文章编号：1006-1355(2014)01-0164-05

用 $1\frac{1}{2}$ 维谱结合小波包能量提取地震动信号特征

张亚东，华春蓉，董大伟，闫 兵，鲁志文，谢 逍
（西南交通大学 机械工程学院，成都 610031）

摘 要： 针对车辆（轮式车、履带式车）引起的地震动信号中，具有非平稳、非高斯性特征相互重叠的实际情况，研究了地面活动目标产生的地震动信号特性；从理论上说明了 $1\frac{1}{2}$ 维谱可消除车辆引起的地震动信号中的高斯白噪声或有色噪声，在将 $1\frac{1}{2}$ 维谱分析和小波包能量谱相结合的基础上，提出一种特征提取方法，以便区分不同的车辆目标。在时频域构建以 $1\frac{1}{2}$ 维谱和小波包能量谱作为地震动信号的联合特征向量，建立以训练误差为目标的BP神经网络模式分类器；然后对两类车辆信号进行识别。地震动信号的车辆实测数据表明，该方法能够准确和有效地识别车辆引起的地震动信号。

关键词： 振动与波；地震动信号；$1\frac{1}{2}$ 维谱；小波包能量谱；特征提取；模式识别

中图分类号： TB52；TN911.6　　**文献标识码：** A　　**DOI编码：** 10.3969/j.issn.1006-1335.2014.01.037

Feature Extraction Method of Seismic Signals Based on $1\frac{1}{2}$ Dimensional Spectrum and Wavelet Packet Energy

ZHANG Ya-dong, HUA Chun-rong, DONG Da-wei, YAN Bing, LU Zhi-wen, XIE Xiao
(College of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract : Aiming at the problem of the overlap of non-stationary and non-Gaussian characteristics in seismic signals generated by vehicles (wheeled vehicles and tracked vehicles), the features of seismic signals generated by ground moving targets are studied. It is elaborated theoretically that the $1\frac{1}{2}$ dimensional spectrum can eliminate Gaussian white noise or colored noise in vehicle induced seismic signals. A feature extraction method combining the $1\frac{1}{2}$ dimensional spectrum analysis with wavelet packet energy spectrum is proposed to distinguish different vehicle targets. At first, the joint eigenvectors of $1\frac{1}{2}$ dimensional spectrum and wavelet packet energy spectrum are constructed in time-frequency domains as the seismic signals. Then, the BP neural network pattern classifier with error training as a target is established to identify the two types of vehicle signals. The results of field experiments show that this method can identify the seismic signals effectively and accurately.

Key words : vibration and wave ; seismic signal ; $1\frac{1}{2}$ dimensional spectrum ; wavelet packet energy spectrum ; feature extraction ; pattern recognition

地面目标的震动特性是目标识别的重要特性指标。地面目标激励下产生的地震动信号，主要是纵波、横波和瑞雷波等组成。研究表明，当震源位于地表时，瑞雷波由于能量最强，在自由表面传播快且传播距离较远等特性，更适合于远距离地面运动目标的探测与识别[1]。所以本文应用瑞雷波进行地震动目标探测与识别。

收稿日期： 2012-05-03

作者简介： 张亚东（1987-），男，甘肃省会宁县人，在读硕士生，目前从事车辆噪声与振动控制研究。
通讯作者： 华春蓉(1975-)，女，副教授，博士，主要从事噪声与振动控制、内燃机故障诊断与专家系统等方面的研究。
E-mail: Aliyzyd@163.com

车辆产生的地震动信号特征主要取决于目标的运动状态、目标距传感器的距离和地质条件等[2]。对于车辆目标的特征提取与识别，文献[2—3]在水泥路面进行试验，运用傅里叶分析提取目标引起的地震动信号的主要频率及对应的幅值相对大小作为特征参数。但频域提取的特征参数易受信噪比的影响，不能有效识别车辆引起的地震动信号。文献[4]应用车辆引起的声音信号和地震动信号的功率谱估计法联合提取目标运动特征，不能有效提取由于非高斯信号引起的地震动信号的频率成分，识别精度不高。文献[5—6]在时频域应用短时傅里叶变换对地震动信号进行特征提取，但此方法只适合分析所有特征尺度大致相同的信号，窗口没有自适应性，对于非平稳的地震动信号，识别精度只有65 %左右。文献 [6]应用小波包变换对地震动信号进行多层分解，构建以各频段能量序列为表征各车辆信号的特征向量，其缺陷是对非高斯信号特征提取及识别不高，在分析这些信号时，它们不能从信号中提取由于非高斯带来的信息。

