R = 1/4$

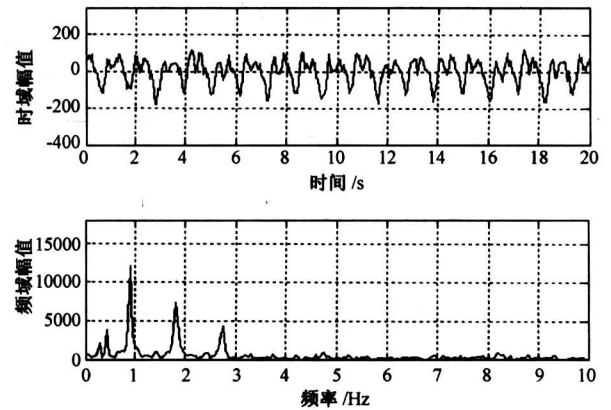


图 5 $t/R = 2/4$ 时的时域、频域图

Fig.5 The time and frequency domain of $t/R = 2/4$

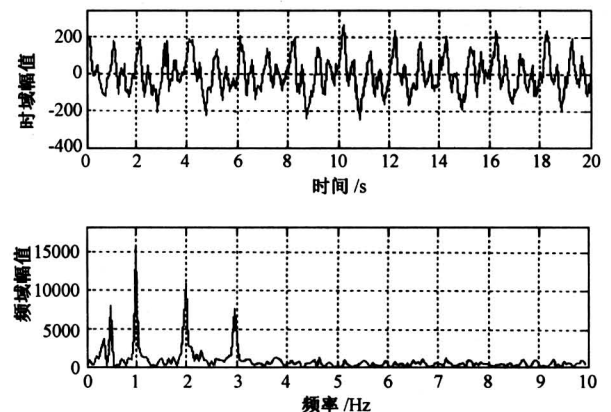


图 6 $t/R = 3/4$ 时的时域、频域图

Fig.6 The time and frequency domain of $t/R = 3/4$

表 1 是支承轴在实验条件下,处于 6 种状态的 AR(5)模型时域最大值、频域最大值、NRSS 和残

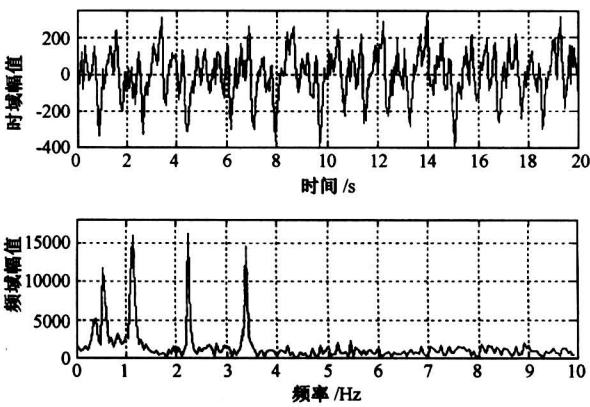


图7 $t/R = 1$ 时的时域、频域图

Fig.7 The time and frequency domain of $t/R = 1$

差的实验数据。为了便于比较分析，笔者对以上数据采用归一化处理，结果如表2所示。

表1 支承轴6种状态下时序模型的原始数据

Table 1 Primitive date of supporting shaft six kinds of state for time series model

支承轴状态	状态1	状态2	状态3	状态4	状态5	状态6
时域最大峰值	21.787	70.147	100.067	145.803	253.008	321.976
频域最大幅值	1 935	6 017	8 792	11 923	15 705	16 390
NRSS	0.015 9	0.068 2	0.162 3	0.328 9	0.458 6	0.623 7
残差	2.869 8	13.560 4	32.228 5	78.467 2	119.724	142.453

表2 支承轴6种状态下时序模型的归一化数据

Table 2 Return on turning date of supporting shaft six kinds of state for time series model

托轮轴状态	状态1	状态2	状态3	状态4	状态5	状态6
时域最大峰值	1	3.2	4.6	6.7	11.6	14.8
频域最大幅值	1	3.1	4.5	6.2	8.1	8.5
NRSS	1	4.3	10.2	20.7	28.8	37.3
残差	1	4.7	11.2	27.3	41.7	49.6

表1和表2的数值表明，支承轴疲劳裂纹越深，振动就越大， σ_a^2 和NRSS值增加也越多，且比时域幅值和频域幅值的增加要多得多，这说明它们对故障更为敏感。从疲劳裂纹的劣化状态来看， σ_a^2 和NRSS值比时域和频域幅值变化率均要高出1倍多，故采用它们作为支承轴疲劳裂纹状态判别的指标，比采用时域、频域幅值作为特征值要更为敏感有效。

