

# 基于倒谱预白化的轨道车辆轴箱轴承故障诊断

崔洪举<sup>1</sup>, 居法云<sup>2</sup>, 彭畅<sup>1</sup>, 徐冠基<sup>1</sup>

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100091)

**摘要:** 轴箱轴承作为轨道车辆的关键旋转部件之一, 起着承载、减磨、降阻的作用。基于振动信号的轴承监测方法, 将成为轨道车辆轴承状态在线监测的发展方向; 在信号预白化的理论基础上, 提出了基于倒谱编辑预白化的轴承故障诊断方法, 该方法使用倒谱定位和编辑原始信号的对数幅值, 去除不想要的离散频率分量, 然后结合原始相位信号和编辑后的幅值重构时域信号, 再对时域白化信号进行频谱分析; 试验结果表明, 倒谱预白化与传统包络谱解调分析都能有效检测轴箱轴承故障, 但倒谱预白化不需要进行滤波频带选择, 具有简单实用的优点, 验证了该方法在轴承严重故障和微弱故障诊断方面的有效性。

**关键词:** 轨道车辆; 轴箱轴承; 倒谱预白化; 故障诊断

## Fault Diagnostics of Axle-box Bearing in Railway Vehicles Based on Cepstrum Editing Procedure

Cui Hongju<sup>1</sup>, Ju Faiyun<sup>2</sup>, Peng Chang<sup>1</sup>, Xu Guangji<sup>1</sup>

(1. CRRC Qingdao Sifang Co. LTD., Qingdao 266111, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co. LTD., Beijing 100041, China)

**Abstract:** Axle-box bearing is one of the key rotating parts in rail vehicles, which sustains load as well as reduce friction. Currently, the on-board method is based on temperature monitoring or vibration monitoring. Besides, the wayside method is based on acoustic monitoring. The vibration based method will be the main technique for condition monitoring of axle-box bearing, due to the abundant algorithm study and engineering application. This work integrates the cepstrum editing procedure and the envelope analysis to diagnose the axle-box bearing fault qualitatively. The effectiveness of the improved method to identify both the weak fault and the serious fault is tested on the rolling test rig.

**Keywords:** rail vehicles; axle-box bearing; cepstrum editing procedure; faule diagnostics

### 0 引言

轴承作为轨道车辆的关键旋转部件之一, 起着承载、减磨、降阻的作用。目前轨道车辆轴承的监测方式按照物理量划分, 主要有基于温度、声音、振动冲击信号三种方式。按照安装方式主要有基于温度、振动的车载监测方式, 以及基于声音的轨旁安装方式。其中基于振动信号的车载监测方式由于其对轴承故障识别更敏感, 将成为未来轨道车辆轴承状态监测的发展方向。

轴承振动信号分析方法的研究与应用在机械故障诊断领域中受到广泛关注。近年来, 轴承振动信号降噪、特征提取、故障诊断、故障预测等方面的理论与算法得到了迅速发展及优化。而由于列车要求的高安全性, 轴箱轴承定期检修, 我们更加关注轴承早期微弱故障诊断。在轴承早期微弱故障检测方面, Randall 和 Antoni<sup>[1-2]</sup>等提出了一种基于快速傅里叶变换的谱峭度图算法, 并成功应用与轴承非平稳信号分析。刘霄<sup>[3]</sup>等提出了一种基于卷积滤波的城轨车辆轴承故障特征分析方法, 实现了轴承振动信号频段