高阶统计量(Higher-Order Statistics)中的3阶累积量对角切片的Fourier变换—$1\frac{1}{2}$维谱[7]，是3阶谱中的一种特殊情况，它即保留了高阶谱可抑制加性高斯噪声的优良特性，又简化计算量，便于实际应用。加之$1\frac{1}{2}$维谱对低频分量的加强作用，对提取信号中较弱的低频分量将特别有效。因此，可以利用谱图中被加强的低频成分，获得目标地震动信号的有效信息，提取信号中非高斯成分，达到目标识别的目的。而小波分析可以把信号分解到任意精细的频带上，适合于分析地震动信号中的非平稳成分。

对于轮式车、履带式车运动引起的地震动信号的特性，瑞雷波在传播过程中易受环境干扰，车辆产生的地震动信号即有环境干扰引起的高斯噪声又有地震动信号引起的非高斯噪声成分[8]。这就意味着所提取的特征不可避免地受地表复杂的噪声干扰，必然会影响目标的识别和分类的效果。鉴于以上车辆引起的地震动信号的复杂性与单一特征提取的局限性，本文提出了一种基于$1\frac{1}{2}$维谱—小波包的联合特征参数提取方法。通过把高阶统计量与小波分析结合起来，能够多方面提取信号的特征参数向量。建立以训练误差为目标的BP神经网络模式分类器对两类车辆信号进行识别。

1　基于$1\frac{1}{2}$维谱分析的车辆信号特征参数提取

高阶谱是一种处理非线性非高斯信号的有力工具，高阶累积量的多维傅里叶变换定义为高阶谱(或称多谱)。在功率谱的频率范围内，高阶谱可以抑制高斯噪声，分辨率高，并能得到信号低频分量、相位和非线性等有用信息[9]。高阶谱中的3阶谱（也称双谱）阶数最低，又包含了高阶谱的所有特征，所以本文采用基于双谱对角切片的$1\frac{1}{2}$维谱进行车辆信号特征提取。

1.1　$1\frac{1}{2}$维谱定义

设有随机变量$x(t)$ ($x(t)\in R$)，其三阶累积量$C_{3x}(\tau_1,\tau_2)$的对角切片$C_{3x}(\tau,\tau)(\tau_1=\tau_2=\tau)$的Fourier变换定义为$1\frac{1}{2}$维谱$C(\omega)$：

$$C(\omega)=\int_{\infty}^{\infty}[\int_{\infty}^{\infty}x(t)x^2(t+\tau)\mathrm{d}t]e^{\mathrm{j}\omega\tau}\mathrm{d}\tau \qquad (1)$$

其具体计算公式如下

$$C(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}x(t)e^{-\mathrm{j}(-\omega)t}\mathrm{d}t\int_{-\infty}^{\infty}[x^2(t+\tau)\mathrm{d}t]e^{-\mathrm{j}\omega(-\tau)}\mathrm{d}(t+\tau)= X^*(\omega)[X(\omega)\times X(\omega)] \qquad (2)$$

$X(\omega)$为$x(t)$的Fourier变换，$X^*(\omega)$为$X(\omega)$的复共轭。

1.2　$1\frac{1}{2}$维谱的算法

设原始信号为$\{x_1,x_2,\cdots,x_{N=KM}\}$共$K$段，每段的长度是$M$，计算$1\frac{1}{2}$维谱的算法步骤为：

（1）对每段数据均值化；

（2）分别计算每段数据的3阶累积量

$$c^{(i)}(\tau)=\frac{1}{M}\sum_{s_1}^{s_2}x^{(i)}(n)x^{(i)}(n+\tau)x^{(i)}(n+\tau) \qquad (3)$$

