

基于随机减量的船舶主机振动测试*

熊铃华[†] 张俊波 蔡智华

(广州中国科学院工业技术研究院, 广州 511458)

摘要 对某油轮结构进行了振动特性测试并获得了信号数据. 通过对测试信号的插值和随机减量算法设计, 编程计算并辨识了结构的振动特征信息, 同时分析了信号插值和样本选取对计算结果的影响. 与测试仪器系统内部算法相比, 随机减量算法所得的结果更为精确, 可为船舶结构可靠性设计和故障诊断提供借鉴.

关键词 随机减量, 船舶主机, 振动, 参数识别, 可靠性

DOI: 10.6052/1672-6553-2013-103

引言

船舶结构特别是内部舾装结构的振动关系到整船的使用寿命、可靠性和安全性. 在十万吨以上货轮主机机舱区域, 因为主机运行功率高, 在一定距离内又有发电机组等机械设备运转, 且舱室内支撑结构错综复杂, 更受海况等外界因素的影响, 主机的振动参数在环境噪声的激励与干扰下较难识别. 如何准确地捕捉这些舾装结构的模态等参数, 避免因振动带来的不安全或减少行船效率的因素, 对船舶设计和结构可靠性研究都有着重要作用.

信号分析一直是工程测试与评价过程中重要的一环. 在实际工程振动测试信号中, 因为测试环境或者设备等因素使得测试数据并不理想, 代表结构自身特性的振动参数往往被噪声覆盖, 造成数据参数识别的误差甚至错误. 为了得到精确的振动参数, 在获得实测信号后, 必须利用信号处理方法对测试信号进行处理, 通过剔除噪声, 从而达到识别信号特征参数的目的^[1,2]. 随机减量技术最早由 Cole 于 1968 年提出并发展起来^[3], 1982 年, Vandiver 等用随机减量技术应用于单输入输出系统并建立了较严密的数学基础^[4]. Bedewi 进一步将其拓展到线性多自由度动力系统^[5], 阐述了当输入的外激励是高斯白噪声随机过程时, 独立的和互随机减量特征信号等价于系统的自由衰减响应. 1999 年, Huang 等扩展了 Vandiver 和 Bedewi 的工作, 通

过严密的数学推导和数值模拟, 完善了随机减量特征信号的数学基础^[6]. 本文将在随机减量理论上改进算法并编写计算机程序, 并通过实时接收实测信号进行处理, 分析某大型油轮主发动机的振动频率参数, 同时分析信号插值和样本选取对计算结果的影响, 探讨随机减量方法在船舶可靠性设计中的作用.

1 随机减量算法与编程改进

随机减量技术(Random Decrement Technique)是一种利用时间平均从振动信号中提取自由衰减响应或随机减量特征信号的方法. 技术核心为假定一个受到平稳随机激励的振动系统, 其响应是由初始条件决定的确定性响应和外载荷的随机响应两者的迭加, 在相同初始条件下对响应的的时间历程进行多段截取, 并计算总体平均, 从而达到剔除外部随机响应提取自由衰减响应的目的^[7].

多自由度系统的运动微分方程为^[8]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1)$$

式(1)中 m 是系统质量矩阵, c 是系统阻尼矩阵, k 是系统刚度矩阵, $F(t)$ 是激励载荷, x 为系统振动响应值. 引入符号算子

$$L_{ij} = m_{ij} \frac{d^2}{dt^2} + c_{ij} \frac{d}{dt} + k_{ij} \quad (2)$$

式(1)可简化为

$$Lx = F \quad (3)$$

2013-10-09 收到第1稿, 2013-11-04 收到修改稿.

* 广东省科技计划资助项目(2012A080102008), 广州市超算研发与扶持专项(2012Y2-00039)

[†] 通讯作者 E-mail: xiong_linghua@126.com

设一外界激励为 F 的随机过程, 信号谱表示为 $x_n(t)$, 取阈值 x_d , 设阈值与信号谱有交点 t_n ($n = 1, 2, \dots, N$), 分别以这些交点为初始点, 取长度为 τ 的信号样本 P 份并进行迭加平均, 得到

$$\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P Lx(t_n + \tau) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P F(t_n + \tau) \quad (4)$$

若外部激励 F 是均值为 0 的高斯白噪声, 则样本数足够多的情况下式(4)右边为 0, 则式(3)可写为

$$Lx = 0 \quad (5)$$

式(5)即为系统的自由振动微分方程. 这样, 就可以从中获取振动特征参数.

