

基于小波分析的发动机 转动惯量测量信号特征提取

孙百红, 宋少伟

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 在采用单摆法进行某型号发动机整机转动惯量测量中, 发现测量信号含有许多其他信号成分, 这给准确提取发动机转动惯量相关参数带来一定的干扰。利用小波多分辨率分析特性对测量信号进行处理分析, 有效地将实际有用信号和干扰信号分开。通过对有用信号的分析, 准确提取到了整个振动系统的振动频率、对数衰减及阻尼系数等参数, 并分析了系统阻尼对振动频率的影响; 通过对干扰信号的特征分析, 弄清了干扰源, 发现了实验设备存在的工艺缺陷。将小波分析应用于发动机实际工程测试和分析, 能准确提取结构动力学参数、提高测量精度及进行故障分析。

关键词: 发动机; 小波分析; 特征提取

中图分类号: V434.12-33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2010) 06-0052-04

Feature extraction for measurement signal of engine rotary inertia moment based on wavelet analysis

SUN Bai-hong, SONG Shao-wei

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Some undesired signals which brought some difficulties for extracting parameters of engine inertia moment were found in a certain engine inertia moment measurement. The useful signals were separated from the undesired signals through the wavelet multi-resolution-analysis. Some engine parameters such as vibrational frequency, logarithmic decrement and the damping ratio were obtained from the useful signals. The impact of the damping on the vibrational frequency of the system was also analyzed. The interference sources and the technique defects were found by the feature analysis of the undesired signals. Results show that the wavelet analysis is a useful tool that may be used to extract the structural dynamic parameters, improve the measurement accuracy and locate the damage in the engine system.

Keywords: engine; wavelet analysis; feature extraction

收稿日期: 2010-09-11; 修回日期: 2010-10-20

基金项目: 国家航天技术支撑项目

作者简介: 孙百红 (1976—), 女, 硕士, 研究领域为发动机结构强度分析与数据处理

0 引言

发动机质心位置及其转动惯量是运载火箭的重要质量特性参数, 对火箭的总体布局以及伺服机构的正常工作起着至关重要的作用。由于液体火箭发动机结构复杂, 理论计算很难准确地确定发动机质心位置和转动惯量, 而且从工程实用和可靠性角度出发, 单靠理论计算的风险较大。因此, 必须进行实际的质心及转动惯量测量才能较为精确的确定发动机质心位置及其转动惯量。

采用单摆法对某型号发动机转动惯量进行测量, 发现周期测量信号包含了许多其他信号成分, 这给准确地提取发动机转动惯量相关参数带来一定的干扰。本文利用小波分析良好的多分辨率分析特性对测量信号进行处理分析, 有效地将有用信号和干扰信号分离, 分别对有用信号和干扰信号进行特征分析, 准确提取到了振动频率及系统阻尼比等动力学参数, 弄清了干扰源, 发现了试验设备存在的工艺缺陷。

1 试验测量原理

某发动机质心、转动惯量试验测量系统如图 1 所示, 采用轴悬挂方法通过悬挂三个不同位置来确定发动机的质心, 采用单摆方法^[1-3]通过加速度传感器来测量整个系统的微摆周期, 继而得到发动机与试验工装的质心及其绕悬挂轴的转动惯量。又由于试验工装结构规则, 其质心和转动惯很容易通过理论计算得到, 所以通过必要的公式推导即可得到发动机的质心位置及其转动惯量。

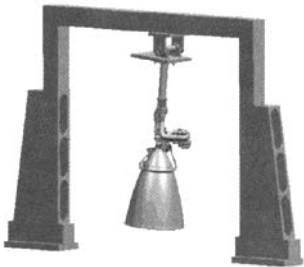


图 1 试验系统图

Fig. 1 Experiment system

2 多尺度离散小波分析

多尺度离散小波分析即多分辨率分析^[4], 对于其理解, 以一个三层分解进行说明, 其小波分解树及信号的三层小波分解分别如图 2 所示。可见, 多分辨率分析只是对信号低频做进一步分解, 而对高频部分则不予考虑, 且具有以下分解关系: $S=cD_3+cD_2+cD_1+cA_3$ 。

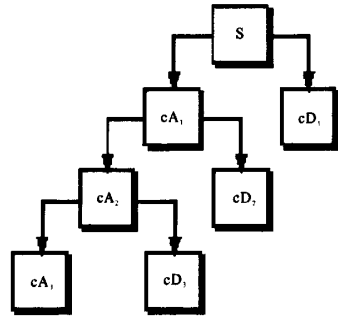


图 2 多分辨率分析树形结构

Fig. 2 The multi-resolution-analysis tree structure

多分辨率分析算法, 设 V_j 表示图 2 中的低频部分 cA_j , W_j 表示 V_j 在 V_{j+1} 中的正交补, 符号 \oplus 代表两个子空间的正交和, 即:

$$V_j \oplus W_j = V_{j+1} \quad j \in Z \quad (1)$$

显然:

$$V_j \oplus W_j \oplus W_{j+1} \oplus \dots \oplus W_{j+m} = V_{j+m} \quad (2)$$

