

微振动测量和评估关键技术研究

徐新云¹, 陈旭雯², 陈章位¹

(1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310000; 2. 杭州亿恒科技有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 环境微振动影响精密仪器使用精度, 因此微振动测量和评估十分重要。微振动等级测量是基于速度信号倍频程频谱, 而传统倍频程分析采用的频域快速傅里叶变换(FFT)算法, 存在分辨率固定、低频段频谱泄漏等缺点。本文提出了一种基于比值校正的复解析细化傅里叶变换(ZFFT)校正算法。仿真表明, 该算法能够大幅降低计算量, 提高频谱分辨率, 降低频域幅值误差。采用分频段倍频程分析方法既能抑制低频段的频谱泄漏, 又能增加频谱谱线, 提高分析精度; 研制了一套微振动测量和评估系统, 包括: 低频微振动传感器、MI-7208 智能测量装置、微振动等级测量评估软件(简称: MVE-7208)。通过实地测量, 验证了该系统具有 VC-F 级微振动的测量能力和稳定性。

关键词: 频谱细化校正; 倍频程分析; 环境微振动; 微振动等级评估

中图分类号: O329 文献标志码: A DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202309068

Research on key technologies for micro-vibration measurement and evaluation

XU Xinyun¹, CHEN Xuwen², CHEN Zhangwei¹

(1. State Key Laboratory of Fluid Power & Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China;

2. Econ Technologies Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Environmental microvibration affects the accuracy of precision instruments, making microvibration measurement and assessment crucial. Microvibration level measurement is based on the octave spectrum of the velocity signal. However, the frequency-domain FFT method used in traditional octave analysis suffers from shortcomings such as fixed resolution and low-frequency spectrum leakage. Therefore, a complex-analysis ZFFT correction algorithm based on ratio correction was proposed. Simulations show that this algorithm improves spectral resolution while maintaining the same number of FFT analysis points. While maintaining the same number of sampling points, the computational effort is significantly reduced, and the spectrum amplitude error is as low as one thousandth. Frequency-band octave analysis is employed to suppress low-frequency spectrum leakage and increase the number of spectral lines. A microvibration monitoring and analysis system was developed, comprising a low-frequency microvibration sensor, the MI-7208 intelligent measurement device, and microvibration level measurement and assessment software. Field measurements verified the system's ability to detect VC-F-level microvibration signals and its long-term measurement stability.

Keywords: spectrum refinement and correction; octave analysis; environmental micro-vibration; micro-vibration level evaluation

高精密度仪器设备对于环境微振动非常敏感, 微振动将对设备正常工作造成影响^[1], 因此微振动测量与评估对于半导体领域减隔振十分重要。

精密仪器设备的微振动等级评价标准最早由 GORDON^[2] 提出, 该标准主要通过绘制微振动速度信号的 1/3 倍频程均方根值谱, 与制定的振动标准(VC)等级曲线进行对比从而得出微振动等级。中国根据 VC 振动标准评价方法制定了《电子工业防微振工程技术规范》^[3], 并对 VC 标准未考虑内容进行了详细的补充。常用的 1/3 倍频程方法为时域滤波器法^[4] 和频域 FFT 法^[5], 前者存在滤波器数多、低

频段滤波器设计困难等问题, 后者存在频率分辨率固定、低频段频谱泄漏等问题。因此为了提高频率分辨率、精确评估微振动等级, 需改进倍频程分析方法。

本文在频域 FFT 的基础上开展研究, 提出了一种基于比值校正的复解析 ZFFT 校正算法, 在进行倍频程分析时, 高频段使用 FFT 对振动的速度信号做谱分析, 低频段采用 ZFFT 校正算法进行处理, 与高频段频谱合成后得到高分辨率倍频程频谱; 研发了专用的高精度微振动等级测量评估软件, 并搭建了一套高精度低噪声微振动测量与评估系统。通过在

之江实验室超洁净室实地测量,验证了系统工作的稳定性和微振动等级评估的准确性。

1 细化校正算法

1.1 基于比值法校正的复解析 ZFFT 校正算法

微振动信号在传播过程中,高频段经过地层衰减较快,因此所测量的振动信号大多都集中在低频段,如自然活动大多在 5 Hz 以下、交通运输一般在 30 Hz 以下^[6]。图 1 为某场地的一段振动速度时域图及其 FFT 变换后的频域图,可以看出低频段内频率成分密集。传统 FFT 方法频率分辨率固定,低频段谱线较少,带来较大的分析误差。研究表明,当 1/3 倍频程内包含 5 条以上谱线时^[7-8],分析精度便可达到国家标准所规定的要求。

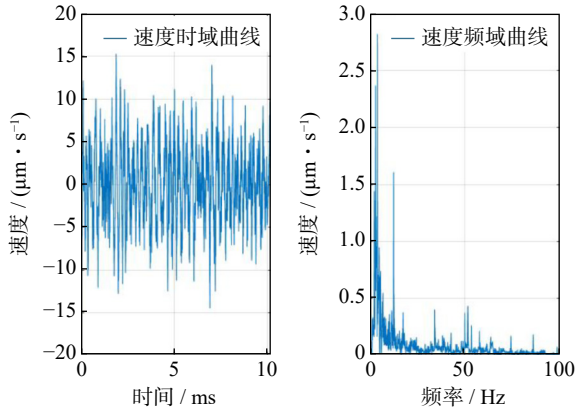


图 1 某场地振动信号时域及频域图

Fig. 1 Time and frequency domain plots of vibration signals at a site

为了克服 FFT 频谱分析方法的缺点,研究者提出了多种频谱细化方法,其中 FFT-FS、CZT 以及 ZFFT 是较为广泛的细化算法^[7]。FFT-FS 与 CZT 通过频域插值细化频谱,两种算法只是把细化分析的频段放大,无法区分已混叠的频率^[8]。ZFFT 通过增加采样点数,能够减少频谱泄漏^[9],已应用于工业领域^[10]。

离散频谱的校正一般采用比值校正法、能量重心校正法以及相位差法等方法对幅值谱进行校正^[11-12]。其中比值校正法在窗函数频谱解析表达式已知的情况下,原理简单、校正精度高^[13]。比值校正法在加窗后通过幅值谱峰主瓣内极大值与次极大值谱线幅值之比,得到主瓣重心横坐标,代入窗函数频谱模函数,最终求出校正的幅值^[14-15]。

本文提出基于比值校正的复解析 ZFFT 校正算法(以下简称改进 ZFFT 算法, M-ZFFT),对低频段信号进行频谱细化分析和幅值校正,从而提高分析精度。频谱细化增加了 1/3 倍频程内的谱线数量。M-ZFFT 算法流程如图 2 所示。