将随机减量特征信号表达为理论形式

$$x(t) = \sum_{i=1}^n e^{a_i t} [c_i \cos(b_i t) + d_i \sin(b_i t)] \quad (6)$$

式中 n 为模态阶数, a_i, b_i, c_i, d_i 为待定参数. 若准则函数为^[9,10]:

$$I(\theta) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \{x(t) - \sum_{i=1}^n e^{a_i t} [c_i \cos(b_i t) + d_i \sin(b_i t)]\}^2 \quad (7)$$

式中 $x(t)$ 为自由振动的位移响应, M 为测点数. 当识别到 θ 后, 可确定待定系数, 并解得第 i 阶固有频率:

$$\omega_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \quad (8)$$

和阻尼比:

$$\xi_i = -\frac{a_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \quad (9)$$

在实际测试和分析过程中, 环境噪声太大且受测试仪器采样频率局限, 式(4)中的信号谱 $x_n(t)$ 离散度通常会很高, 往往进行迭加平均后, 特征信号也无意间被处理掉, 严重影响了随机减量算法的应用效果. 若在编程过程中对采样点进行高阶非线性插值, 用虚拟采样点填充原始采样, 并设置插值点数动态可调, 可以有效减小预测频率参数的宽度, 达到准确获取系统频率的目的.

2 实例分析

海试试验是新船交付船东前对整船性能的一次全面检测, 船体结构振动检测是其中重要一环(图1). 图2(a)是该船在某海况下主机的振动加速度信号测试数据, 其信号受环境噪声的影响较大. 将信号进行快速傅里叶变换, 对其频域进行分析, 如图2(b)所示, 由于环境噪声较大, 较难快速

地在原始测试数据上准确捕捉其频率参数.



图1 某海船主机振动测试现场

Fig.1 Vibration test site of a ship host

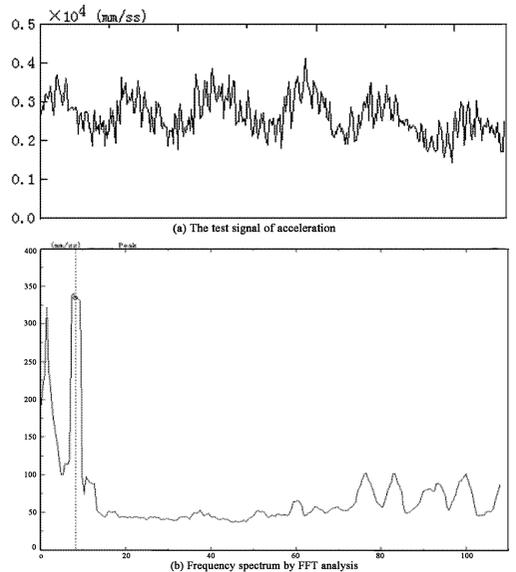


图2 实测信号与傅立叶频谱变换

Fig.2 The test signal of acceleration and FFT analysis

现采用随机减量技术对实测信号进行分析. 实例分析以某工况下加速度信号为样本, 采用 C++ 程序语言将随机减量算法编制成分析软件, 并实时导入来自传感器的测试数据, 进行信号频率参数的识别和实现振动谱的可视化(图3(a)、(b)).

实际上, 由于仪器采样频率的存在, 信号谱是不连续的, 从而影响到分析结果准确性^[11,12]. 在算法编程中通过对原测试信号进行插值运算(即在每个采样点间进行高阶非线性插值), 通过不断调整采样点间的插值点数, 实现插值量(原信号采样周期内插值点的个数)、阈值和样本时长(测试信号上截取的时间段长度)的动态可调, 逐渐减小了因采样频率带来的误差(基频频宽), 并分析了插值量对频率结果的影响及与快速傅立叶变化结果的比较(表1).

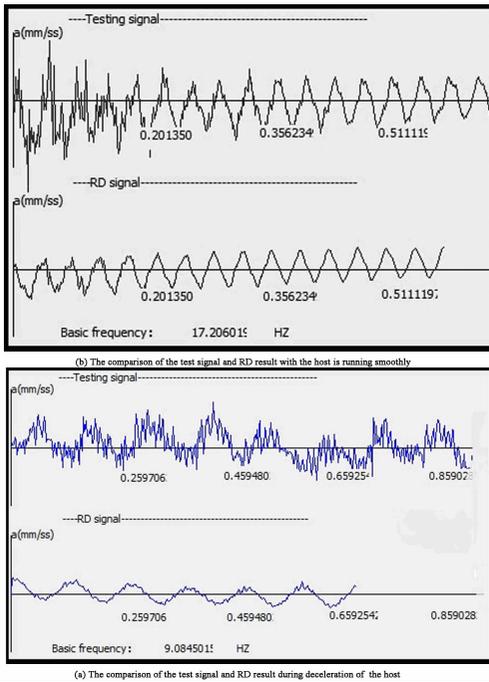


图3 测试信号数据与随机减量结果程序输出界面

Fig. 3 The output interface of the test signal and RD result

表1 基频随插值量的收敛情况

Table 1 Convergence of the result of basic frequency

Interpolation Number	Interpolation value	Basic frequency (Hz)	Basic frequency by FFT (Hz)
1	0	8.55	
2	1	8.67	
3	2	8.89	8.3 - 9.45
4	5	9.08	
5	9	9.08	
6	10	9.08	

