

轨道交通扣件系统时频特性测试与分析*

赵才友, 王 平

(西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室 成都, 610031)

摘要 为了得到安装在不同扣件系统下钢轨的振动特性, 室内以 WJ-7 型扣件为样品, 采用力锤激振法对其进行动力测试。基于 MATLAB 软件信号分析处理平台, 利用线性短时傅里叶变换, 非线性 Page 变换和 Zhao-Atlas-Marks 变换对振动信号的时频特性进行对比分析。研究表明: 钢轨轨脚振动主要集中在中高频, 其中在 2 250 Hz 振动能量最大, 且持续时间最长; 短时傅里叶变换(Short-time Fourier transform, 简称 STFT)具有较高的时间和频率分辨率, 可以将轨脚的时域、频域和时频域的固有属性一一对应起来; 非线性 Page 时频分析在能量较高的高频段具有较好的分辨率, 而在低频段显得无能为力; 非线性 Zhao-Atlas-Marks 分布时频分析在低频段效果较好, 在高频段不是很理想。该分析结果可为轨道结构的振动噪声控制提供依据。

关键词 扣件系统; 时频分析; 振动特性; 动力测试

中图分类号 TH212; TH213.3

引 言

轨道结构通常包括有钢轨、扣件系统、轨道板、道床板、轨枕和道砟道床^[1], 其中: 钢轨材料为钢材; 扣件系统为钢材和橡胶材料; 轨道板、道床板和轨枕为钢筋混凝土; 道砟为散粒体碎石颗粒。这些组成轨道结构的材料力学性能相差很大。随着时间的推移, 钢轨的疲劳、橡胶的老化、钢筋混凝土的开裂、碎石道床的板结以及在各个部件的结合处存在随时间变化的非线性阻尼, 这些因素都将导致轨道结构在列车荷载作用下的响应表现出较强的非平稳特性^[2-3], 这也给轨道减振带来了很大的困难。时频分析技术是分析非平稳信号局部特征的有效方法, 它将一维的时域或频域信号映射成时频平面上的二维信号。对于非平稳信号, 良好的时频分析方法能够检测出非平稳信号频率随时间的不稳定变化, 获得信号能量在二维时频平面中的分布, 实现对信号局部特性的分析^[4-5]。

笔者用线性以及非线性时频分析技术来研究 CH60 钢轨在我国无砟轨道结构中通用的 WJ-7 型扣件下的时频特性, 找出列车经过时钢轨的主要振动频率, 为轨道结构减振降噪提供依据。

1 时频分析理论

1.1 线性时频分布

线性时频分布主要有短时傅里叶变化和小波变换两类^[6]。短时傅里叶变换的主要思想是: 傅里叶变换是频域分析的基本工具, 为了达到时域上的局部化, 在信号傅里叶变换前乘上一个时间有限的窗函数, 并假定非平稳信号在分析窗的短时间内是平稳的, 通过窗在时间轴上的移动从而使信号逐段进入被分析状态, 这样就可以得到信号的一组“局部”频谱, 根据不同时刻“局部”频谱的差异可以得到信号的时变特性。

短时傅里叶变换定义为

$$\text{STFT}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t)g^*(t-\tau)]e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

其中: * 代表复共轭; $g(t)$ 为短时窗; $x(t)$ 为测得的时域信号; τ 为时间位置参数, 即时移; f 为频率; t 为时间。

在二维时频联合分析中, 由于短时傅里叶变换的时间分辨率与所分析窗函数 $g(t)$ 的时间域宽度成正比, 而且频率分辨率与分析窗 $g(t)$ 的频宽成正

* 铁道部重点资助项目(2012G008-D); 铁道部重大科研资助项目(2011G009); 国家自然科学基金资助项目(51008256)
收稿日期: 2012-06-15; 修回日期: 2012-11-26

比,因此短时傅里叶变换的时频分辨率由窗函数 $g(t)$ 的时频域大小直接决定。一旦窗口函数选定,其时频分辨率就已确定,不随频率和时间的变化而变化。窗函数对 STFT 的影响很大,为了提高时间分辨率,窗函数的时间宽度尽可能短,但为了提高频率分辨率,窗函数的时间宽度尽可能长。如果用 Δt 和 Δf 分别表示 STFT 的时间分辨率和频率分辨率,则它们的乘积必须满足 Heisenberg 不确定性原理^[7-8],即

