

文章编号:1000-582X(2005)03-0001-03

车辆减振器噪声诊断的双谱分析法*

舒红宇,熊木权

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

摘要:噪声正常与异常的车辆减振器振动信号具有不同的高斯性和对称性特征。以双谱分析理论为基础,分析并计算了不同振动信号的选择双谱。采用选择双谱来提取振动信号的故障特征,通过马氏距离判别法来实现对车辆减振器异常噪声诊断。诊断结果与实际相符,从而验证了双谱分析法的有效性和实用性。对进一步了解减振器异响发生机理,寻求异响控制具有工程意义。

关键词:车辆减振器;异常噪声;故障诊断;双谱分析

中图分类号:TH703.63

文献标识码:A

车辆悬架系统是由线性刚度和非线性阻尼组成的非线性振动系统,筒式减振器是其中主要的非线性减振装置。由于诸多原因某些汽车的减振器经常发生异常噪声现象^[1-2]。车辆减振器噪声振动信号成分复杂,系统的振动过程存在着明显的非线性特征,尤其是减振器系统出现故障时,这种非线性特征将更加突出。在故障诊断中,检测信号往往含有各种噪声,信噪比很低的检测信号给信号特征的提取带来很大困难。当前常用的故障特征提取方法,多是假设振动信号具有平稳和高斯分布的特性^[3]。在车辆减振器的噪声振动测试中,噪声正常与异常的车辆减振器振动信号具有不同的高斯性和对称性,信号表现出一定的非高斯性、歪斜性和非线性特征。高阶谱是分析非高斯信号的有力工具,它从更高阶概率结构表征随机信号,有很强的治噪能力,理论上能完全抑制高斯噪声。因此,高阶谱分析,尤其是双谱分析是非高斯信号处理及识别非线性系统故障的有力工具。然而,由于双谱是二维函数,所以直接使用信号的全部双谱作为信号特征将导致计算量庞大。故采用选择双谱,就是把那些具有最强类可分离度的双谱选作为信号的特征参数。笔者以某厂车辆减振器为对象,采用双谱分析方法,成功地将正常噪声的减振器与异常噪声的减振器进行了分类,实现了车辆减振器异常噪声诊断。

1 双谱的定义

对于一个离散、平稳时间序列 $\{X(t)\}, t=1, 2, \dots, N$,根据信号的离散傅里叶变换,离散双谱的定义为:

$$B(\omega_1, \omega_2) = E[X(\omega_1)X(\omega_2)X(-\omega_1 - \omega_2)] \quad (1)$$

离散双谱 $B(\omega_1, \omega_2)$ 为复数,包含相位信息,是2个独立频率变量 ω_1, ω_2 的函数。双谱表达了谱值 $B(\omega_1, \omega_2)$ 与2个频率变量 ω_1, ω_2 3个谱元之间相关性,反映了信号的偏态特性。功率谱表征信号能量随频率的分布,功率谱相当于信号方差在频域的分解;双谱则是信号歪度在频域的分解,因而可以描述信号非对称、非线性的特征。因此用双谱来描述车辆减振器的振动信号是合适的。

2 双谱的计算

双谱估计分为非参数化和参数化估计2种。下面将给出参数化双谱估计的一种算法:1)建立自回归AR模型^[4]对于一个离散、平稳时间序列 $\{X(t)\}, t=1, 2, \dots, N$,可以建立一个自回归参数模型AR:

$$x(n) = - \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + e(n) \quad (2)$$

式中 a_k, p 为AR模型的参数和阶数, $e(n)$ 是均值为零,方差为 ρ^2 的白噪声。

自回归AR模型的系数和白噪声的方差可以通过

* 收稿日期:2004-10-09

基金项目:机械传动国家重点实验室访问学者基金资助(200244)

作者简介:舒红宇(1963-),男,重庆人,重庆大学副教授,博士,主要从事车辆动力学、汽车电子控制技术研究。

Burg 算法来确定,这种算法直接由时间序列 $\{X(t)\}$ 确定系数和方差,从而使参数估计的精度较高。对于 AR 模型而言,阶次 p 的大小意味着预测方程中包含多少过去的样本。如果模型的阶次选择太低,虽可减少工作量,但会导致“频谱”过于简单和平坦,忽略了轮廓峰谷结构的细节,出现“失真”。相反,如果模型的阶次选择过高,不但会增大计算量,还可能使得“频谱”出现不该出现的“假峰”。采用 AIC 信息准确确定自回归 AR 模型的阶数,并最终通过试验方法确定 AR 模型的阶数为 31。

2) 计算时间序列 $\{X(t)\}$ 白噪声的三阶矩 β

$$\beta = E[e^3(n)] \quad (3)$$

由于 AR 模型是线性模型,因此,如果系统具有非线性特性时,其残差序列 $e(n)$ 是一个非正态分布的白噪声序列,其三阶矩 β 不为零;而对于线性系统,其残差序列 $e(n)$ 是一个正态分布的白噪声序列,其三阶矩 β 等于零。