的有效划分且避免了信号截断误差, 通过重构信号的频谱分析定性识别出了外圈及滚子烧蚀故障。孙晓涛<sup>[4]</sup>等基于小波分析和神经网络方法提出了一种轨道车辆轴承诊断流程, 通过小波包分析建立滤波器参数, 通过 RBF 神经网络进行正常、内圈、外圈、滚子故障四种特征的准确分类。何广坚<sup>[5]</sup>等基于经验模式分解和支持向量机提出了一种列车滚动轴承诊断分类方法, 经验模式分解对小波消噪后的信号进行滤波分解, 支持向量机对 IMF 分量特征指标进行分类从而识别轴承不同零件故障。唐贵基<sup>[6]</sup>等基于自适应多尺度 STH 变换对轴承特征进行增强, 利用各尺度变换后信号特征幅值能量比作为筛选标准从而确定最优的变换参数, 最终实现滚动轴承的定性诊断。樊薇<sup>[7]</sup>等首先构造了轴承故障振动信号的 Laplace 小波变换函数, 同时利用小波基的稀疏表示来识别滚动轴承故障时的瞬态冲击特征, 有效区分了外圈、内圈、滚子的微弱故障。关贞珍<sup>[8]</sup>等基于滤波后轴承振动图像特点, 利用双谱图像纹理特征定义区分了不同部件不同严重程度的轴承故障, 对比了图像特征指标的敏感情况, 最后提出了一种轴承定性定量诊断的有效分析思路。柯燕亮<sup>[9]</sup>等提出了一种基于峰峰值波形构造与 Teager 能量算子的轴承故障峰峰值特征表征方法, 首先对原始信号分段构造峰峰值波形特征, 然后对比不同段信号

收稿日期: 2018-05-22; 修回日期: 2018-07-31。

**作者简介:** 崔洪举(1962-)男, 高级工程师, 主要从事高速列车试验技术研究、转向架技术方向的研究。

进行能量算子解调分析并判断轴承状态。程卫东<sup>[10]</sup>等一种基于故障特征系数模板的方法克服了转速变化对轴承特征频率的影响, 首先对信号进行快速谱峭度滤波和时频分析, 然后对比瞬时特征频率与瞬时转频并计算瞬时特征参数, 从而实现变转速下的轴承定性诊断。

通过对轴承故障诊断研究方法的对比分析, 为了克服轨道车辆轴承诊断过程中的噪声及工况变化对诊断效果的影响, 本文提出了一种基于倒谱编辑预白化的轴承故障诊断方法, 首先阐述分析了信号预白化原理及倒谱编辑的定义, 然后给出了详细的轴承故障信号分析流程, 并与传统包络解调分析方法进行了对比。通过整车滚动试验, 采集轨道车辆轴箱轴承正常及故障振动信号, 然后将基于倒谱预白化的诊断结果与传统包络谱解调分析结果进行对比, 证明了倒谱预白化方法在轴箱轴承故障检测中的有效性。

## 1 理论方法

### 1.1 信号预白化

由传感器实际采集的轴承振动信号不仅仅包含轴承振动信息, 其往往是多个振动部件振动信号的“叠加”。由于轴承损伤引起的冲击的能量远小于齿轮或者其他部件的振动能量, 即使齿轮或其他部件运行正常, 这些部件振动产生的信号相对轴承损伤引起的冲击信号也会很强, 从而导致轴承损伤冲击信号淹没在噪声中, 使得微弱轴承损伤特征的提取十分困难。轴承损伤信号所在的频带被其他部件振动信号的强离散频率分量占据了, 因此去除这些强干扰频率分量是分析轴承信号前的必要步骤。信号预白化是很好的信号分量方法, 其能在消除噪声离散频率分量干扰的同时, 保留轴承损伤冲击信号并且残余随机噪声为白噪声。

由于轴承损伤冲击信号的频谱较为平坦, 预白化剔除干扰频率的处理过程对随机性轴承损伤冲击信号影响较小。设实际采集获得的振动信号离散时间序列为  $x(n)$ , 滤波后的时间序列用  $y(n)$  表示, 其频谱分别用  $X(f)$  和  $Y(f)$  表示。可用自回归 (Autoregressive, AR) 模型来预测线性滤波后的时间序列, 描述如下:

$$y(n) = - \sum_{k=1}^p a(k)x(n-k) \quad (1)$$

其中: 当前预测值  $y(n)$  由  $p$  个已知信号的加权和确定。则当前采集到的真实值由噪声项和预测值的和组成:

$$x(n) = y(n) + e(n) \quad (2)$$

结合式 (1) 和 (2), 可得:

$$x(n) + \sum_{k=1}^p a(k)x(n-k) = e(n) \quad (3)$$

经傅里叶变换以后:

$$X(f)A(f) = E(f) \quad (4)$$

可以将  $X(f)$  看作具有传递函数  $A^{-1}(f)$  系统的输出, 系统的输入为  $E(f)$ 。若系统输入函数  $E(f)$  是白的, 只包含平稳白噪声和冲击信号, 则可称其时域形式  $e(n)$  为预白化的。将实际信号  $x(n)$  转化为不相关的具有白谱的信号  $e(n)$  即为信号预白化处理过程。轴承实际振