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq 1/(4\pi) \quad (2)$$

这就意味着时域精度和频域精度二者不可兼得,线性时频分析方法都存在这一问题。

1.2 非线性时频分布

从本质上说,短时傅里叶变换等线性时频表示不能描述信号的瞬时功率谱密度。二次型(非线性)时频表示则是一种直观和合理的信号表示方法,也称为时频分布。二次型方法基于双线性对描述信号进行瞬时功率谱计算,其中 Wigner-Ville 分布就是最常用的一种时频分布^[9-12]。

$$C_x(t, f; g) = \frac{1}{2\pi} \iint x(t' + \tau/2) x^*(t' - \tau/2) \times \psi(\theta, \tau) e^{-j(\theta t + f\tau - \theta t')} dt' d\tau d\theta \quad (3)$$

其中: $x(t)$ 为测得的时域信号; $t(t')$ 为时间; τ 为时间位置参数,即时移; θ 为频移; f 为频率; $\psi(\theta, \tau)$ 为时频分布的核函数。

Cohen's 窗的二次型时频分布可解释为测试信号 x 的模糊函数 AF 的二维傅里叶变换。

$$C_x(t, f) = \int R(t, \tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \iint A_x(\theta, \tau) \times \psi(\theta, \tau) e^{-j2\pi f\tau} e^{-j2\pi\theta t} d\tau d\theta \quad (4)$$

其中: $R(t, \tau)$ 为局部相关函数; $A_x(\theta, \tau)$ 为信号 $x(t)$ 的模糊函数。

式(4)及以下各式中的积分均是从 $-\infty \sim +\infty$ 。加权函数 $\psi(\theta, \tau)$ 称为核函数,它直接决定分布的特性。 $A_x(\theta, \tau) \psi(\theta, \tau)$ 称为特征函数。由于模糊函数是测试信号的双线性函数,因此存在严重的交叉干扰项。若其混入时频分析中,将混淆原始信号的真实时频特性。于是采用核函数对模糊函数进行加权,使得始终在 (θ, τ) 平面原点处模糊函数 $A_x(\theta, \tau)$ 的自项通过,而远离远点的互项滤掉。核函数的这种作用也是矛盾的,一般来讲核函数带通频宽越窄,互项滤掉的也越多,但是自项的聚集也越明显。

Cohen 类时频分布对信号时间和频率的局部特性的刻画是通过时移及频移变换来实现的,而 Affine 类时频分布则是通过时移和伸缩变换实现的,因此它不满足时间和频率的移不变性。Cohen 类是基于对 Wigner-Ville 分布进行时频平滑来抑制交叉项的,而 Affine 类则是基于仿射平滑来抑制交叉项的,即 Cohen 类是对 Wigner-Ville 分布进行时频平滑, Affine 类则是对 Wigner-Ville 分布进行仿射平滑。

$$\text{TSR}_x(t, a) = \iint \Phi\left(\frac{\tau-t}{a}, a\theta\right) \text{WVD}_x(\tau, \theta) d\tau d\theta \quad (5)$$

其中: $\text{WVD}_x(\tau, \theta)$ 为信号 $x(t)$ 的 Wigner-Ville 变换; Affine 类基础仍然为 Wigner-Ville 分布。

2 扣件系统时频特性测试

2.1 试验样品及试验测试设备

试验样品有 WJ-7 扣件系统,60 cm 长的标准 60 钢轨,如图 1,2 所示。其中,扣件系统安装在 I 型无砟轨道板上,轨道板全支撑搁置在水泥地面上,安装扣件时道钉螺栓扭矩为 300 N·m, T 型螺栓扭矩为 150 N·m。本次试验测试设备包括笔记本电脑一台、加速度传感器 4 个、DHDAS_5920 动态信号采集分析系统一台和激振锤一个。加速度传感器有大小量程之分,如图 3 所示。大量程主要安装在钢轨轨脚处,左右各一个。小量程用于安装在轨道板两侧。