式中

$$i=1,2,\ldots K,$$
$$s_1=\max(0,\tau),$$
$$s_2=\min(M-1-\tau,M-1).$$

（3）对“每段”数据的$c^{(i)}(\tau)$取平均，得

$$\hat{c}(\tau)=\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}c^{(i)}(\tau) \qquad (4)$$

（4）对$\hat{c}(\tau)$做一维Fourier变换，即可得到信号的$1\frac{1}{2}$维谱。

1.3　仿真信号的$1\frac{1}{2}$维谱分析

通过仿真计算可得到$1\frac{1}{2}$维谱的一些特性，进而可应用于车辆引起的地震动信号特征提取中。原始信号为

$$s=\sin(100\pi t)+\sin(200\pi t) \tag{5}$$

加入高斯白噪声，噪声信号用 $n(t)=10\times \mathrm{randn}$ 获得，其中randn产生正态分布的随机数。图1中给出的是信号频率分别为50 Hz，100 Hz的正弦信号和高斯白噪声的叠加，由于噪声过大，信噪比低，信号完全淹没在噪声中，信号原始成分在时域图中无法分辨。

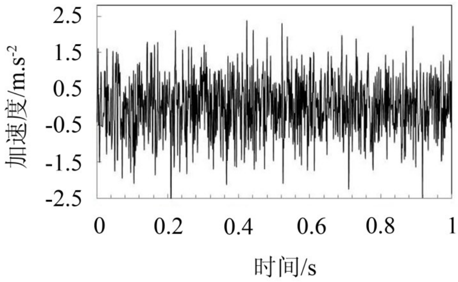

图1 仿真信号时域波形

图2为它的傅里叶变换频谱分析图，图3为它的 $1\frac{1}{2}$ 维谱分析图。采用傅里叶分析，可见信号的基频49.95 Hz对应正弦信号为50 Hz，被高斯白噪声淹没。而采用 $1\frac{1}{2}$ 维谱分析后，信噪比得到了很大的改善，信号的基频49.95 Hz得到加强。用传统方法提取信号中的有用信息时，特征不明显，而 $1\frac{1}{2}$ 维谱分析不仅提高信号分析中的信噪比且信号的基频成分得到加强，能有效提取信号中的低频分量。

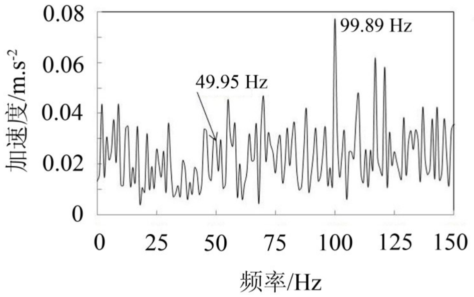

图2 仿真信号频谱分析

2 基于小波包能量的特征提取

对车辆激励下引起的地震动信号采用传统傅里叶分析方法可知，车辆引起的地震动信号频率集中在150 Hz以内的低频范围。根据功率谱无法准确区分不同类型的车辆，又小波包能量谱在不同频率频段分布不同，可采用小波包能量谱的方法对地震动信号进行特征提取。对车辆引起的地震动信号以采样率2 000 Hz（满足后续目标定位精度要求的最低采样率，本文不涉及目标定位算法）采集信号，基于小波包能量谱的特征提取的基本思路为：

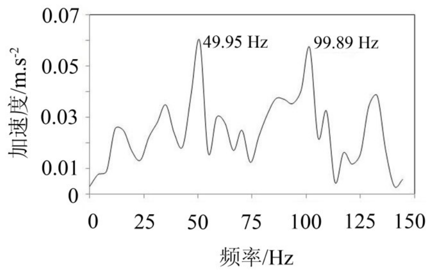

图3 仿真信号 $1\frac{1}{2}$ 维谱分析

（1）运用“抽点法”进行降采样处理，若采样率为2 000 Hz，可每4个点抽取1个点，得到以采样频率为500 Hz的信号。降采样的目的：减少小波分析运算量，满足硬件实时处理要求；