动信号去除确定性分量留下的是一个预白化的残余信号, 包含有随机性的轴承损伤冲击信号和白噪声。

### 1.2 倒谱分析

倒谱 (Cepstrum) 定义为对数谱的逆傅里叶变换, 分为实倒谱和复倒谱。复对数谱的逆傅里叶变换称作复倒谱, 复倒谱是与时间信号可逆的, 如果将相位展开成频率的连续函数, 则可以在复倒谱域对信号进行处理。复倒谱数学定义如下:

$$C(\tau) = FFT^{-1}[\ln(X(f))] \quad (5)$$

其中:

$$X(fA) = FFT[x(t)] = A(f)\exp(j\varphi(f)) \quad (6)$$

写成幅值和相位的形式:

$$\ln(X(f)) = \ln(A(f)) + j\varphi(f) \quad (7)$$

在速度波动有限的前提下, 倒谱分析可以将频谱中所有周期性分量聚集到倒谱域中的少量分量, 这就为剔除特定频率分量提供了可能: 通过编辑除去倒谱域中所选的频率分量所在的点, 一次操作就可以去除选定的离散频率分量, 并且对未选择的频率分量影响较小。

### 1.3 基于倒谱预白化的轴承故障诊断方法

由于在复倒谱域中相位信息被离散化, 为了保留复倒谱中的相位信息, 可以先在实倒谱中除去离散频率分量所在的点, 再使用原始相位谱和倒谱编辑后的幅值谱进行信号重构。编辑实倒谱的目的是去除齿轮等其他部件振动信号频谱上的谐波和边带, 从而去除轴承振动信号频谱上的齿轮啮频谐波与边带, 保留冲击信号和白噪声。倒谱编辑去除信号中的离散频率分量的方法是实倒谱中齿轮啮频谐波与边带相应的倒谐波 (Rahmonics) 置零。如图 1 所示, 基于倒谱编辑的轴承故障诊断方法, 首先将采集的振动信号进行 FFT 变换到幅值谱和相位谱, 保留相位谱, 将幅值谱取对数得到对应的实倒谱。通过编辑将实倒谱中零倒频率处以外的倒谱分量全部置零, 再对置零后的实倒谱进行 FFT 得到编辑后的对数幅值谱, 再将原始相位谱与其组成残余对数谱。最后将幅值残余谱进行逆 FFT 变换到时域即是预白化后的轴承振动信号。然后对重构后的信号进行频谱分析, 得到倒谱编辑谱, 由倒谱编辑谱确定信号是否含有故障特征。

### 1.4 基于包络共振解调的轴承故障诊断方法

包络分析由于可以清楚地指示轴承故障类型以及严重程度, 是轴承故障诊断中应用广泛的方法之一。包络分析的核心思想是通过选取故障频率所在的共振频率区, 通过滤波、平移、变换, 获得包含轴承故障频率的低频包络信号, 最后对包络信号进行频谱分析即可诊断出故障。包络解调能把与轴承故障有关的信号从高频调制信号中调解出来, 能有效避免与其他低频成份的干扰, 诊断可靠性和灵敏度很高。

希尔伯特包络是一种有效的解调方法, 其定义是时域信号绝对值的包络。它通过从信号中提取调制信号, 分析调制函数的变化, 是一种很有效的提取故障特征的算法。

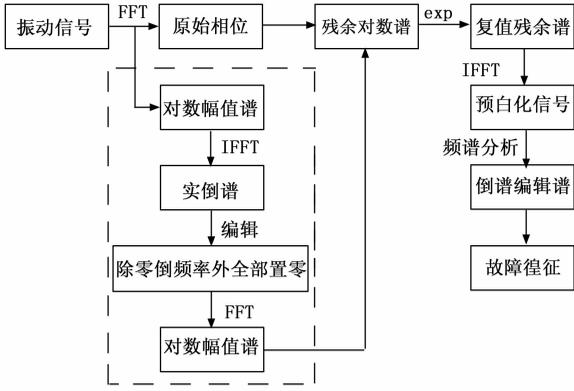


图 1 基于倒谱预白化的轴承故障诊断流程图

若一连续的时间信号  $x(t)$ ，其希尔伯特变换为：

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau = x(t) \frac{1}{\pi t} \quad (8)$$