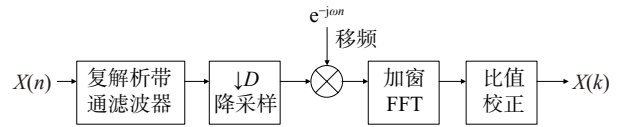


图 2 M-ZFFT 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of M-ZFFT algorithm

$X(n)$ 为微振动信号序列,设采样频率为 f_s ,细化频段范围为 $f_1 \sim f_2$,采样点数为 $D \cdot N$,其中 N 和 D 分别为 FFT 点数及细化倍数,则 M-ZFFT 算法步骤如下:

(1) 确定细化倍数 D 。经 D 倍抽取后的采样频率为 f_s/D 。为避免混叠,设定复解析带通滤波器宽度为 $f_s/(2D)$,细化频段宽度为 $f_2 - f_1$,细化倍数 D 为:

$$D = \frac{f_s}{2(f_2 - f_1)} \quad (1)$$

(2) 构造复解析带通滤波器。通过将低通滤波器频带中心平移 ω_c ,得到复解析带通滤波器,如图 3 与 4 所示,图中, $H(e^{j\omega})$ 为滤波器幅频特性的频域表达。

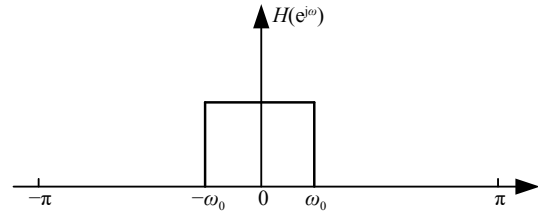


图 3 低通滤波器幅频特性

Fig. 3 The amplitude-frequency characteristics of low-pass filter

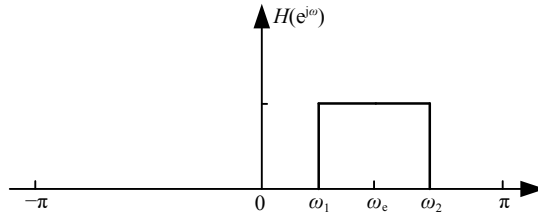


图 4 复解析带通滤波器幅频特性

Fig. 4 The amplitude-frequency characteristics of complex analytic bandpass filter

其中低通滤波器的冲击响应 $h_L(k)$ 为:

$$h_L(k) = \frac{\sin(k\omega_0)}{k\pi} \quad (2)$$

对低通滤波器进行移频,得到复解析带通滤波器冲击响应 $h(k)$:

$$h(k) = h_L(k)e^{j\omega_c k} = \frac{1}{\pi k} \sin(\omega_0 k) \cos(\omega_c k) + \frac{j}{\pi k} \sin(\omega_0 k) \sin(\omega_c k) \quad (3)$$

式中, $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M$, M 为滤波器的半阶数; $\omega_0 = (\omega_2 - \omega_1)/2$; $\omega_c = (\omega_2 + \omega_1)/2$,其中 ω_1 和 ω_2 分别对应细化频率范围 f_1 和 f_2 。通过加窗平滑滤波器过渡带后, M 与滤波器过渡带 ω_p 之间的关系为:

$$\omega_p = \frac{4\pi}{M} \quad (4)$$

$$\omega_p = \frac{a\pi}{D} \quad (5)$$

$$M = \frac{4D}{a} \quad (6)$$

式中, a 为外扩系数, 通过设定合适的外扩系数可降低半阶数, 从而减小滤波器设计计算量, 且不影响滤波质量。其中外扩系数与过渡带设计的关系如图 5 所示(为示意方便, 将过渡带 AB 绘制成直线)。

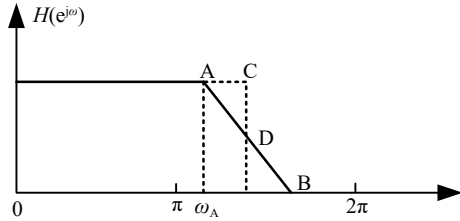


图 5 过渡带设计示意图

Fig. 5 Schematic diagram of transition zone design

图 5 中 D 点为理想滤波器边界, 为了保证滤波器通带包含细化频带区间, 通常将通带设计边界从点 A 外扩至点 C, 即 a 代表 ω_A 的外扩系数。

(3) 微振动信号 $x(n)$ 通过复解析带通滤波后, 得到信号 $y(n)$:

$$y(n) = x(n) * h(k) \quad (7)$$

式中, “*” 表示卷积符号。滤波后, $f_2 \sim f_1$ 频段被保留。

(4) 对 $y(n)$ 进行 D 倍降采样得到信号 $g(n)$:

$$g(n) = y(Dn) \quad (8)$$

式中, $n=0, 1, \dots, D \cdot N - 1$, 经降采样的信号 $g(n)$ 采样频率为 f_s/D , 点数为 N 。

(5) 对 $g(n)$ 进行移频, 移频量为 ω_d , f_1 被移至零频点:

$$\omega_d = \frac{2\pi D f_1}{f_s} \quad (9)$$

$$g'(n) = g(n) \cdot e^{-j\omega_d n} \quad (10)$$

(6) 计算 $g'(n)$ 的频谱 $G'(K)$:

$$G'(k) = G\left(k + \frac{\omega_d N}{2\pi}\right) = \frac{1}{D} X\left(k + \frac{\omega_d N}{2\pi}\right) = \begin{cases} \frac{1}{D} X\left(k + \frac{\omega_d N}{2\pi}\right), & k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\ 0, & k = \frac{N}{2}, \frac{N}{2} + 1, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (11)$$