（2）进行1级小波分解，得到降采样后的二级近似信号和细节信号；

（3）将第二级分解的近似信号再进行4级小波包分解，得到每个频段8 Hz的信号能量。4级小波包分解的原因为：根据车辆信号频谱分析特性，轮式车、履带式车的主要频谱差异不大，小波包分解对应的每个频段应尽量小，即分解层数越大越好；又根据硬件实时处理的需要，小波包分解层数应尽量少。根据以上分析，又通过大量后续试验，得到每个频段8 Hz最能反映车辆信号引起的地震动信号特性；

（4）进行能量归一化处理；

（5）将上述归一化小波包能量作为地震动信号特征向量，将其作为后续分类器输入。

3 实验及结果分析

为了验证本文提出的特征提取方法，需要有效采集目标产生的地震动信号。为此设计了数据采集系统，图4为试验系统结构框图。

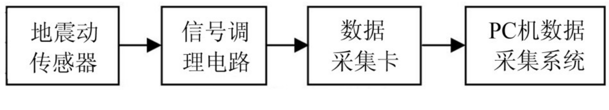

图4 采集系统结构框图

由于地震动传感器对地面目标激励下引起的地震动信号具有灵敏度高，抗高过载强等优点，本系统选用此传感器进行外场测试。通过地震动传感器把车辆引起的地震波转化为电压信号，在通过信号调理电路器完成信号的放大滤波、A/D转换等处理，数据采集卡采用成都佳仪公司的USB 2080采集卡完成多路信号采集，PC机数据采集系统运用本项目组开发的采集系统软件，完成信号采集、部分信号处理和实时保存等功能。

外场试验测试工况：微风，气温28 °C左右，在自然土质路面进行试验，周围无明显干扰源。由于考

虑到后续定位要求，采样频率2 000 Hz。传感器布点如图5所示，布点说明：图中正三角形的布置以及圆圈部分是为了后续联合特征定位需要，本文不涉及定位部分。本文中运用4个传感器联合进行目标识别，也是一种提高识别精度的方法。其中，a=20 m，c=80 m，d=20 m。

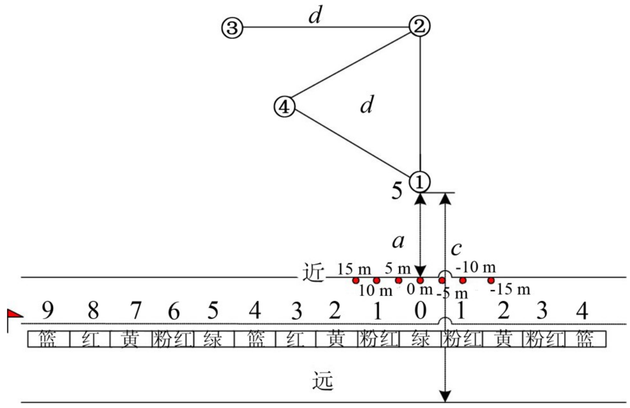

图5 车辆识别与定位布点示意图

针对车辆引起的地震动信号，运用本文提出的基于$1\frac{1}{2}$维谱和小波包能量谱方法进行特征提取。测试结果表明：距离1号传感器30 m以内（近距离）和距离2号传感器30 m～100 m之间（远距离），信号处理结果具有很好的一致性和普遍性。

图6为对轮式车和履带式车在近处产生的地震动信号的$1\frac{1}{2}$维谱分析，由图可知轮式车的$1\frac{1}{2}$维谱在20 Hz有比较宽的频带，峰值单一，相对应的频谱相对强度比较高，而履带式车近处信号在28 Hz有比较窄的频带，谱峰单一。