采用残差 σ_a^2 和归一化残差平方和 NRSS 指标

来判定支承轴的运行状态，简便易行，不需要计算和识别支承轴故障特征频率和其他有关频率，就可以有效地诊断支承轴疲劳裂纹的发展状态。

5 结论

通过模拟实验，对大型重载支承轴隐蔽部位疲劳裂纹振动信号进行数据采集、分析与处理，得出如下结论：

- 1) 在故障诊断分析中，由于存在环境噪声、实际工况等因素影响，从时域和频域图谱中有时很难直接判断出大型重载支承轴疲劳裂纹状态的劣化趋势，故须对振动信号做进一步分析和处理。
- 2) 通过对振动信号的时间序列分析，得出残差 σ_a^2 和归一化残差平方和 NRSS 适于作为疲劳裂纹诊断的特征参数，它能敏感地反映出大型重载支承轴隐蔽部位疲劳裂纹的发展程度。
- 3) 可以动态检测支承轴的运行状态，简便易行，对现场开展设备诊断工作具有很大的实用性，对于设备的寿命预测研究具有一定的参考价值^[7]。

参考文献

[1] 容永泰. 提高回转窑的运转率(一)[J]. 中国建材装备, 1996, 5(1): 11~14

[2] 李学军, 朱萍玉, 等. 大型回转窑托轮轴断裂分析与防治[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(4): 60~63

[3] Li Xuejun, Zhu Pingyu, Liu Deshun. Diagnosis method for supporting wheel crack shaft of large-scale rotary kiln with multi-supporting based on vibration [J]. Progress in Safety Science and Technology, 2002 ISSST, III: 488~491

[4] 杨峰, 陈敬佑, 等. 回转式压缩机振动故障的时间序列分析[J]. 浙江工学院学报, 1994, 4(65): 81~84

[5] 李学军, 王梅松, 等. 大型回转窑支承轴断裂在线诊断技术[J]. 湘潭矿业学院学报, 2003, 18(1): 60~63

[6] 杨叔子, 吴雅, 等. 时间序列分析的工程应用(上,下)[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991. 256~258

[7] 魏昶华, 何光远. 用时序法预测滚动轴承工作寿命[A]. 第四届全国机械设备故障诊断学术会议论文集[C]. 1994. 688~690

(下转第93页)

- [18] 李本仁. 从国际展会看国际碎石制备机械的发展 [J]. 矿山机械, 1999, (10): 11~13
- [19] 孙成林, 徐正一. PC 破碎机的设计原理与特点 [J]. 中国非金属工业导刊, 2003, (34): 68~70
- [20] 孙成林. 破碎机的最新发展 [J]. 中国粉体技术, 2004, 6(2): 32~39

The Formation and the Research Content and Development Prospect of Crushing Mechanism

Dong Shuge^{1,2}, Rao Qilin²

(1. *Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China*;

2. *Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100044, China*)

[Abstract] Crushing mechanism is an engineering basic subject which is derived from mechanism, combined with interrelated crushing theory, and applied in crushing field. With the high efficiency and energy-saving development of mineral resources, and the change to crushing machine's application, crushing mechanism is becoming a more and more important subject, and forming a new mechanism branch. The modern development of crushing mechanism will accelerate theory's development of crushing mechanism in practice.

[Key words] crushing mechanism; crushing theory; crushing machine

(cont. from p.53)

Time Series Diagnosing Analysis for the Fatigue Crack of Large-scale and Heavyburden Supporting Shafts

Li Xuejun¹, Bin Guangfu¹, Wang Yuqing²

(1. *Institute of Vibration Impact & Diagnosis, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China*;

2. *Mechanical Engineering Department, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China*)

[Abstract] Because of the unobserved sudden fatigue failure of the large-scale and heavyburden supporting shafts, the normal product line is affected seriously. Based on analyzing the relationship between this type of supporting shafts construction characteristics and vibration signal characteristic, the model of the vibration signal is established by the method of time series. Residual (σ_a^2) and normal residue square sum (NRSS) are adopted to identify the fault state, and the degree of supporting shafts' fatigue crack is diagnosed effectively. The result of experiment shows that the method of time series using σ_a^2 and NRSS as the index to diagnose the fatigue crack of large-scale and heavyburden supporting shafts is more sensitive and effective than the normal method using time-frequency domain of amplitude, and has very strong practicability.

[Key words] large-scale and heavyburden machine; supporting shaft; concealment part; fatigue crack; time series