$X(k)$ 为信号 $x(n)$ 的频谱, f_1 在 $X(k)$ 中对应的谱线位置为 l_1 , 可得:

$$l_1 = \frac{NDf_1}{f_s} = \frac{\omega_d N}{2\pi} \quad (12)$$

$$X(k) = DG'(k - l_1) \quad (13)$$

式中, $k = l_1, l_1 + 1, \dots, l_1 + N/2 - 1$; 可见 $G'(K)$ 频谱中前 $N/2$ 谱线对应了细化频带。

(7) 采用 M-ZFFT 算法对细化频谱进行幅值校正。步骤(1)~(6)已完成对选定频段的细化处理, 但由于需对信号进行截断, 导致能量泄漏, 频谱幅值存

在一定误差^[16]。

细化后频谱分辨率提高, 信号频率成分得到分离, 实现频率成分幅值的自动校正。其中加 Hanning 窗的比值校正算法效果更佳^[17], Hanning 窗信号的谱图如图 6 所示。图中信号频率最大值谱线的索引号为 k , 通过 y_k 和 y_{k-1} 谱线可求得主瓣重心横坐标:

$$x_0 = \frac{(k+1)y_k + (k-2)y_{k-1}}{y_k + y_{k-1}} = k + \frac{y_k - 2y_{k-1}}{y_k + y_{k-1}} \quad (14)$$

$$x_0 = k + \Delta k \quad (15)$$

可得信号真实频率处索引号与最大值谱线索引号偏差 Δk :

$$\Delta k = \begin{cases} \frac{2y_{k+1} - y_k}{y_k + y_{k+1}}, & y_{k+1} \geq y_{k-1} \\ \frac{y_k - 2y_{k-1}}{y_k + y_{k+1}}, & y_{k+1} < y_{k-1} \end{cases} \quad (16)$$

Hanning 窗主瓣函数为:

$$y = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \cdot \frac{N}{2(1-x^2)} \quad (17)$$

可得最大值谱线幅值 y_k :

$$y_k = A \frac{\sin[\pi(x-x_0)]}{\pi(x-x_0)} \cdot \frac{N}{2[1-(x-x_0)^2]} \quad (18)$$

式中, $x-x_0 = \Delta k$ 。可得 A 的校正幅值为:

$$A = y_k \frac{2\pi\Delta k}{\sin(\pi\Delta k)} \cdot \frac{1-\Delta k^2}{N} \quad (19)$$

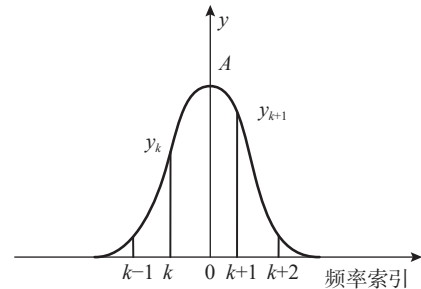


图 6 Hanning 窗信号谱图

Fig. 6 Signal spectrum of Hanning

1.2 细化校正算法计算量

M-ZFFT 算法与 $D \cdot N$ 点 FFT 相比, 仅对频段 $f_1 \sim f_2$ 进行细化分析。FFT 分析进行全频段 $D \cdot N$ 点傅里叶变换, 而 M-ZFFT 算法只进行 N 点傅里叶变换。

以 FFT 算法为参考, 采用复数乘法统计运算量, 则 $D \cdot N$ 点 FFT 变换的计算量为:

$$S_{\text{FFT}} = 0.5 \times ND \log_2 ND \quad (20)$$

对于 M-ZFFT 算法, 步骤(7)的计算量为常数级, 可忽略不计, 则总的计算量为:

$$S_{\text{M-ZFFT}} = 0.5 \times N \log_2 N + 2NM + 2N \quad (21)$$

如图 7 所示, 分析点数为 N , 绘制两种算法的计算量曲线。可见, 在相同采样点数的情况下 M-ZFFT 计算量小于 FFT 算法。

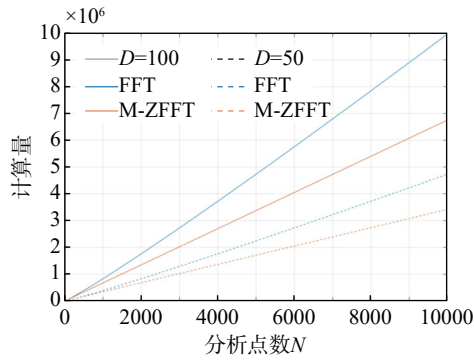


图7 算法计算量对比图

Fig. 7 Comparison chart of the computation of the algorithms

1.3 细化校正算法细化能力

采用 MATLAB 对 M-ZFFT 算法进行仿真实验, 输入信号的时域表达式为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^4 A_i \cos(2\pi f_i t) \quad (22)$$

仿真信号为余弦函数的叠加, 初始相位均设置为 0, 幅值及信号频率如表 1 所示。

表 1 仿真信号幅值及频率信息

Tab. 1 Amplitude and frequency information of simulated signal

i	幅值 $A/(mm \cdot s^{-1})$	频率 f/Hz
1	1	0.93
2	3	2.64
3	2	2.81
4	5	4.87

设定采样频率 $f_s=1024$ Hz, $N=2048$, 选取的细化频段范围为 0.5~10.5 Hz, 则细化中心频率为 5.5 Hz, 细化倍数 D 取整为 52, 当外扩系数 a 取 1.2 时可认为是半阶数最小的方案^[17], 滤波器半阶数 $M=4D/a$ 取整为 173, FFT 窗函数取汉宁窗。对细化频段进行滤波、降采样、复调制移频、FFT 谱分析及比值校正后得到图 8 所示的频谱图。并绘制出传统复解析 ZFFT 算法细化频谱图, 如图 9 所示。 $D \cdot N$ 点 FFT 分析频谱图, 窗函数为汉宁窗, 如图 10 所示。

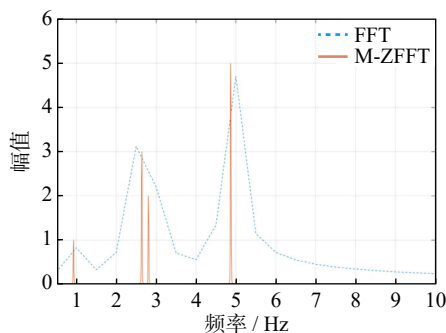


图8 M-ZFFT 细化校正前后频谱图

Fig. 8 Spectrogram before and after M-ZFFT refinement correction algorithm

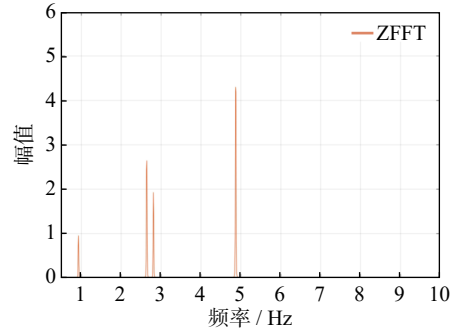
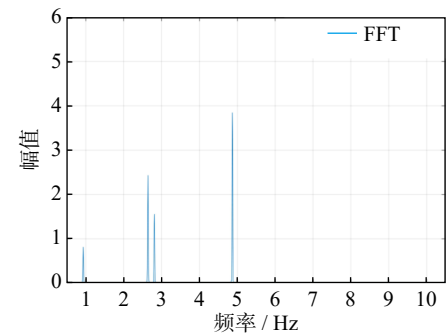