则多分辨率分析的子空间 V_0 可以用有限个子空间来逼近, 即有:

$$V_N \oplus W_N \oplus W_{N-1} \oplus W_{N-2} \oplus \dots \oplus W_2 \oplus W_1 \quad (3)$$

空间列 $\{W_j | j \in Z\}$ 具有性质:

$$f(t) \in W_j \Rightarrow f(t-2^j n) \in W_j \quad j, n \in Z$$

$$f(t) \in W_j \Leftrightarrow f(2^j t) \in W_{j+1} \quad j \in Z$$

$P_{W_j} \rightarrow 0$, 当 $|j| \rightarrow \infty$ 对任意 $f \in L^2(R)$ 和 V_j 一样, 找出一个函数 $\psi(t) \in W_0$, 使得对每一个 $j \in Z$, 函数 $\{\psi_{j,n} | n \in Z\}$ 构成空间 W_j 的规范正交基, 其中 $\psi_{j,n}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j} t - n)$ 。

令 $f_j \in V_j$ 代表分辨率为 2^j 的函数的逼近 (即函数的低频部分), 而 $d_j \in W_j$ 代表逼近的误差

(即函数的高频部分), 则公式 (3) 可写为

$$f_0 = f_1 + f_d = f_2 + d_2 = d_1 = \cdots = f_N + d_N + d_{N-1} + \cdots + d_2 + d_1$$

注意到 $f = f_0$, 则上式可简化为

$$f = f_N + \sum_{N=1}^N d_i \quad (4)$$

这表明, 任何函数 $f_j \in L^2(R)$ 都可以根据分辨率为 2^{-N} 时 f 的低频部分和分辨率 2^{-j} ($1 \leq j \leq N$) 下 f 的高频部分完全重构, 这就是著名的 Mallat 塔式重构算法的基本思想。

3 测量信号特征提取

采用单摆法测量发动机微摆周期时, 实际测量得到的原始信号 S 如图 3 所示, 可见信号夹杂着很多毛刺, 说明信号中混有其他信号成份, 且信号的衰减趋势并不明朗, 对信号的特征提取具有一定的干扰。

由上节知道小波多分辨分析能够将信号分解到不同频段上, 又因为整个发动机系统微幅摆动的频率很低, 由原始测量信号可以粗略看出频率大约在 $0.4 \sim 0.5$ Hz 之间, 所以通过多尺度小波分解得到的信号低频部分并不会丢掉信号的有用成分。已知信号采样频率为 2056 Hz, 采用 DB₁ 小波对原始测量信号 S 进行 4 层小波分解和重构, 则 $S = cD_4 + cD_3 + cD_2 + cD_1 + cA_4$ 。由图 3 可见, 相对于原始信号 S , 子带 cA_4 比较光滑且毛刺较少能够反映整个信号衰减发展变化趋势, 是更加精确的系统微摆振动的有用信号。

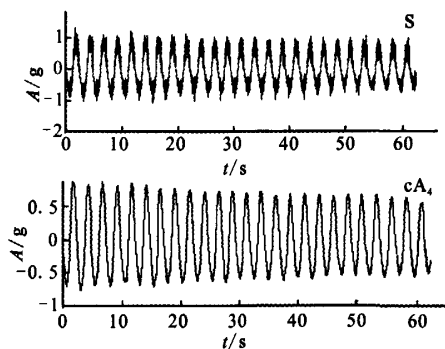


图 3 原始信号及子带 cA_4

Fig. 3 The original signal and a part of signal cA_4

根据衰减振动对数衰减 δ 定义^[9], 参考图 4 子带 cA_4 整个时域波形有:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_1}{x_{n+1}} = 0.03765$$

又由于对数衰减 $\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$, 则阻尼系数

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + 1}} = 5.92e-3$$

已知衰减振动的频率

$$f = \frac{q}{2\pi} = \frac{\sqrt{1-\zeta^2} p}{2\pi}$$

式中: q 为衰减振动的圆频率; p 为无阻尼系统的圆频率。则 $\frac{q}{p} = \sqrt{1-\zeta^2} = 99.998\%$, 可见系统阻尼对振系的振动频率影响很小。

