

绝对重力仪振动特性研究*

胡 若¹, 吴书清¹, 牟宗磊², 冯金扬¹, 牛学犇²

(1. 中国计量科学研究院 北京, 100029)

(2. 山东科技大学电气与自动化工程学院 青岛, 266590)

摘要 振动干扰是影响激光干涉绝对重力测量精度的主要因素, 基于经验模态分解(empirical mode decomposition, 简称 EMD) 和希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, 简称 HHT) 在分析瞬态类、非平稳时变信号方面的优势, 提出一种基于改进的集成经验模态分解-希尔伯特黄变换(modified ensemble empirical mode decomposition-HHT, 简称 MEEMD-HHT) 的绝对重力仪振动特性研究方法, 对实测信号进行自适应分解后, 从能量谱角度对振动数据进行了分析研究。实验结果表明, 该方法在有效抑制模态混叠的同时, 得到了不同频段的固有模态函数(intrinsic mode function, 简称 IMF), 信号重构误差为 10^{-15} 量级。通过 HHT 准确获取了振动各频段信号的能量分布情况, 其中: 0.1~5 Hz 频段能量占 86.95%; 5~20 Hz 频段能量占 8.78%; 其他频段能量相对较低。本研究成果为高精度减振装置的设计研发和提高绝对重力仪的测量精度奠定了基础。

关键词 振动干扰; 绝对重力测量; 改进的集成经验模态分解; 希尔伯特黄变换; 能量谱

中图分类号 TH762

引 言

高精度绝对重力场信息在地球科学研究、资源勘探、导航与制导等方面有着重要的意义, 目前主要依靠绝对重力仪进行当地重力场信息的直接测量^[1-3]。自由落体式绝对重力仪通过测量落体自由下落时相对于参考棱镜的位移和时间间隔, 数据拟合求解得到测点的重力加速度^[4]。在测量绝对重力值的过程中, 影响重力测量精度的地面振动主要分为环境噪声和仪器噪声两种。其中, 环境噪声的产生与测量时间和测量地点的坐标、地基以及周围环境密切相关, 可以通过频率进行区分: ①人类活动引起的噪声(频率一般大于 1 Hz); ②地脉动噪声(频率一般为 0.1~1 Hz); ③大气运动噪声(频率一般小于 0.1 Hz)^[5]。仪器噪声主要来自于落体上升、下降时电机以及传动机构产生的振动^[6]。如何进一步提高绝对重力仪的测量精度、减小振动因素干扰已经成为该领域的一个重要研究方向^[7-8]。

绝对重力仪的振动信号是极为复杂的非稳态时变信号, 传统的时域或频域分析方法很难精细化提取出振动的特征信息, 不利于振动特性分析以及后期的振动补偿和高精度减振装置的设计研发。Huang 等^[9]提出 EMD 是一种自适应分解方法, 可以将非平稳信号自适应分解为一系列具有不同物理意义的 IMF, 从

时频域对信号进行分析。EMD 方法虽然具有诸多优点, 在很多领域得到了广泛应用, 但存在的一个主要问题是模态混叠^[10]。为了解决模态混叠问题, 总体经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, 简称 EEMD) 和补充的总体经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition, 简称 CEEMD) 被相应提出^[11-12]。EEMD 通过向原始信号中多次加入不同的白噪声进行 EMD 分解, 将多次分解的结果进行平均运算后得到最终的 IMF。CEEMD 算法主要是通过向原始信号中成对添加两个相反方向的白噪声信号再进行 EMD 分解, CEEMD 在保证分解结果与 EEMD 相近的情况下, 减小了由原始信号噪声部分造成的重构误差, 但是计算量大, 如果添加白噪声幅值和迭代次数不合适, 会产生很多伪分量, 需要对 IMF 进行重新组合或者进一步处理^[13]。文献[14]提出了改进集总平均经验模态分解(modified ensemble empirical mode decomposition, 简称 MEEMD) 解决 EMD 分解过程中的模态混叠和 CEEMD 计算量过大等问题, 基于排列熵的随机性检测, 剔除分解过程中的异常信号, 但是分解过程中仍然可能存在虚假分量, 需要后续处理。HHT 是一种线性变换, 它强调信号的局部性质, 在处理非线性、非平稳性信号时具有更加直观的物理意义^[15]。

基于以上问题, 笔者重点开展了绝对重力仪振

* 国家质量基础共性技术研究与应用重点专项资助项目(2018YFF0212401); 中国计量科学研究院基本科研资助项目(22-AKY1608)