3) 由 AR 模型估计双谱计算公式为:

$$B(\omega_1, \omega_2) = \beta H(\omega_1)H(\omega_2)H(-\omega_1 - \omega_2) \quad (4)$$

式中, $H(\omega)$ 为 AR 模型所描述系统的频率特性函数,其计算公式为:

$$H(\omega) = 1/[1 + \sum_{k=1}^p a_k \exp(-j\omega k)] \quad (5)$$

式中 a_k, p 为 AR 模型的参数和阶数。

3 采用选择双谱来提取故障特征

由于双谱是二维函数,所以直接使用信号的全部双谱作为信号特征将导致计算量庞大。显然要将二维的双谱作降维处理。通常某条路径的积分双谱被选择作为信号特征,是指这条路径上的所有的双谱之和在目标识别中起着重要作用。显然,这并不意味着该路径上的每一个双谱都对目标识别起重要作用。可能存在某些双谱点,它们对目标识别所起的作用不大,属于平凡的双谱。

如果原观测信号存在交叉项,则通过 3 次相关函数得到三阶累积量时,交叉项将更加严重。故在双谱估计中,交叉项一般比较严重,交叉项往往对目标识别是有害的。

为了克服积分双谱的上述缺点,Zhang 等人提出了选择双谱方法^[5]。所谓选择双谱,就是只有那些具有最强类可分离度的双谱才被选作信号的特征参数。这可以避免平凡双谱,也可以避免交叉项。

为了选择最强的双谱集合作特征参数集合,首先需要有一个类可识别测度 $m(\omega)$ 来判断一个双谱值在信号类型识别中作用的大小。Fisher 类可分离度就是这样一个有名的测度。

考虑使用双谱作为第 1 类(正常噪声)和第 2 类(异常噪声)信号的类型间可分离度。为方便叙述,记

$\omega = (\omega_1, \omega_2)$ 和 $B(\omega) = B(\omega_1, \omega_2)$ 。假定 $\{B_k^{(1)}(\omega)\}_{k=1,2,\dots,N_1}$ 和 $\{B_k^{(2)}(\omega)\}_{k=1,2,\dots,N_2}$ 是在训练阶段得到的样本双谱集合,其中,下标 k 表示由第 k 组观测数据计算得到的双谱,上标 1 和 2 代表信号的类型,而 N_1 和 N_2 分别是第 1 类和第 2 类信号的观测数据组的个数。

第 1 类和第 2 类信号之间的 Fisher 可分离度定义为:

$$m^{(1,2)} = \frac{\sum_{l=1,2} p^{(l)} [\text{mean}_k(B_k^{(l)}(\omega)) - \text{mean}_l[\text{mean}_k(B_k^{(l)}(\omega))]]^2}{\sum_{l=1,2} p^{(l)} \text{var}_k(B_k^{(l)}(\omega))} \quad (6)$$

式中, $p^{(l)}$ 为随机变量 $B^{(l)} = B_k^{(l)}(\omega)$ 的先验概率, $\text{mean}_k(B_k^{(l)}(\omega))$ 和 $\text{var}_k(B_k^{(l)}(\omega))$ 分别代表第 l 类信号在频率 $\omega = (\omega_1, \omega_2)$ 处的有样本双谱的平均值和方差,而 $\text{mean}_l[\text{mean}_k(B_k^{(l)}(\omega))]$ 表示所有类型的信号在频率的样本双谱的总体中心。

$m^{(1,2)}(\omega)$ 越大,则第 1 类和第 2 类信号之间的可分离度越强,因此,选择具有 q 个最强 Fisher 类可分离度的频率集合 $\{\omega(h), h = 1, 2, \dots, q\}$ 作为特征频率,与它们相对应的双谱则称为选择双谱。

给定第 l 类信号第 k 个观测数据为 $x_k^{(l)}(1), \dots, x_k^{(l)}(N)$, 其中 $l = 1, 2$ 和 $k = 1, 2, \dots, N_1, N$ 为采样点数。下面是离线的训练算法。

1) 参数化双谱估计双谱

$$B_k^l(\omega_1, \omega_2) = X_k^l(\omega_1)X_k^l(\omega_2)X_k^l(-\omega_1 - \omega_2)$$

2) 使用式(6)计算 Fisher 类可分离度 $m^{(1,2)}(\omega)$, 将 q 个最大的测度排序成

$$m^{(1,2)}(v_1) \geq m^{(1,2)}(v_2) \geq \dots \geq m^{(1,2)}(v_q)$$

v_1, v_2, \dots, v_q 为特征频率。从而取得特征库 $\{B_k^{(1)}(\omega)\}_{k=1,2,\dots,N_1}$ 和 $\{B_k^{(2)}(\omega)\}_{k=1,2,\dots,N_2}$, 其中 $\omega = v_1, v_2, \dots, v_q$