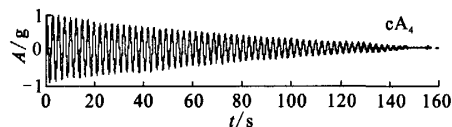


图 4 子带 cA_4 整个时域波形

Fig. 4 Waveform in whole time sequence of cA_4

高频部分 cD_4 、 cD_3 、 cD_2 及 cD_1 的时域波形见图 5, 可见子带 cD_1 、 cD_2 及 cD_3 的信号都存在明显的等间距冲击现象, 且时间上是吻合的。而子带 cD_4 的信号中隐约有一串瞬态冲击的迹象, 但很不明显, 这是由于子带 cD_4 所在的频段频率低, 高频冲击现象并不明显。

分析整个试验系统, 轴承环节最有可能产生等间隔的高频冲击, 当轴承的内环有剥蚀凹坑存在时, 每个滚子滚到这个位置时就要产生一个冲击, 又由于瞬态冲击信号的频率应该分布在一个很宽的频带内, 所以子带 cD_1 、 cD_2 及 cD_3 的信号都会有冲击出现, 另外在系统摆动周期不变的情况下, 产生的冲击应该是一串等间隔的冲击, 子带 cD_1 、 cD_2 及 cD_3 的信号正是内环剥蚀的特征信号。又由于相邻冲击并不相同, 所以应该是有两处剥蚀凹坑, 每一个滚子滚到凹坑处都会产生冲击。对于原始信号, 由于冲击分量在信号中所占的比重小, 整个系统的微幅摆动能量占了绝对优势, 所以瞬态冲击被淹没了^[9]。

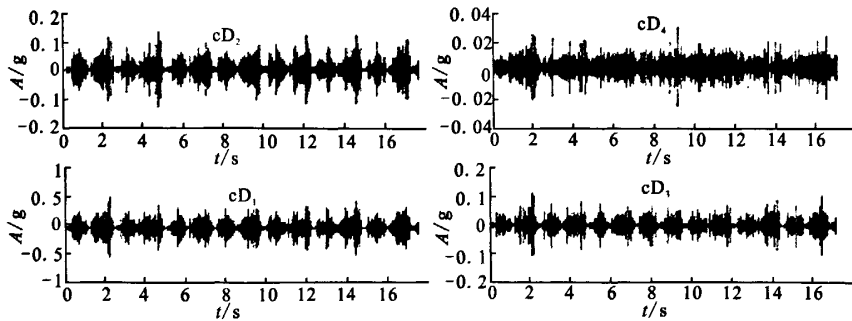


图 5 原始信号高频分量

Fig. 5 High-frequency components of original signal

随后对试验用轴承进行检测, 在试验过程接触部分的确发现两处剥蚀凹坑, 证明了分析的正确性。在故障诊断中特别是旋转机械故障诊断分析中, 适当地利用小波分析提取信号特征, 再配以适当的故障诊断方法, 就能够进一步进行故障模式的识别^[7-10]。

4 结束语

对某液体火箭发动机转动惯量测量信号进行小波分析, 有效地将实际有用信号和干扰信号分开, 准确地提取到结构动力学参数, 识别了系统中的干扰源, 发现了实验仪器设备工艺缺陷, 对提高试验测量精度以及旋转机械的故障诊断具有一定实际意义。

参考文献:

- [1] 郭建平. 构件转动惯量的测试方法初探 [J]. 河南教育学院学报, 2000, 9 (3): 23-25.
- [2] 贺占魁, 樊启泰. 复杂不规则刚体转动惯量测试原理和方法[J]. 机械设计与研究, 2003, 19 (2): 59-60.
- [3] 余卓平, 左建令. 复杂形状构件转动惯量的测量方法及误差分析[J]. 机械设计, 2005, 22 (10): 38-39.
- [4] 胡昌华, 张军波, 夏军. 基于 MATLAB 7.X 的系统分析与设计: 小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [5] 季文美, 方同, 陈松淇. 机械振动 [M]. 西安: 科学出版社, 1985.
- [6] 杨建国. 小波分析及其工程应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [7] 宋雪萍, 李朝峰. 基于小波分析的旋转机械故障诊断技术及其试验研究 [J]. 中国机械工程, 2006, 17 (增): 328-331.
- [8] 史丽晨, 段志善, 石智. 小波多分辨分析在往复活塞隔膜泵故障诊断中的应用研究[J]. 矿山机械, 2007, 35 (8): 107-109.
- [9] 敦怡, 师小红, 徐章遂. 基于小波变换的固体火箭发动机深层界面超声回波信号分析[J]. 固体火箭技术, 2007, 30 (1): 81-86.
- [10] 乔晋崴, 尚建忠, 罗自荣, 等. 基于 WVD 与多分辨分析的发动机故障诊断[J]. 机械制造, 2008, 46 (3): 68-70.

(编辑: 马 杰)