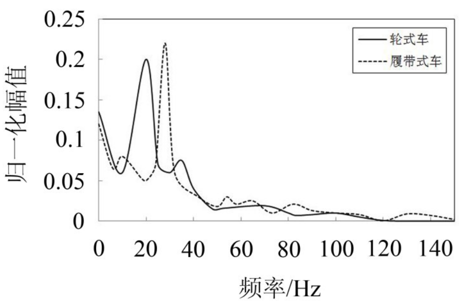

图6 近处信号$1\frac{1}{2}$维谱分析

图7为对轮式车和履带式车在远处产生的地震动信号的$1\frac{1}{2}$维谱分析，由图可知轮式车和履带式车信号相对近处信号来说，低频分量增强，高斯白噪声得到有效抑制，能够提取出地震动信号中的非高斯成分，能提高后续目标识别的精度。轮式车的$1\frac{1}{2}$维谱主要集中在8 Hz，18 Hz附近，基频分量8 Hz比较

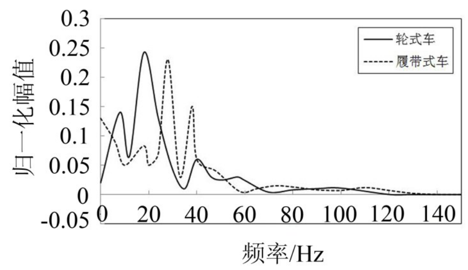

图7 远处信号$1\frac{1}{2}$维谱分析

明显。而履带式车的$1\frac{1}{2}$维谱，主要频率集中在28 Hz，38 Hz附近，40 Hz以下有很宽的频带，谱峰多，相对应的频谱相对强度比较均匀。可见此方法能有效提取车辆引起的地震动信号的特征参数。

图8为对轮式车和履带式车在近处产生的地震动信号的小波包能量谱分析，由图可知轮式车近处信号在3—4、6—7频段能量明显比其他频段能量强，而履带式车近处信号在第3频段、第7—8频段能量最强。

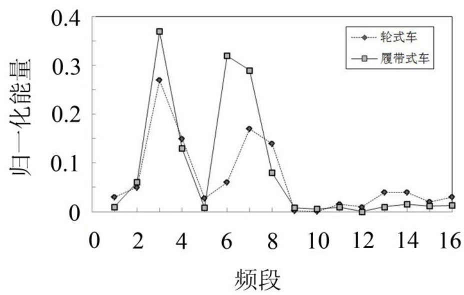

图8 近处信号小波包能量特征分布

图9为对轮式车和履带式车在远处产生的地震动信号的小波包能量谱分析，由图可知轮式车和履带式车信号的低频段小波包能量都明显增强，轮式车信号在第2、4和第7频段能量强，而履带式车信号在第2频段和第4频段能量相当，其他频段能量很弱。可见基于小波分解—小波包能量算法的特征提取能很好的区别轮式车和履带式车。

将$1\frac{1}{2}$维谱主要频率（小于150 Hz）对应的幅值和小波包归一化能量信息分布联合特征提取参数输入以训练误差为目标的BP神经网络模式分类器中，对两类车辆信号进行识别，拓扑结构为29×40×1，识别结果见表1。

从表1可以看出，$1\frac{1}{2}$维谱和小波包能量谱的联合特征训练网络能更好的识别轮式车和履带式车，正确识别率达到81.25 %以上。再将小波包归一化能量信息分布特征提取参数输入同类分类器中对两类车辆信号进行识别，拓扑结构为16×20×1，采用30