3 分析讨论

从测试和分析实例可以看出,船舶主机振动过程中的环境噪声大部分为随机白噪声,且能被分析程序有效过滤,随机减量处理过滤掉了原始实测信号中的大部分环境噪声,从而提取出船体结构的自由振动响应,快速准确地得到其固有频率.对原始测试信号采用插值运算后,可以有效减少采样频率的影响,当逐渐增加插值量后,信号的频率参数趋于收敛.而相同信号用测试系统内部的快速傅立叶变换法仅能得到频宽从8.3Hz到9.45Hz的频率结果.通过对比说明,该分析程序能得到更为准确的频率参数.

该分析程序可作为对测试仪器自身软件的二次开发程序,并可在现场测试的同时快速准确显示

当前振动的频率参数,为船舶机座和周边舾装结构的可靠性设计和故障诊断提供参考依据.

参 考 文 献

- 1 黄方林,何旭辉等. 随机减量法在斜拉桥拉索模态参数识别中的应用. 机械强度, 2002, 24(3): 331 ~ 334, (Huang F L, He X H. Application of random decrement technique to modal parameter identification of cables for a cable-stayed bridge. *Journal of Mechanical Strength*, 2002, 24(3): 331 ~ 334 (in Chinese))
- 2 付英. 基础激励下桥梁斜拉索的非线性振动. 动力学与控制学报, 2010, 8(1): 57 ~ 61 (Fu Y. Nonlinear vibration of cables in cable-stayed bridge under foundation excitation. *Journal of Dynamics and Control*, 2010, 8(1): 57 ~ 61 (in Chinese))
- 3 Cole H A. On-the-line analysis of random vibrations. In: Proceeding of AIAA/ASME 9th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA, 1968: 68 ~ 288
- 4 Vandiver J K, Dunwoody A B. A mathematical basis for the random decrement vibration signature analysis technique. ASME Trans. *Journal of Mechanical Design*, 1982, 104(4): 307 ~ 313
- 5 Bedewi N E. The mathematical foundation of the auto and cross-random decrement techniques and the development of a system identification technique for the detection of structural deterioration. Ph. D thesis, University of Maryland, 1986: 33 ~ 39
- 6 Huang C S, Yeh C H. Some properties of random signatures. *Mechanical System and Signal Processing*, 1999, 13(3): 491 ~ 507
- 7 史文海,李正农等. 随机减量技术的研究现状及进展. 防灾减灾工程学报, 2008, 28: 52 ~ 53 (Shi W H, Li Z N, The Present State and Development of random decrement. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2002, 24(3): 331 ~ 334 (in Chinese))
- 8 狄长安. 工程测试与信息处理. 北京: 国防工业出版社, 2010: 32 ~ 33 (Di C A. Engineering test and information processing. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 32 ~ 33 (in Chinese))
- 9 Chang S L, Dar Y C. Modal identification from nonstationary ambient response data using extended random decrement algorithm. *Journal of Computers and Structures*, 2013, 119: 104 ~ 114
- 10 Chiu J K, Jack E, Chou L S. Random decrement based

- method for modal parameter identification of a dynamic system using acceleration responses. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 9(6):389 ~ 410
- 11 王学敏, 黄方林. 大型桥梁模态参数识别的一种方法. *工程力学*, 2007, 24(2):110 ~ 114 (Wang X M, Huang F L. A method of modal parameter identification for large bridges. *Journal of Engineering Mechanics*, 2007, 24(2):110 ~ 114 (in Chinese))
- 12 李国强, 李杰. 工程结构动力检测理论与应用. 北京: 科学出版社, 2001:22 ~ 25 (Li G Q, Li J. Structural engineering theory and application of dynamic testing. Beijing: Science Press, 2001:22 ~ 25 (in Chinese))

VIBRATION TEST OF A SHIP HOST BASED ON RANDOM DECREMENT *

Xiong Linghua[†] Zhang Junbo Chai Zhihua

(Institute of Industry Technology Guangzhou & Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China)

Abstract By testing on an oil ship, the acceleration-time signal of vibration on main engine was obtained. Based on interpolation operation of test signal and RD (Random Decrement) algorithm, the mode and other parameters of the signal were recognized. The impact of the sampling frequency and interpolation in algorithm upon the parameter was analyzed. Compared with FFT algorithm in test system, the RD result is more precise, and can be applied to the ship's structure reliability design and fault diagnosis.

Key words random decrement, ship host, vibration, parameter recognition, reliability

Received 9 October 2013, revised 4 November 2013.

* The project supported by the Science and Technology Plan of Guangdong(2012A080102008), and the Specific Plan of Application and Research of Supercomputing of Guangzhou (2012Y2-00039)

[†] Corresponding author E-mail: xiong_linghua@126.com