图1 WJ-7扣件系统

Fig.1 WJ-7 fastening system

2.2 试验步骤

采样频率为 51.2 kHz,分析频率为 20 kHz,研究频率为 0~4 kHz,加速度信号和噪声信号通过电荷放大器、信号采集卡后进入电脑,平均方式为线性



图 2 安装了钢轨的 WJ-7 扣件系统

Fig. 2 WJ-7 fastening system installed rail



图 3 激励位置示意图

Fig. 3 Locations of hammering

平均 8 次。分别采集激振力和钢轨的振动响应,并取 3 次试验的平均值。其中:输入信号为脉冲激励信号,加力窗以去除脉冲力以外的噪声信号;输出信号为衰减振动信号,加指数窗使信号在结束时衰减到 0,以消除截断误差。垂向激励的激励位置为轨头中部,如图 3 所示。

2.3 分析方法

试验记录的数据为时域数字信号。激励下的响应评估分析采用以下方法和参数:a. 连续时域下的脉冲响应函数(即标准化的加速度时程响应);b. 频率下的频率响应函数;c. 时频域下的谱分析(时频域内主要考虑:线性的短时傅里叶变换,非线性的 Rihaczek 和 Page 变换以及自适应最优核时频分布变换)。

2.4 数据处理步骤

测试所得的轨脚处加速度时程曲线如图 4 所示,力锤所拾取的激振信号时程曲线如图 5 所示。

2.4.1 消除趋势项和降噪处理

在振动测试中采集到的振动信号数据,由于放

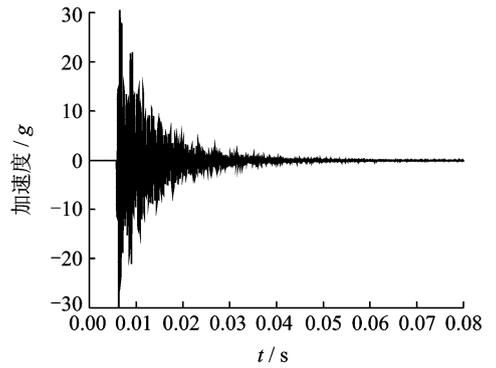


图 4 轨脚处加速度时程曲线

Fig. 4 Acceleration time history of rail foot

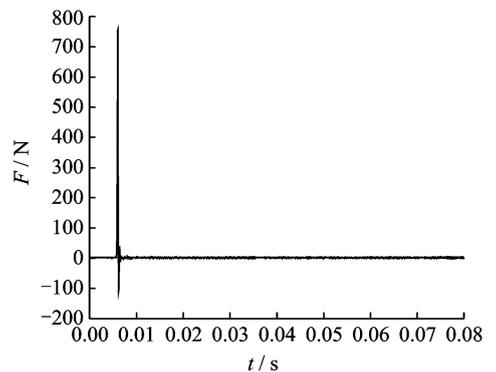


图 5 力锤激振力时程曲线

Fig. 5 Time history of hammer excitation

大器随温度变化产生的零点漂移、传感器频率范围外低频性能的不稳定以及传感器周围的环境干扰,往往会偏离基线、甚至偏离基线的大小还会随时间变化,偏离基线随时间变化的整个过程称为信号的趋势项。趋势项直接影响信号的正确性,应该将其去除。消除多项式趋势项和降噪后的钢轨轨脚加速度时程曲线如图 6 所示,力锤激励度时程曲线如图 7 所示。对比图 4~7,可以看到消除趋势项和降噪后的曲线更加光滑平顺^[13]。

2.4.2 计算脉冲响应函数、频率响应函数

脉冲响应一般是指系统在输入为单位冲激函数时的输出(响应)。对于连续时间系统来说,冲激响应一般用函数 $f(t)$ 来表示。对于无随机噪声的确定性线性系统,当输入信号为一脉冲函数 $\delta(t)$ 时,系统的输出响应 $f(t)$ 称为脉冲响应函数。脉冲函数为系统的固有属性,是固有属性在时间域上的分布,频率响应函数则是固有属性在频域上的分布。脉冲响应函数时程曲线如图 8 所示,频响函数曲线如图 9 所示。