图9 ZFFT 细化频谱图

Fig. 9 Spectrogram of ZFFT refinement correction algorithm

图10 $D \cdot N$ 点 FFT 分析频谱图Fig. 10 Spectrogram of $D \cdot N$ point FFT analysis

由图 8 可见, 2.64 Hz 和 2.81 Hz 两频率成分所在的谱线无法分辨, 存在较大误差。采用 M-ZFFT 算法, 两频率成分清晰可辨, 幅值误差小于 0.2%。图 9 为传统 ZFFT 算法分析结果, 其中频谱幅值误差最大达到 14.02%。图 10 为 $D \cdot N$ 点 FFT 分析结果, 各频率成分清晰可辨, 但频谱幅值误差最大达到 22%。图 8、9 频谱图幅值及其误差如表 2 所示。

表 2 细化校正频谱幅值及误差

Tab. 2 Amplitudes and errors of the refined and corrected spectrum

理论幅值	ZFFT		M-ZFFT	
	细化幅值	幅值误差/%	细化校正幅值	幅值误差/%
1	0.9514	4.86	1.0012	0.1150
3	2.6420	11.93	2.9981	0.0631
2	1.9254	3.73	1.9986	0.0711
5	4.2988	14.02	4.9988	0.0249

2 微振动倍频程

2.1 倍频程分析原理

国家标准《电声学 倍频程和分数倍频程滤波器》^[18] 对倍频程频段划分做了详细规定。根据 VC 标准曲线规定, 微振动倍频程频谱范围为 1~80 Hz。在倍频程分析中, 设频段上、下限频率分别为 f_1 、 f_2 ,

中心频率为 f_0 , 则满足以下关系式:

$$f_1 = (G^{+1/(2b)})(f_0) \quad (23)$$

$$f_2 = (G^{-1/(2b)})(f_0) \quad (24)$$

式中, $G=2$ 时, 为标称倍频程比; $1/b$ 为带宽指示值, b 取 3 时以上两式为 1/3 倍频程分析的频率关系式。

2.2 基于分频段的倍频程分析

倍频程频谱分析采用 FFT 分析将会导致频率分辨率固定、低频段谱线数少、频谱泄露等问题。本文提出分频段倍频程频谱分析方法, 即低频段采用 M-ZFFT 算法, 高频段采用 FFT 算法, 合成微振动倍频程频谱。流程如图 11 所示。

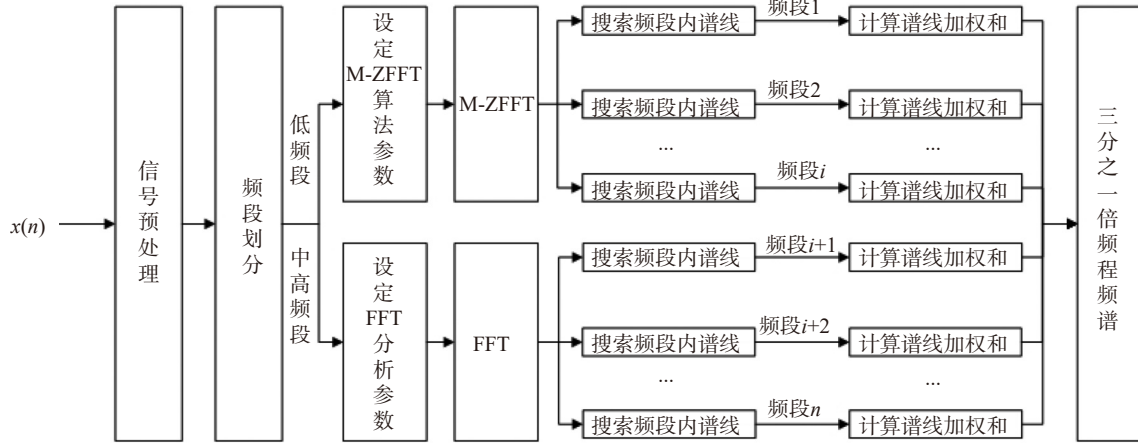


图 11 基于分频段的倍频程频谱分析

Fig. 11 Octave spectrum analysis based on crossover bands

基于分频段倍频程分析方法的具体流程为:

(1) 时域微振动信号预处理, 包括去直流、平滑、消除趋势项等;

(2) 划分频段, 将 0.5~10.5 Hz 定义为低频段, 其余为中高频段, 并设定 M-ZFFT 及 FFT 分析参数;

(3) 低频段采用 M-ZFFT 算法分析, 中高频段采用 FFT 进行频谱分析;

(4) 搜索对应 1/3 倍频程频段内谱线并进行加权, 将低频段和中高频段合成 1/3 倍频程频谱, 实现了频段谱线的定向增加。

采用分频段倍频程分析方法可以有效增加低频段谱线数量, 抑制频谱泄露, 中高频段采用 FFT 分析后谱线数已满足要求, 实现了频段谱线的定向增加。

2.3 分频段倍频程性能分析

为测试分频段倍频程分析方法的性能, 采用频率为 1、6.3 和 31.5 Hz 的单频正弦信号来模拟输入的微振动速度信号, 速度信号的幅值为 0.1 mm/s, 振动速度基准为 1 nm/s, 则信号的振动速度级为 100 dB。分析参数设定同 1.3 节, 分别在理想无噪声以及添加方差为 $1 \mu\text{m}^2/\text{s}^2$ 的高斯白噪声两种条件下进行频谱分析性能研究, 得到如图 12~14 所示的结果, 图 15 为采用单频 1 Hz 正弦信号的 $D \cdot N$ 点 FFT 倍频程分析频谱, 窗函数为汉宁窗。

从图 12 和 13 可以看出, 基于 M-ZFFT 的分频段倍频程频谱分析在未加噪声时谱估计准确, 误差小

于 0.1 dB, 而其他倍频程频段的谱估计值为零。在加高斯白噪声时, 谱估计仍满足国家标准对于 1 级倍频程滤波器规定的允差要求^[19]。图 14 为中高频段采用 FFT 倍频程分析频谱, 其他倍频程频段衰减满足要求。而对于图 15, 在低频段 1 Hz 处, $D \cdot N$ 点 FFT 倍频程分析由于频谱泄露使谱估计值误差达到了 1.8 dB, 性能下降。

在 1.3 节式 (22) 的基础上, 添加幅值均为 1 mm/s、频率分别为 25 和 64 Hz 的单频正弦的仿真信号, 以此进行分频段倍频程分析, 结果见图 16。可知, 采用 FFT 的倍频程方法的分析精度低, 在仿真信号频率点幅值误差较大, 且出现频谱泄露; 而分频段倍频程方法的分析精度高, 频谱泄露得到改善, 幅值误差小。