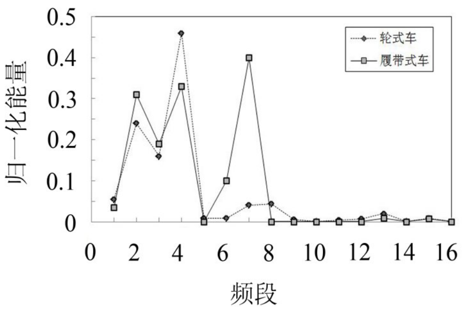

图9 远处信号小波包能量特征分布

表1 基于$1\frac{1}{2}$维谱与小波包分解能量特征的联合识别结果

	轮式车	履带车
目标样本	48	56
识别正确样本数	39	48
识别错误样本数	9	8
正确识别率	81.25 %	85.71 %

组数据进行训练，训练后对其余26组进行识别。单独采用小波包能量谱识别，最高识别率为76.92 %。证明本文的方法较单一特征提取方法的识别效果更好。

4 结 语

针对车辆(轮式车、履带式车)引起的地震动信号的非平稳性及非高斯性特征相互重叠的实际情况，本文提出的基于$1\frac{1}{2}$维谱和小波变换—小波包能量谱方法可有效抑制车辆引起的地震动信号的非平稳性及非高斯性特征重叠情况。联合提取出的特征参数作为地震动信号的特征向量，输入以训练误差为目标的BP神经网络中，识别率达到81.25 %以上。可见此方法能够准确地进行目标特征提取并对地震动信号进行有效地识别。本文的研究为轮式车、履带式车间的特征提取及识别提供了新途径，对推动远距离车辆间的目标检测及识别方法的发展有着重要意义。

参考文献：

[1] 姚 姚. 地震波场与地震勘探[M]. 北京：地质出版社，2006.

[2] 蓝金辉，李 虹，周兆英. 目标地震动信号的特征提取及识别研究[J]. 地震动与冲击，2001，20 (4)：42-44.

[3] 石云波，刘 俊，王 玲. 地面运动目标的震动信号的特性分析[J]. 传感技术学报，2007，20 (4)：874-876.

[4] 张中民，李贵涛，李科杰. 战场目标声/震侦察与识别[J]. 火力指挥于控制，2001，26 (2)：48-51.

[5] Peter Maxwell，Jon Tessman，Bruce Reichert. Design through to production of a MEMS digital accelerometer for seismic acquisition[J]. **Special Topic Land Seismic Surveys and Technology,** 2001，19 (3): 141-143.

[6] 聂伟荣. 多传感器探测与控制网络技术—地面运动目标震动信号探测与识别[D]. 南京：南京理工大学，2002.

[7] 樊养余，陶宝祺，熊 克，等. 舰船噪声的$1\frac{1}{2}$维谱特征提取 [J]. 声学学报，2002，27 (1)：70-76.

[8] Hyung O Park, Alireza A Dibazar, Theodore W Berger. Protecting military perimeters from approaching human and vehicle using biologically realistic dynamic synapse neural network[J]. **International Journal of Control,** 2008, 18 (9): 73-78.

[9] 孙洁娣，靳世久. 基于小波包能量及高阶谱的特征提取方法[J]. 天津大学学报，2010，43 (6)：562-566.

(上接第127页)

4 结 语

(1) 通过模态分析，找出油底壳上存在的薄弱区域，改进时从这些区域着手；

(2) 通过加筋和对底面与侧面的结构改进，油底壳在模态频率上，有了很大的提高，第二阶振型也发生了变化，大平面的面积减小，起到了降低辐射噪声的作用；

(3) 根据声学计算结果可以看出，改进后油底壳总声功率级由原来的108.596 dB(A)降到106.766 dB(A)，降低1.83 dB(A)，表明有一定效果。

参考文献：

[1] 钱人一. 汽车发动机噪声控制[M]. 上海：同济大学出版社，2008. 81-82.

[2] 陆晓军，梁 杰. 492Q发动机油底壳实验振动模态分析[J]. 中国公路报，2001，14(1)：115-118.

[3] 岳东鹏，郝志勇. 柴油机表面噪声源识别的实验研究[J]. 机械工程学报，2004，6：150-154.

[4] Ichi Uraki, Masahiko Kondo, Haruki Yashiro. Development of a technique for using oil viscosity to reduce noise radiated from oil pan[C]. SAE Paper 991759, 1999.

[5] Dimitrius C P. The development of a plastic valve cover system using finite element analysis[C]. SAE Paper 2004-01-3266.

[6] 李增刚，詹福良. Virtual.lab Acoustics声学仿真计算高级应用实例[M]. 北京：国防工业出版社，2010，121-129.

[7] 侯宏庆. 390型柴油机油底壳裂纹的研究与改进方案[J]. 内燃机，2004，6：47-50.

[8] 张海娟. 发动机油底壳振动与噪声辐射研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2006.