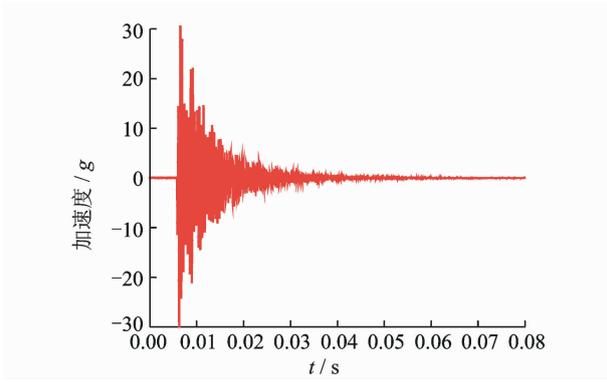


图 6 处理后轨脚加速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration time history of rail foot after processed

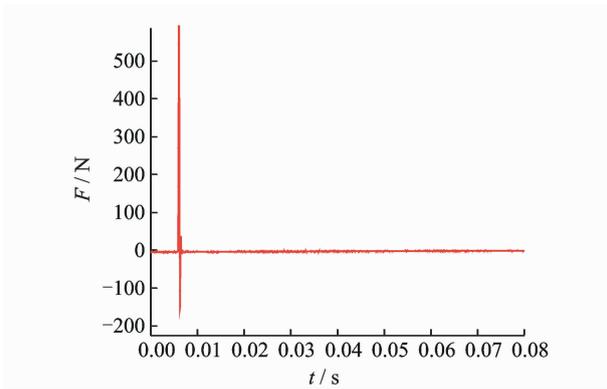


图 7 处理后力锤激励时程曲线

Fig. 7 Time history of hammer excitation after processed

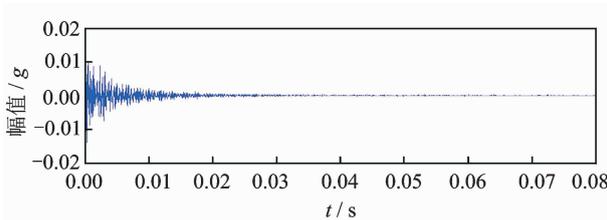


图 8 轨脚处脉冲响应函数

Fig. 8 Impulse response function of rail foot

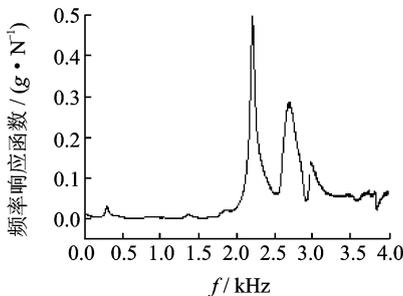


图 9 轨脚处频响函数曲线

Fig. 9 Frequency response function of rail foot

2.4.3 时频分析

1) 线性的短时傅里叶变换,即 STFT 分析。

STFT 时频分析亮度图如图 10 所示。分析图 8 可知,加速度最大值在激励开始 0.001 5 s 的位置,最大值为 0.029 4g,最大负值出现在 0.002 4 ms 的位置,最大值为 0.031 7g。振动加速度从 0.029 4g 衰减到 0.000 015g 花费了 0.024 s。从图 9 可得到,在 0~4 kHz 频段内,频响函数幅值较大的位置发生在 $f=249, 2\ 250, 2\ 689, 2\ 946, 3\ 614$ 和 $3\ 833$ Hz。图 10 为轨脚处脉冲响应函数的短时傅里叶变换,可看出在 0~0.08 s 整个时程内有 3 个重要频率:第 1 个频率即 $f=2\ 250$ Hz 亮度最大,持续时间为 0~0.019 s;第 2 个重要频率 $f=2\ 689$ Hz,其持续时间为 0.014 s;第 3 个重要频率为 $f=2\ 946$ Hz,其持续时间为 0.009 s;此外 $f=249$ Hz 也是一个比较明显的频率,其亮度也是显而易见的,持续时间在 0.015 s。