$\hat{x}(t)$  可以看成是  $x(t)$  通过一滤波器后的输出，该滤波器的单位冲击响应：

$$h(t) = \frac{1}{\pi t} \quad (9)$$

则原信号的解析信号可以表示为：

$$z(t) = x(t) + \hat{x}(t) \quad (10)$$

信号的希尔伯特变换包络定义为：

$$A(t) = \sqrt{[x(t)]^2 + [\hat{x}(t)]^2} \quad (11)$$

如图 2 所示，采用包络共振解调技术提取轴承故障信号的基本原理分为以下 4 个环节，带通滤波：由于轴承故障信号在加速度传感器的共振频率处得到了大幅度加强，通过选取合适的中心频率和带宽将包含了轴承故障信息的频带筛选出来，从而避免了低频信号的干扰。包络检波：对经过带通滤波器后的振动信号进行希尔伯特包络检波，求得隐藏在共振信号中与轴承故障冲击频率相一致的脉冲串。低通滤波：为了去除较高频干扰噪声，将包络检波后得到的脉冲信号经过低通滤波器，从而保留频率较低的故障信号成分。谱分析：求取包络信号功率谱，从功率谱图中分析频率故障特征，与已知的轴承故障特征频率对比，从而判断出轴承故障的类型与严重程度。

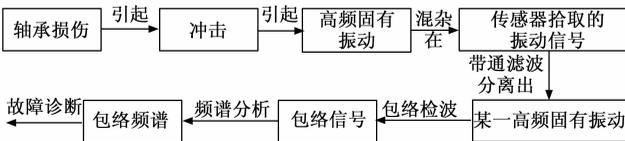


图 2 基于包络共振解调的轴承故障诊断流程图

## 2 试验数据采集与分析

### 2.1 试验装置简介

为了验证倒谱预白化和包络解调分析方法的有效性，利用真实车辆在整车滚动台上进行验证，如图 2 所示，列车有四个轮对共计八个轴箱轴承，列车整体放置于试验台架上，试验台能实现多轮对转速同步，确保了转速波动在

可控范围内。

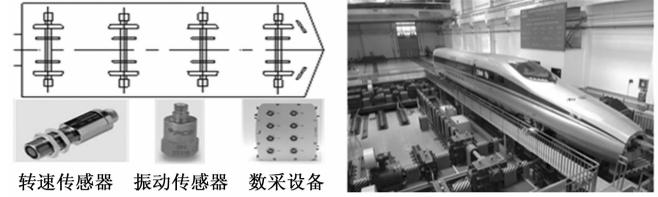


图 3 整车滚动试验台和试验用传感器及数采设备示意图

试验分别采集了正常轴承、轻微故障轴承、中度故障轴承和严重故障轴承在车速 100 km/h 速度等级下的加速度信号。其中转速信号采用光电脉冲传感器，加速度信号采用 PCB 加速度传感器，数据采集设备采用两个 IMC 8 通道数据采集仪。加速度信号采集参数为：转速 616.8 RPM，数据继续时间为 10 s，采样频率均为 20 kHz，数据单位为 g。由轴承参数和试验数据可得轴箱轴承在车速 100 km/h 时故障特征，如表 1 所示。

表 1 轴箱轴承在 100 km/h 工况下故障特征

故障类型	外圈故障	内圈故障	滚动体故障	保持架故障
故障特征	84.06Hz	111.26Hz	35.65Hz	4.42Hz

### 2.2 试验数据分析

如图 4 所示，从上到下分别为正常轴承、轻微故障轴承、中度故障轴承和严重故障轴承在车速 100 km/h 速度等级下的加速度信号及其频谱，由图中可以看到，随着故障程度的加深轴承振动幅值逐渐增大，轻微故障时振动幅值增加不明显，但是中度和严重故障情况下振动幅值增加明显，且冲击成份明显。正常轴承的频谱十分干净，频带能量主要集中在转频处；出现轻微故障时全频带都有频率成份，但幅值较低；当出现中度故障时，频带幅值急剧增加；