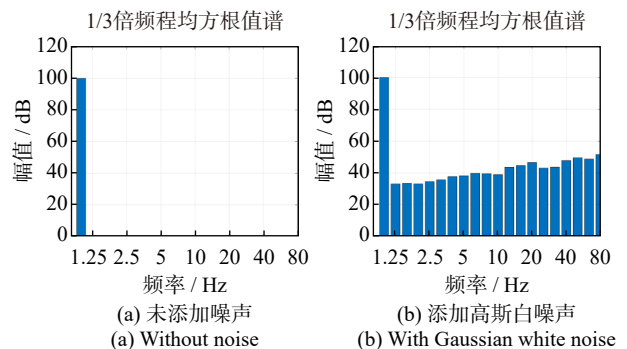


图 12 1 Hz 单频正弦信号分频段倍频程频谱

Fig. 12 Crossover-band octave spectrum of the 1 Hz single-frequency sinusoidal signal

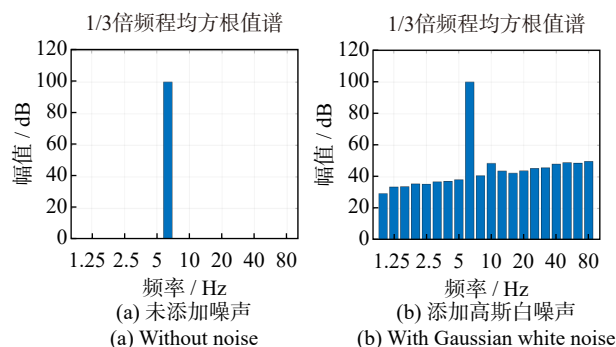


图 13 6.3 Hz 单频正弦信号分频段倍频程频谱

Fig. 13 Crossover-band octave spectrum of the 6.3 Hz single-frequency sinusoidal signal

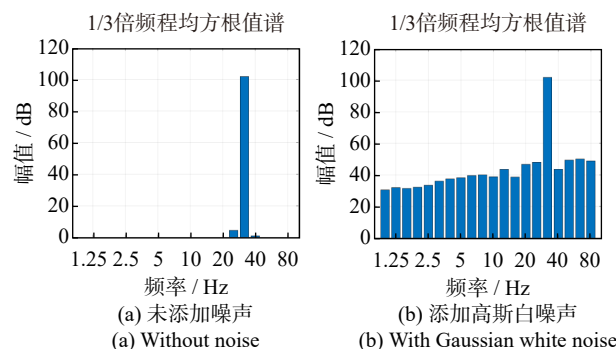


图 14 31.5 Hz 单频正弦信号分频段倍频程频谱

Fig. 14 Crossover-band octave spectrum of the 31.5 Hz single-frequency sinusoidal signal

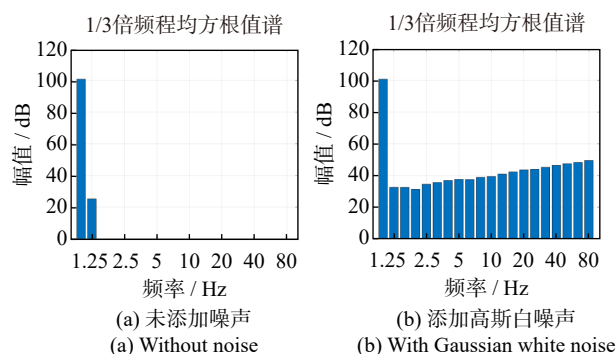
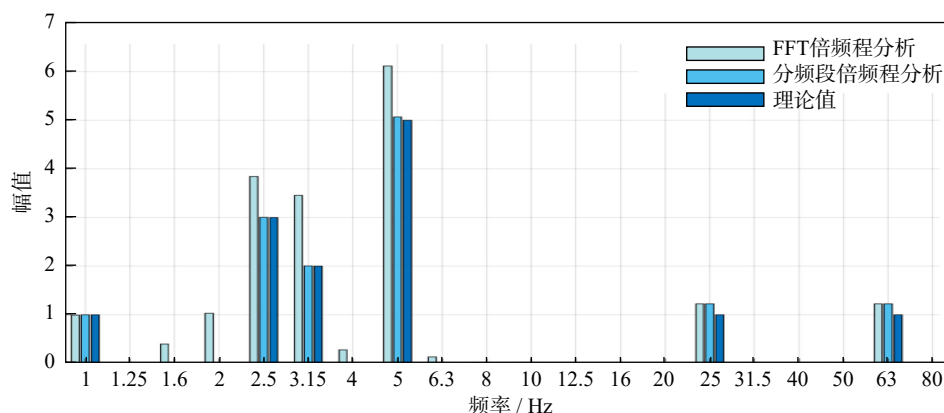
图 15 1 Hz 单频正弦信号 $D \cdot N$ 点 FFT 倍频程频谱Fig. 15 FFT of $D \cdot N$ points octave spectrum of the 1 Hz single-frequency sinusoidal signal

图 16 分频段倍频程频谱分析对比图

Fig. 16 Comparison plot of octave spectrum analysis based on crossover bands

3 微振动测量与评估系统

3.1 系统总体方案

微振动测量有多种方案,如基于激光散斑的微振探测^[20]、利用 Lissajous 中心角的微振位移监测^[21]以及基于激光干涉的微振测量^[22]等。虽然激光测量精度高,但需保证激光测量设备“相对静止”,故其不适合工业现场。设计了一套高精度微振动测量与评估系统,总体方案如图 17 所示。硬件部分包括微振动速度传感器、智能测量装置、MVE-7208。该系统主要应用对象为无隔振措施素地、半导体隔振地基、仪器隔振平台等。

根据不同场地设计不同测量方案,将传感器安装在场地设计测点,采集终端获取传感器输出的微振模拟信号,对其进行信号调理、A/D 转换、数据编码,处理后的数据通过以太网输出至上位机进行计算显示。

3.2 测量系统硬件

微振动传感器采用 941B 型低频拾振器,可测量加速度及速度信号,其灵敏度高、噪声低。主要参数如表 3 所示。

MI-7208 智能测量装置在微振动测量频率范围内本底噪声低至亚微伏级。主要参数如表 4 所示。

3.3 MVE-7208 设计

MVE-7208 由多个模块构成,软件整体框架如图 18 所示。

MVE-7208 采用多线程方式进行开发,运行框架见图 19。主线程负责上位机界面数据的更新及交互控制命令的发送;子线程 1 和 2 负责解析控制命令、控制 MI-7208 智能测量装置采集微振动信号;子线程 3 负责信号的时域分析和分频段倍频程分析。