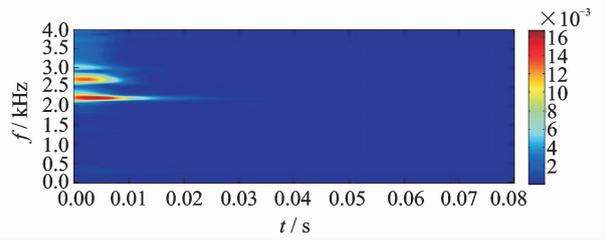


图 10 轨脚处脉冲响应函数 STFT 时频分布图

Fig. 10 STTF time-frequency distribution of the rail foot impulse response function

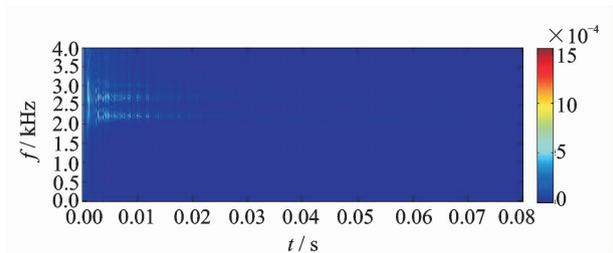


图 11 轨脚处脉冲响应函数 Page 时频分布图

Fig. 11 Page time-frequency distribution of the rail foot impulse response function

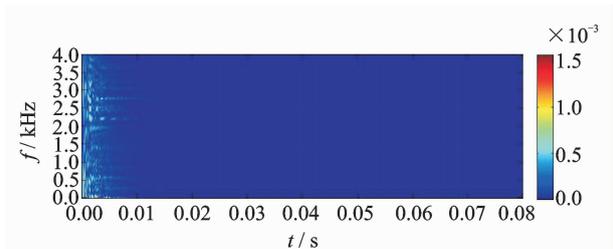


图 12 轨脚处脉冲响应函数 Zhao-Atlas-Marks 时频分布图

Fig. 12 Zhao-Atlas-Marks time-frequency distribution of the rail foot impulse response function

对比图8~10可以知道轨脚的时域、频域和时频域固有属性,并将时域、频域和时频域的固有属性一一对应起来,可以看出短时傅里叶变换具有较高的时间和频率分辨率。

2) 非线性的 Page 变换,即 Page 分析。

Page 时频分析亮度图如图 11 所示,可看出在 $0\sim 0.08$ s 整个时程内有 3 个重要频率:第 1 个重要频率即 $f=2\ 250$ Hz 亮度最大,持续时间为 $0\sim 0.019$ s;第 2 个重要频率 $f=2\ 689$ Hz,其持续时间为 0.012 s;第 3 个重要频率为 $f=2\ 946$ Hz,其持续时间为 0.009 s;此外 $f=3\ 614$ Hz 和 $3\ 833$ Hz 的高频位置也具有较为明显的亮度。可见,二次型 Page 分布时频分析在能量较高的高频段具有较好的分辨率,而在低频段显得无能为力。

3) 非线性的 Zhao-Atlas-Marks 变换,即 Zhao-Atlas-Marks 分析。

Zhao-Atlas-Marks 时频分析亮度图如图 12 所示,可以在全时段内识别出重要频率 $f=249$ Hz, 659 Hz 的能量,在 $2\ 250$ Hz, $2\ 689$ Hz 等高频区时间分辨率较差。可见,二次型 Zhao-Atlas-Marks 分布时频分析在低频段效果较好,而在高频段不是很理想。

3 结 论

1) 钢轨振动主要集中在中高频,其中:中频以 249 Hz 较为明显,持续了 0.01 s;高频则以 $2\ 250$ Hz 时能量为最大,且该频率下振动持续了从激励开始到衰减为 0 的整个时域,随着时间的延续,能量也越来越小。

2) $0\sim 4$ kHz 频段内,STFT 时频分析可以较为完整清晰地将轨脚振动的时频域固有属性挖掘出来,并将时域、频域和时频域的固有属性一一对应起来。由此可以认为,短时傅里叶分析具有较高的时间和频率分辨率。