收稿日期: 2020-01-020; 修回日期: 2020-03-25

动特性的相关研究,并对MEEMD方法进行了改进,提出了一种基于改进MEEMD-HHT的绝对重力仪振动特性分析方法,对实测重力仪振动数据进行自适应分解后,从时频瞬时特征和能量谱特征等方面对振动数据进行了分析研究。

1 NIM-3A型绝对重力仪测量原理

基于自由落体原理的NIM-3A型绝对重力仪如图1所示。

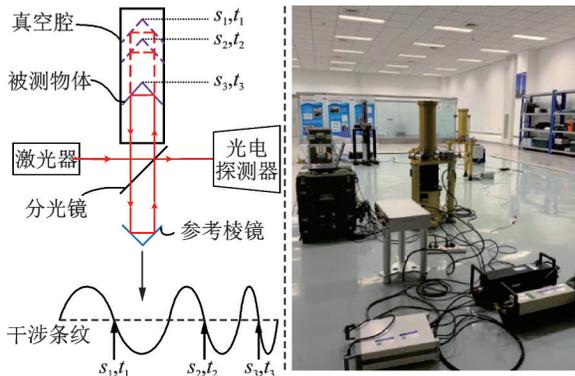


图1 NIM-3A型绝对重力仪
Fig.1 NIM-3A type absolute gravimeter

测量过程中,落体角锥棱镜在真空环境中自由下落,通过激光干涉仪测量其在下落过程中的距离 s ,用高精度时间间隔计数器测量对应的下落时间间隔 t ,通过数据拟合算法计算实测的距离 s_i 和时间间隔 t_i ($i=1, 2, \dots, n$),再通过固体潮、大气压、振动和极移等参数综合修正得到所测点的绝对重力值^[16]。其中,落体自由下落的距离通过激光干涉条纹数 N 乘以激光半波长 $\lambda/2$ 计算得到^[17]。通过检测干涉条纹过零点的时间,可得到干涉条纹每个过零点对应的时-位移坐标信息 (s_i, t_i) 。在实际测量过程中,重力场的梯度和光速有限性会对测量结果产生一定的影响,考虑到落体自由下落距离比较短,因此设定重力场梯度值在整个下落过程中为常量。对于光速有限性导致的条纹生成时间滞后于落体下落时间的问题,进行时间修正,则自由下落运动轨迹可表示为

$$s_i = s_0 + v_0 t_i' + \frac{g t_i'^2}{2} + \gamma \frac{s_0 t_i'^2}{2} + \gamma \frac{v_0 t_i'^3}{6} + \gamma \frac{g t_i'^4}{24} \quad (1)$$

其中: $t_i' = t_0 - (s_i - s_0)/c$ 为延迟时间; γ 为测量处的重力梯度值; c 为光速。

更进一步,式(1)可以写成如下矩阵形式

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_1' & t_1'^2 & t_1'^3 & t_1'^4 \\ 1 & t_2' & t_2'^2 & t_2'^3 & t_2'^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_n' & t_n'^2 & t_n'^3 & t_n'^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ v_0 \\ (g + s_0 \gamma)/2 \\ v_0 \gamma/6 \\ g \gamma/24 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)可以简化为

$$S = HP \quad (3)$$

利用最小二乘拟合算法可以得出

$$\hat{P}_{LS} = (H^T H)^{-1} H^T S \quad (4)$$

其中: S 为不同时刻落体位移组成的向量矩阵; H 为位移对应的时间间隔矩阵; \hat{P}_{LS} 为利用最小二乘法得到的最佳估计。

由此可以得到绝对重力的最佳估计值 \hat{g} ,该值为下落过程中初始点的绝对重力值。

通过以上几式可以看出,在绝对重力值测量时,除去干涉带提取信息算法的误差外,测量点的背景振动、落体伺服控制系统的振动是误差的主要来源,影响测量精度。因此,有效采集振动信息,对振动特性进行深入研究,了解振动各频段的能量分布情况,采取合适的隔振措施,对测量进行合理的振动补偿是提高绝对重力值测量精度的有效途径。