MVE-7208 的 UI 界面见图 20,集成了交互模块

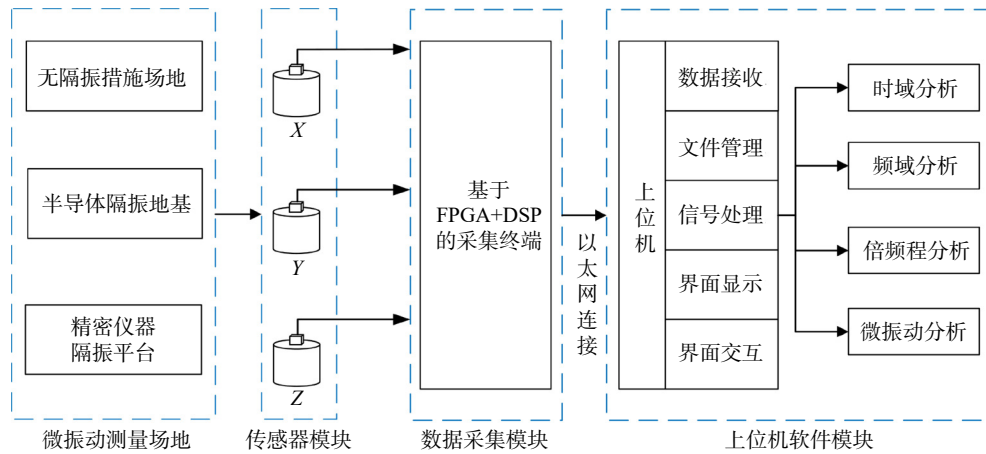


图 17 微振动测量与评估系统总体方案

Fig. 17 The general scheme of micro-vibration monitoring and analysis system

表 3 941B 型拾振器主要参数

Tab. 3 Main parameters of sensor type 941B

参数	数值
频率范围/Hz	0.5~100
灵敏度/(V·s·m ⁻¹)	23

表 4 MI-7208 系统部分参数

Tab. 4 Partial system parameters of MI-7208

参数	数值
输入通道	8
分辨率	24位
动态范围/dB	130

和显示模块。显示模块包括微振动信号的时域曲线、倍频程谱图、微振动数据。微振动倍频程谱图显示区域背景, 绘制微振动等级曲线。交互模块包括测量的开始与结束、测量参数的设置、传感器设置等。

基于 M-ZFFT 算法的分频段倍频程频谱分析设

置模块如图 21 所示, 可设置细化频段和采样频率, 自动计算细化倍数。

4 微振动测量与等级评估实验

4.1 实验方法

环境微振动测量实验简单且真实可靠^[23]。流程为: 拾振器测量隔振地基表面振动速度信号, 输入至 MI-7208 智能测量装置, 对信号进行采集和处理, 通过以太网传输至计算机, 再经专用软件得到微振动倍频程图谱, 获得微振动等级。

4.2 微振动等级实地测量实验

采用高精度微振动测量与评估系统对之江实验室超洁净室场地进行测量。该洁净室位于负一楼, 地面交通、人员走动等其他因素对其影响较小。测点布置及测量现场如图 22 和 23 所示。

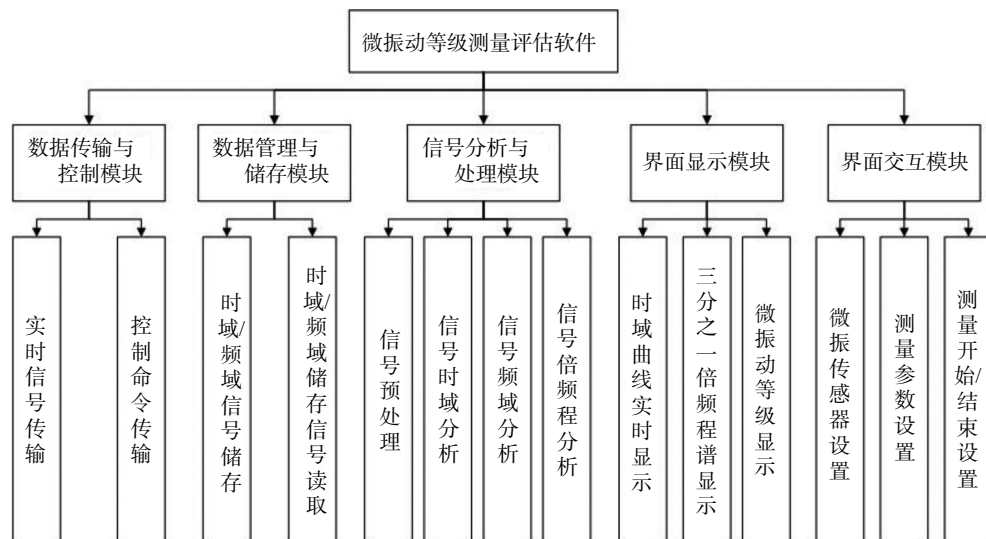


图 18 微振动等级测量评估软件总体框架

Fig. 18 The general framework for micro-vibration level measurement and evaluation software

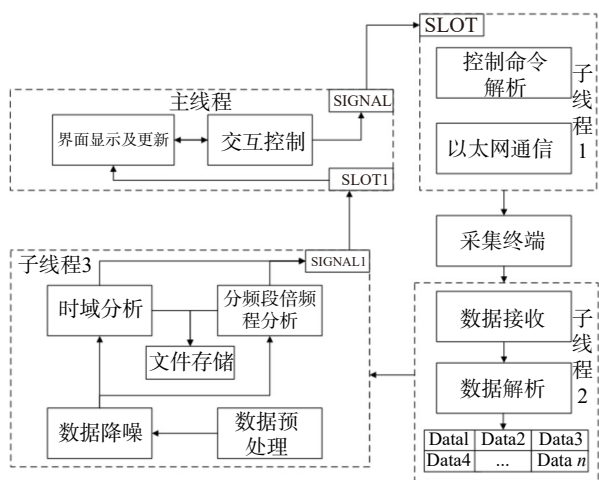


图 19 软件运行框架

Fig. 19 Operational framework of the software

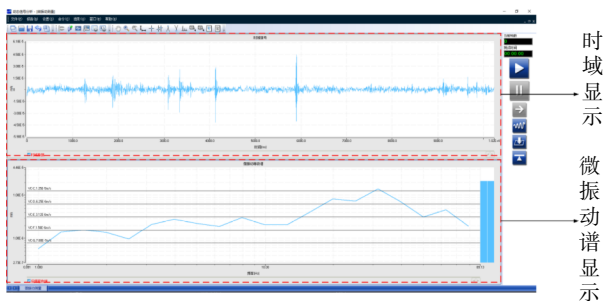


图 20 软件 UI 界面

Fig. 20 UI of the software



图 21 细化校正参数设置模块

Fig. 21 Parameter setting module for the refined calibration algorithm

测量场地附近有溪流、高铁、交通道路等,在园区内布置 A_i 至 C_i 测点以测量无隔振条件下的场地微振动;对于负一楼洁净室,其地面为隔振地基,布置测点 D_i 和 E_i ,测量结果如图 24~28 所示。