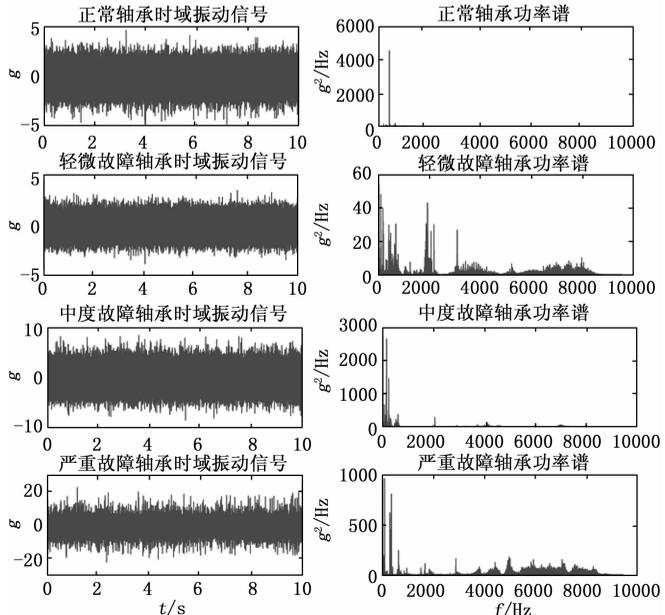


图 4 不同损伤状态轴承加速度振动信号时域图以及包功率谱

出现严重故障时, 高频段能量幅值十分明显。由图中的功率谱分析得知, 包络共振解调滤波频带选择 6000~8000 Hz 较为合适。

如图 5 所示, 列车正常轴承加速度振动信号的包络解调谱图和倒谱编辑谱图。从图中不能看到频率成份主要集中在低频段且幅值较低, 说明正常的轴承频谱冲击不明显, 运行平稳。

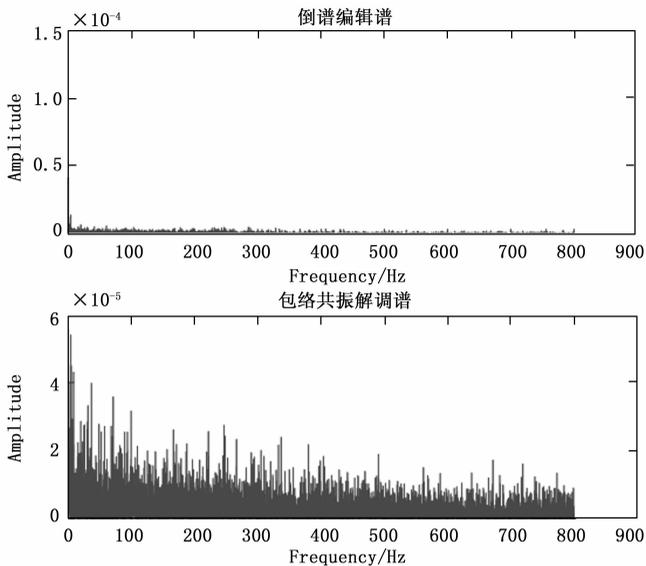


图 5 正常状态轴承振动倒谱编辑谱和包络共振解调谱

如图 6 所示, 为列车轻微故障轴承加速度振动信号的包络解调谱图和倒谱编辑谱图。包络解调谱图和倒谱编辑谱图中都能观测到轴承的外圈故障频率 83.39 Hz。从倒谱编辑谱图中还能观测到外圈故障的二倍频 166.9 Hz。说明倒谱编辑谱对轴箱轴承微弱故障检测有效。