2 改进的MEEMD-HHT算法

2.1 改进的MEEMD算法

基于文献[18]中的研究,笔者所提的改进MEEMD算法自适应分解原始信号 $S(t)$ 步骤如下。

1) 在原始信号 $S(t)$ 中成对添加两组绝对值相等的正负白噪声信号 $\omega n_+(t)$ 和 $\omega n_-(t)$,分别对其进行集总平均次数相等的EEMD自适应分解可得

$$S(t) + \omega n_+(t) \xrightarrow{\text{EEMD}} \sum_{i=1}^m \left[\frac{\sum_{j=1}^n [d_{+,i,j}(t)]}{n} \right] + \sum_{j=1}^n p_{+,j}(t)/n = \sum_{i=1}^m \left[\overline{d_{+,i}(t)} \right] + \overline{p_+(t)} \quad (5)$$

$$S(t) + \omega n_-(t) \xrightarrow{\text{EEMD}} \sum_{i=1}^m \left[\frac{\sum_{j=1}^n [d_{-,i,j}(t)]}{n} \right] + \sum_{j=1}^n p_{-,j}(t)/n = \sum_{i=1}^m \left[\overline{d_{-,i}(t)} \right] + \overline{p_-(t)} \quad (6)$$

其中: $d_{+,i,j}(t)$ 为 $S(t)$ 中添加 $\omega n_+(t)$ 后第 j 次EEMD分解得到的第 i 个IMF分量; $p_{+,j}(t)$ 为 j 次EEMD分解得到的残差分量; $\overline{d_{+,i}(t)}$ 为EEMD最终分解得到的第 i 个IMF分量; $\overline{p_+(t)}$ 为最终得到的残差; $d_{-,i,j}(t)$ 为 $S(t)$ 中添加 $\omega n_-(t)$ 后第 j 次EEMD分解得到的第 i 个IMF分量; $p_{-,j}(t)$ 为 j 次EEMD分解得到的残差分量; $\overline{d_{-,i}(t)}$ 为EEMD最终分解得到的第 i 个IMF分量; $\overline{p_-(t)}$ 为最终得到的残差; $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

2) 将分解得到的两组IMF分量均值运算后,可极大地消除白噪声在信号中的残差

$$d_i(t) = 0.5(\overline{d_{+i}(t)} + \overline{d_{-i}(t)}) \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

3) 分解得到的 $d_i(t)$ 分量并不一定是标准的 IMF 分量, 可能是存在模态混叠问题的异常信号, 根据排列熵值^[19]和互相关系数判定信号是异常信号还是平稳信号。

4) 如果判断 $d_i(t)$ 是异常信号, 需要对这组分量继续进行 EMD 自适应分解, 剔除虚假信息以得到标准的 IMF 分量, 并消除模态混叠问题。以第 1 个 IMF 分量进行 EMD 自适应分解为例

$$d_1(t) \xrightarrow{\text{EMD}} c_1(t) + q_1(t) \quad (8)$$

$$[q_{k-1}(t) + d_k(t)] \xrightarrow{\text{EMD}} c_k(t) + q_k(t) \quad (9)$$

其中: $c_1(t)$ 为 $d_1(t)$ 经过 EMD 自适应分解得到的第 1 个标准 IMF 分量; $q_1(t)$ 为残差分量; $c_k(t)$ 为分解得到的第 k 个标准 IMF 分量; $q_k(t)$ 为对应的残差分量; $k=2, 3, \dots, m$ 。

5) 将得到的 IMF 分量按高频到低频依次排列, 则最终的改进 MEEMD 自适应分解可以表示为

$$S(t) \xrightarrow{\text{MEEMD}} \sum_{k=1}^m [c_k(t)] + r(t) \quad (10)$$

其中: $r(t)$ 为改进 MEEMD 自适应分解得到的最终残差分量。

通过改进 MEEMD 自适应分解得到的各 IMF 分量, 可以剔除绝对重力仪振动信号中的虚假分量, 得到振动信号在不同频段的时频分布规律。

2.2 基于 HHT 的能量谱特征参数提取

对 EMD 自适应分解得到的每个 IMF 分量进行 HHT 后, 原始信号可以表示为

$$X(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{i\phi_i(t)} = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{i \int \omega_i(t) dt} \quad (11)$$

式(11)中省略了残差 R , 把信号 $X(t)$ 用幅值与频率皆为时间函数 t 的 n 个分量之和来表示。同理, 信号 $X(t)$ 用 Fourier 级数可以表示为

$$X(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) e^{i\omega_i(t)} \quad (12)$$

其中: $a_i(t)$, $\omega_i(t)$ 为时间变量 t 的函数。

信号幅值在三维空间中既可以用时间-瞬时频率的函数来表示, 也可以用时间-频率平面上的等高线来表示, 时间-频率平面上的幅值分布即 Hilbert 时频谱^[20], 其表达式为