由图 24 可知,当高铁通过时,微振动主要集中在低频段,测点 A_i 振动速度峰值为 $290.4 \mu\text{m/s}$ 。测点 B_i 靠近马路,与高铁相比,公路交通带来的影响在中频段,微振动强度小,振动速度峰值为 $86.2 \mu\text{m/s}$ 。测点 C_i 距离马路较远,交通运输振动经土壤传播已

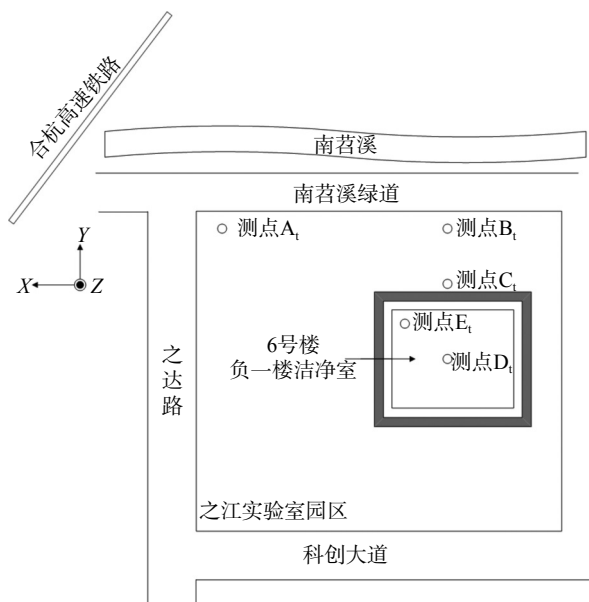


图 22 微振动测点布置

Fig. 22 Micro-vibration measurement point arrangement



图 23 测量现场及传感器安装

Fig. 23 Measurement site and sensor installation diagram

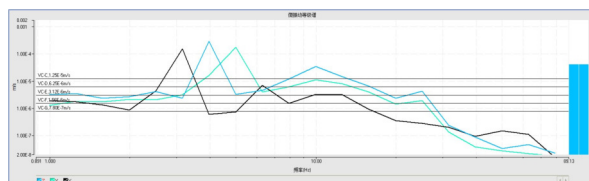


图 24 测点 A_i 三向微振动频谱

Fig. 24 Three-way micro-vibration spectrum at measurement point A_i

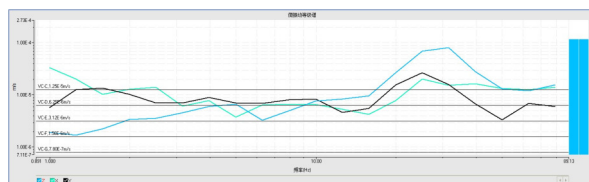


图 25 测点 B_i 三向微振动频谱

Fig. 25 Three-way micro-vibration spectrum at measurement point B_i

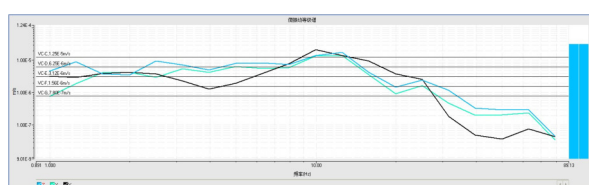
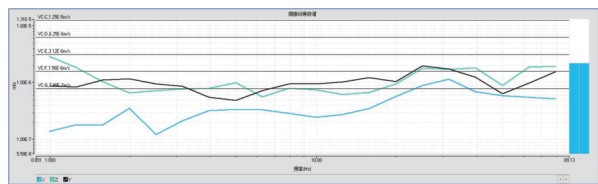
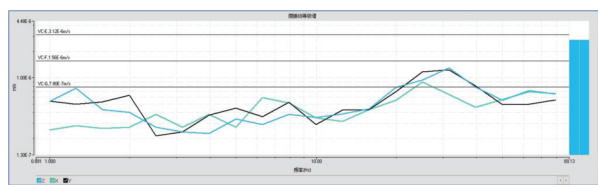


图 26 测点 C_i 三向微振动频谱

Fig. 26 Three-way micro-vibration spectrum at measurement point C_i

图 27 测点 D₁ 三向微振动频谱Fig. 27 Three-way micro-vibration spectrum at measurement point D₁图 28 测点 E₁ 三向微振动频谱Fig. 28 Three-way micro-vibration spectrum at measurement point E₁

大幅衰减,振动速度峰值为 $17.4 \mu\text{m/s}$,已达到 VC-B 等级。超洁净实验室地面采用隔振地基,在垂直方向上两测点可达到 VC-E 等级,水平方向达到 VC-F 等级,满足该精密仪器使用场地的要求,也验证了微振动测量与评估系统具备测量 VC-F 级微振动的能力。

4.3 系统稳定性测量实验

为了验证微振动测量与评估系统的稳定性,对测点 D₁ 进行 12 h 测量实验。取每一时段内微振动值进行比对,如图 29 所示。该系统在 12 h 以内测量结果稳定性好。

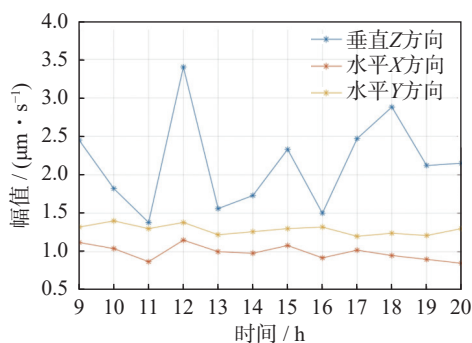


图 29 12 h 测量结果

Fig. 29 12 hours measurements

5 结论

通过对环境微振动测量和等级评估的研究得出以下结论:

(1) 针对倍频程分析中 FFT 方法的缺点,提出了 M-ZFFT 方法。通过仿真验证,该方法可使幅值误差减小,且能区分密集频率成分,与相同点数 FFT 相比

其计算量大幅减小,具有优异的性能;

(2) 采用 M-ZFFT 方法的分段倍频程分析,低频段频谱泄漏现象得到改善,幅值误差减小,分析精度提高;

(3) 基于分段倍频程分析方法研发了测量评估软件,采用 MI-7208 智能测量装置,建立微振动测量与评估系统。该系统本底噪声低,测量精度高,满足半导体精密设备、医学、光学等场地对微振动评估的要求;

(4) 采用微振动测量与评估系统对之江实验室超洁净室隔振地基进行振动测量,测量结果表明该实验室隔振地基微振动等级可达到 VC-E,满足精密仪器工作场地要求。

参考文献:

- [1] DENG X S, WU Y X. Simulation study on precision vibration reduction system for working stage of lithography[C]// Proceedings of 6th International Conference on Electronic Packaging Technology. Shenzhen: IEEE, 2006: 325-329.
- [2] GORDON C G. Generic criteria for vibration-sensitive equipment[C]// SPIE Proceedings Vol. 1619 Vibration Control in Microelectronics, Optics, and Metrology Meeting. San Jose, CA, USA: 1992.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 电子工业防微振工程技术规范: GB 51076—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Electronic industry anti-micro-vibration engineering technical specifications: GB 51076—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [4] ZAYTSEV G V, KHZMALYAN A D. A family of optimal window functions for spectral analysis with the spectrum side-lobe falloff rate multiple of 12 dB per octave[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2020, 65(5): 502-515.
- [5] BROWN J C, PUCKETTE M S. An efficient algorithm for the calculation of a constant Q transform[J]. Acoustical Society of America Journal, 1992, 92(5): 2698-2701.
- [6] 陈智锋, 张绍宗, 吕海宝, 等. 隔振设计在超精密加工与测量中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2002, 38(3): 10-13. CHEN Zhifeng, ZHANG Shaozong, LYU Haibao, et al. The application of design of vibration insulation in ultraprecision machining and measuring[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2002, 38(3): 10-13.
- [7] 毛育文, 涂亚庆, 肖玮, 等. 离散密集频谱细化分析与校正方法研究进展[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 112-119. MAO Yuwen, TU Yaqing, XIAO Wei, et al. Advances and trends of study on discrete intensive frequency spectrum zooming analysis and correction methodology[J]. Journal of Vibra-

- tion and Shock, 2012, 31(21): 112-119.
- [8] 丁康, 潘成灏, 李巍华. ZFFT 与 Chirp-Z 变换细化选带的频谱分析对比[J]. 振动与冲击, 2006, 25(6): 9-12.
DING Kang, PAN Chenghao, LI Weihua. Spectrum analysis comparison between ZFFT and Chirp-Z transform[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(6): 9-12.
- [9] DENG L L, LENG K J. Application of two spectrum refinement methods in frequency estimation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2290(1): 012070.
- [10] ZHOU J, LEI L H, LIU N J. Research on rough and detailed combination spectrum analysis of electromagnetic signals based on complex modulation ZoomFFT[C]//Proceedings of IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT). Xi'an: IEEE, 2019: 786-789.
- [11] 杨辉跃, 涂亚庆, 张海涛, 等. 离散频谱泄漏抑制方法研究进展[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(6): 1608-1613.
YANG Huiyue, TU Yaqing, ZHANG Haitao, et al. Review of methods for against spectrum leakage[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(6): 1608-1613.
- [12] 陶峰, 李志华, 罗知亮. 基于 LabVIEW 的离散频谱校正技术仿真[J]. 测控技术, 2015, 34(4): 153-156.
TAO Feng, LI Zhihua, LUO Zhiliang. Simulation of discrete spectrum correction based on LabVIEW[J]. Measurement & Control Technology, 2015, 34(4): 153-156.
- [13] WANG J L, YANG X F. Application of an improved discrete spectrum correction method in motor fault diagnosis[C]//Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE). IEEE, 2020: 880-883.
- [14] 贾桂红, 张建军, 郑海明. 基于离散频谱校正的差分吸收光谱数据处理方法研究[J]. 计量学报, 2021, 42(8): 1081-1086.
JIA Guihong, ZHANG Jianjun, ZHENG Haiming. Study on differential optical absorption spectroscopy data processing based on discrete spectrum correction[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(8): 1081-1086.
- [15] 周健, 黄华. 频谱细化及频谱校正技术在激光多普勒测速仪中的应用[J]. 激光与红外, 2010, 40(2): 144-151.
ZHOU Jian, HUANG Hua. Application of frequency spectrum refinement and correction technology in laser Doppler velocimeter[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(2): 144-151.
- [16] 胡广书. 数字信号处理 理论, 算法与实现 [M]. 第 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2023.
- [17] 丁康, 谢明, 杨志坚. 离散频谱分析校正理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电声学 倍频程和分数倍频程滤波器: GB/T 3241—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Electroacoustics-octave-band and fractional-octave-band filters: GB/T 3241—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [19] International Electrotechnical Commission. Electroacoustics—Octave-band and fractional-octave-band filters—Part 1: Specifications: IEC 61260-1[S]. London, UK: IEC, 2014.
- [20] 王晓忠, 余睿, 郭威, 等. 基于激光散斑的微振动探测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14): 62-73.
WANG Xiaozhong, YU Rui, GUO Wei, et al. Research progress in microvibration detection technology based on laser speckles[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(14): 62-73.
- [21] LI Z J, ZHEN S L, CHEN B, et al. Lissajous figures in the application of micro-vibration measurement[J]. Optics Communications, 2008, 281(18): 4744-4746.
- [22] 陈家键, 胡慧珠, 缪立军, 等. 双频激光干涉三自由度微振动测量系统[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1435-1443.
CHEN Jiajian, HU Huizhu, MIAO Lijun, et al. Three-degree-of-freedom micro-vibration measurement system based on dual-frequency laser interference[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(7): 1435-1443.
- [23] 邹宏, 王斌, 沈顺高, 等. 某高层建筑内精密仪器的微振动控制[J]. 工业建筑, 2007, 37(增刊 1): 302-305.
ZOU Hong, WANG Bin, SHEN Shungao, et al. Micro-vibration control of precise instruments in a high-rise building[J]. Industrial Construction, 2007, 37(Sup1): 302-305.

第一作者: 徐新云(1998—), 男, 硕士研究生。

E-mail: xxyun@zju.edu.cn

通信作者: 陈章位(1965—), 男, 博士, 教授。

E-mail: chenzw@zju.edu.cn