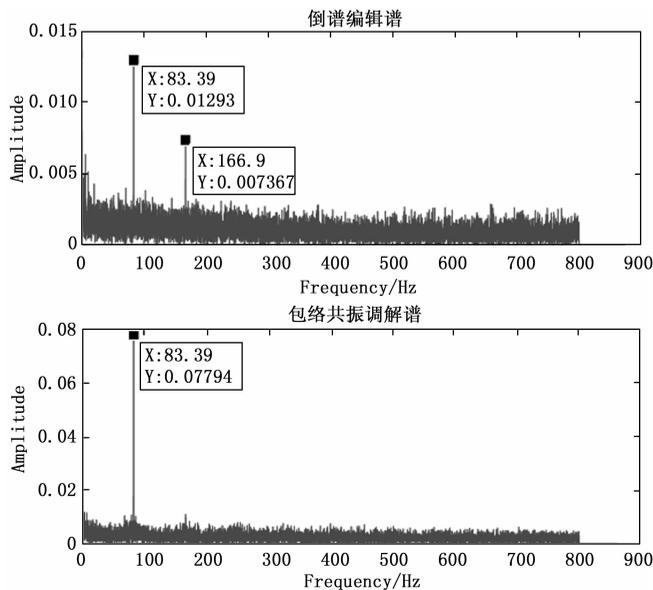


图 6 轻微状态轴承振动倒谱编辑谱和包络共振解调谱

包络解调谱图和倒谱编辑谱图。包络解调谱图和倒谱编辑谱图中都能观测到轴承的外圈故障频率 83.39 Hz。且都能观测到外圈故障的二倍频 166.9 Hz 及其高频。与轻微故障频谱相比, 故障频率的幅值增大。

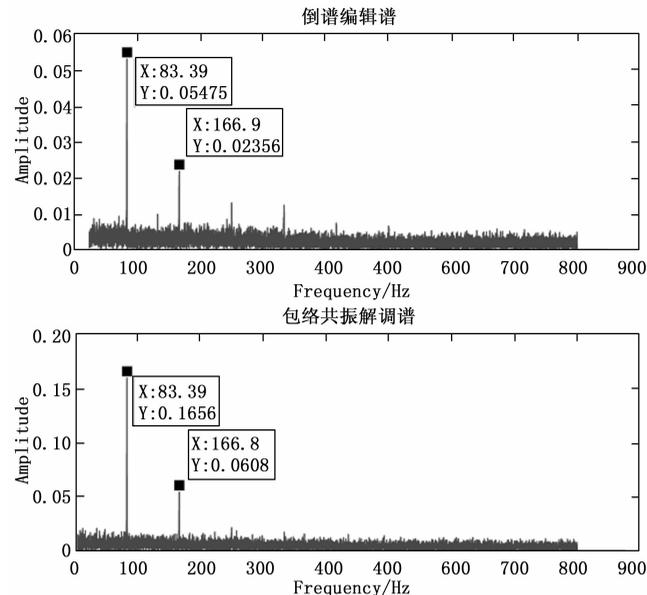


图 7 中度故障状态轴承振动倒谱编辑谱和包络共振解调谱

如图 8 所示, 为列车严重故障轴承加速度振动信号的包络解调谱图和倒谱编辑谱图。包络解调谱图和倒谱编辑谱图中都能观测到轴承的外圈故障频率 83.39 Hz。且都能观测到外圈故障的二倍频 166.9 Hz。与中度故障频谱相比, 故障频率的幅值增大。

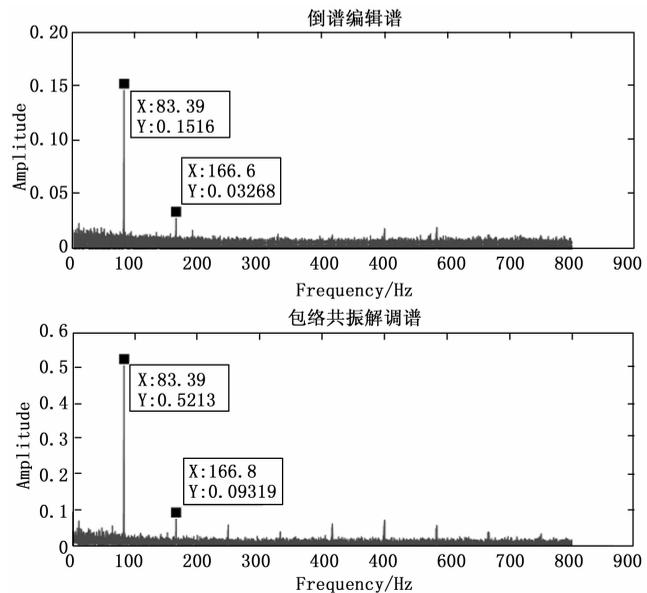


图 8 中度故障状态轴承振动倒谱编辑谱和包络共振解调谱

从对应的频谱图可知, 严重故障的轴承故障特征频率处的幅值远大于微弱故障的轴承故障特征频率处的幅值。所

(下转第 77 页)

如图 7 所示, 为列车中度故障轴承加速度振动信号的