3) Page 时频分析可以识别出钢轨轨脚在 $2\ 250$ Hz, $2\ 689$ Hz 和 $2\ 946$ Hz 等振动能量较大的高频振动,但对于 249 Hz 这样的中低频振动显得无能为力。

4) Zhao-Atlas-Marks 时频分析在 $0\sim 4$ kHz 全时段内可以清晰地识别出能量较为显著的频率 249 Hz 和 659 Hz,而在 $2\ 250$ Hz, $2\ 689$ Hz 等高频

频率处时间分辨率较差。因此可以认为二次型 Zhao-Atlas-Marks 分布时频分析在低频段识别效果较好,在高频段不是很理想。

5) 根据笔者提出的动力特性识别方法得到的重要频率,即为安装在该型号扣件系统下钢轨的主要振动和辐射噪声的频率,该结论可以为轨道结构的减振降噪提供依据。

参 考 文 献

- [1] 李成辉. 轨道[M]. 成都:西南交通大学出版社,2005:25-40.
- [2] Smutny J. Measurement and analysis of dynamic and acoustic parameters of rail fastening[J]. NDT&E International,2004(37):119-129.
- [3] 丁康,陈健林,苏向荣. 平稳和非平稳振动信号的若干处理方法及发展[J]. 振动工程学报,2003,21(1):144-147.
Ding Kang, Chen Jianlin, Su Xiangrong. Development in vibration signal analysis and processing methods[J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 21(1): 144-147. (in Chinese).
- [4] Kaewunruen S, Remennikov A M. Experiments into impact behavior of railway prestressed concrete sleepers[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(8): 2305-2315.
- [5] 钟佑明. 小波包时频分析及其特性[J]. 振动、测试与诊断,2009,29(1):51-56.
Zhong Youming. Study on characteristics of wavelet packet time-frequency[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(1): 51-56. (in Chinese)
- [6] 张志鹏,王伟平,郭明威. 基于小波-中值降噪的经验模式分解及应用[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(6):779-784.
Zhang Zhipeng, Wang Weiping, Guo Mingwei. EMD and its application based on wavelet-median synthesis de-noising[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 779-784. (in Chinese)
- [7] 宁静,朱肇昆. MD 和 Cohen 类结合抑制交叉项的时频分析方法[J]. 西南交通大学学报,2011,45(3):11-13.
Ning Jing, Zhu Zhaokun. Time-frequency presentation using empirical mode decomposition combined with cohen class to suppress cross terms [J]. Journal of

- Southwest Jiao Tong University, 2011, 45(3):11-13. (in Chinese)
- [8] Carrascal I A, Casado J A, Polanco J A. Dynamic behavior of railway fastening setting pads[J]. Engineering Failure Analysis, 2007(14):364-373.
- [9] 郭年程, 史文库, 刘文军. 轻型客车驱动桥振动噪声源分析与改进[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(4):608-614.
Guo Niancheng, Shi Wenku, Liu Wenjun. Analysis and optimization of vibration and noise for driving axle of a light bus[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(4):608-614. (in Chinese)
- [10] 徐浩, 陈怀海, 游伟倩. 多输入多输出冲击振动试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(2):143-149.
Xu Hao, Chen Huaihai, You Weiqian. Experimental study on multiple input-multiple output shock and vibration[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(2):143-149. (in Chinese)
- [11] 臧勇, 范小彬, 王会刚. 基于信号时-频特征的轧机振动分析[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(5):642-647.
Zang Yong, Fan Xiaobin, Wang Huigang. Vibration analysis of rolling mill based on signal-frequency characteristics[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(5):642-647. (in Chinese)
- [12] 张义平, 李夕兵, 左宇军. 爆破振动信号的 HHT 分析与应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 2008:12-25.
- [13] 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006:72-112.



第一作者简介:赵才友,男,1984年10月生,博士研究生。主要研究方向为城市轨道交通减振降噪,轨道结构无损检测。曾发表《基于应变模态变化率的钢轨损伤检测》(《振动、测试与诊断》2012年第32卷第5期)等论文。
E-mail: zcy848279@163.com

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价 20 元,全年 120 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332
传真:(025)84893332 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdcn.nuaa.edu.cn