4 通过距离判别法来实现对车辆减振器异常噪声诊断

采用选择双谱来提取故障特征,建立特征库 $\{B_k^{(1)}(\omega)\}_{k=1,2,\dots,N_1}$ 和 $\{B_k^{(2)}(\omega)\}_{k=1,2,\dots,N_2}$ (其中 $\omega = v_1, v_2, \dots, v_q$) 后,当取得某一减振器信号时,计算其选择双谱 $B(\omega)$, 其中 $\omega = v_1, v_2, \dots, v_q$ 。再通过距离判别法确定减振器噪声正常还是异常,从而实现了对减振器噪声的异响诊断。

设 G_1, G_2 为正常噪声与异常噪声减振器振动信号的 q 元已知总体 $\{B_k^{(1)}(\omega)\}_{k=1,2,\dots,N_1}$ 和 $\{B_k^{(2)}(\omega)\}_{k=1,2,\dots,N_2}$ (其中 $\omega = v_1, v_2, \dots, v_q$), G_i 的样本数是 $N_i, i = 1, 2$; G_i 的均值向量是 $\mu_i, i = 1, 2$; G_i 的协方差矩阵是 $\Sigma_i, i = 1, 2$ 。设 $x = (x_1, x_2, \dots, x_q)^T$ 是

一个待判减振器,其中 $\omega = v_1, v_2, \dots, v_q$, 距离判别准则为^[6]:

$$x \in G_1, \text{若 } d(x, G_1) \leq d(x, G_2)$$

$$x \in G_2, \text{若 } d(x, G_1) > d(x, G_2)$$

其中, $d(x, G_i) = (x - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - \mu_i)$, $i = 1, 2$ 。即当 x 到 G_1 的马氏距离不超过到 G_2 的马氏距离时, 判 x 来自 G_1 , 即为 x 正常噪声减振器; 反之, 判 x 来自 G_2 , 即为 x 异常噪声减振器。

为了研究正常噪声与异常噪声车辆减振器振动信号的双谱, 对某厂车辆后减振器在液压激振试验台采用进行了台架试验, 图1是某车辆减振器振动信号的选择双谱图, 1、2号为第1类(正常噪声)减振器, 记为 G_1 ; 3、4号为第2类(异常噪声)减振器, 记为 G_2 ; 5号为待判减振器, 记为 x 。由距离判别准则可知, 5号产品为正常噪声减振器, 这与出厂验收标准下的测量结果相一致。

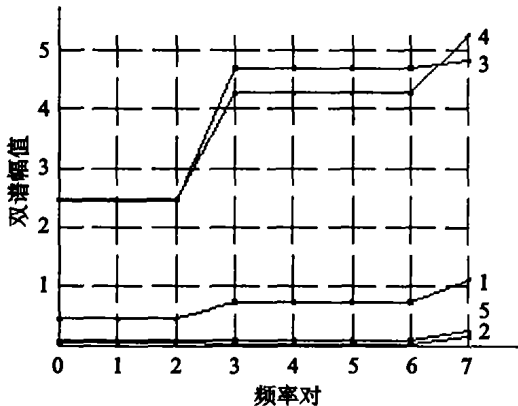


图1 车辆减振器振动信号的选择双谱图

5 结 语

由于减振器系统的高度复杂性, 笔者未深入讨论正常或异常噪声减振器连杆振动信号双谱的外在规律同与之相对应的噪声之间的联系, 关于产生异常噪声机理的原因有待于进一步研究。另外, 诊断实验结果与该厂产品的出厂验收标准下的测量结果相一致, 说明诊断实验结果是真实可信的。利用双谱分析来诊断减振器异常噪声故障及其非线性特点的初步尝试, 从模式识别的角度讲是简单、有效的。

参考文献:

- [1] 俞大卫, 罗金良. 汽车筒式减振器异响成因分析[J]. 兵工学报之坦克装甲车与发动机分册, 2000, (1): 19-25.
- [2] 张立军, 余卓平, 靳晓雄, 等. 减振器异常噪声的实验研究与分析[J]. 振动与冲击, 2002, (1): 33-38.
- [3] 陈进. 机械设备故障诊断与现代信号处理技术[J]. 振动工程学报, 1998, 11(9): 6-10.
- [4] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [5] ZHANG X D, SONG Y, BAO Z. A New Featurevector Using Selected Bispectra for Signal Classification with Application in Radar Target Recognition[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2001, 49(9): 1 875-1 885.
- [6] 胡永宏, 贺思辉. 综合评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

Diagnosis for the Abnormal Sound of the Vehicle Shock Absorber Based on Bispectra Analysis

SHU Hong-yu, XIONG Mu-quan

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Vehicle shock absorber vibration is classified and analyzed. It shows various Gaussianity and symmetry under normal or abnormal sound. The theory of bispectra analysis is reviewed and vibration signal selected bispectra for vehicle shock absorber are plotted. A new method of fault feature extracting for shock absorber vibration based on the selected bispectra. Thus achieving the diagnosis for the abnormal sound of the vehicle shock absorber by the means of the discriminance of mahalanobis distance. The faults diagnosed accord well with the actual situation, shows that method presented is of practicality and reliability. It is useful for understanding the mechanism of shock absorber abnormal sound and for its control.

Key words: vehicle shock absorber; abnormal sound; fault diagnosis; bispectra analysis