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{i\omega_i(t)} \quad (13)$$

$H(\omega, t)$ 对时间 t 积分运算后得到 Hilbert 边际谱 $h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt = \sum_{i=1}^n \int_0^T \text{Re} \left(a_i(t) e^{i \int \omega_i(t) dt} \right) dt \quad (14)$

在频域范围内对 $H(\omega, t)$ 的平方积分运算后得到 Hilbert 瞬时能量谱^[21]为

$$IE(t) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} H^2(\omega, t) d\omega \quad (15)$$

瞬时能量可以表述信号能量随时间的变化规律, 而在时域内 $H(\omega, t)$ 的平方对时间 t 积分运算得到 Hilbert 能量谱

$$ES(\omega) = \int_0^T H^2(\omega, t) dt \quad (16)$$

通过 Hilbert 能量谱可以求出绝对重力仪振动信号各个频段在整个时间长度内所积累的能量, 可以得到不同频段的能量分布规律。

3 算法仿真分析与应用

为了验证所提算法的有效性和先进性, 既接近真实的信号特性又不失一般性, 笔者通过多种特性信号组合成的模拟信号来对 CEEMD 和改进的 MEEMD 两种算法的性能进行对比分析。采用的模拟信号 $X_1 \sim X_3$ 及其组合而成的合成信号如图 2 所示。其中: X_1 是频率为 30 Hz 的正弦周期信号, 用来模拟信号中的周期主频部分; X_2 是频率为 8 Hz 的调幅信号, 用来模拟信号中不同幅值、不同频段的有效信息; X_3 为间歇信号, 用来模拟实测信号中的突变部分, 合成信号 $\text{Signal} = X_1 + X_2 + X_3$ 。

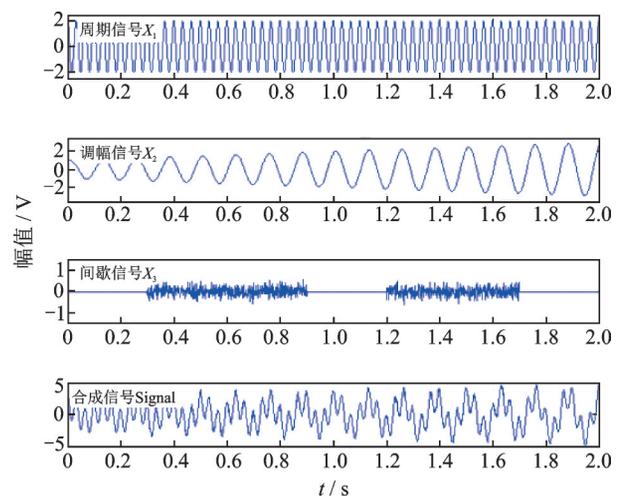


图2 模拟信号及其合成信号

Fig.2 The simulation signal and its synthesis signal

添加 30 对正负白噪声, 噪声幅值为原始信号标准差 (standard deviation, 简称 SD) 的 0.2 倍, 集总平均次数为 200 次, 两种算法自适应分解结果如图 3、图 4 所示。

通过图 3、图 4 的对比分析可以看出:

1) 由于间歇信号的影响, CEEMD 分解得到的高频 $\text{IMF}_1, \text{IMF}_2, \text{IMF}_3$ 分量中含有明显的模态混叠现象和端点效应, 同时分解过程中出现了很多虚假分量, 高频 IMF 部分未能把间歇信号很好地剔除出

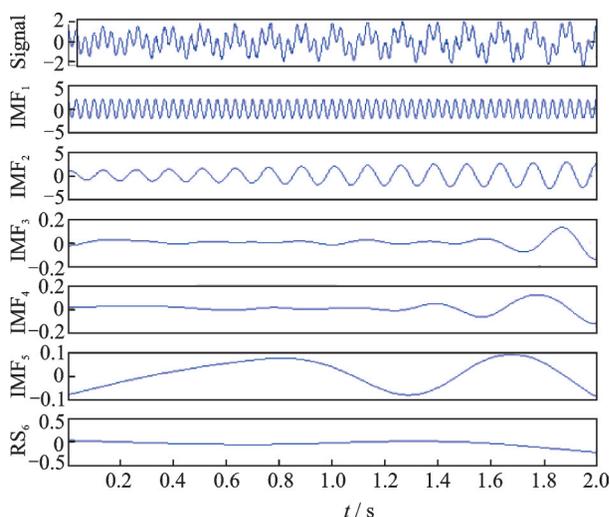


图3 改进的MEEMD自适应分解结果

Fig.3 The decomposition results of improved MEEMD

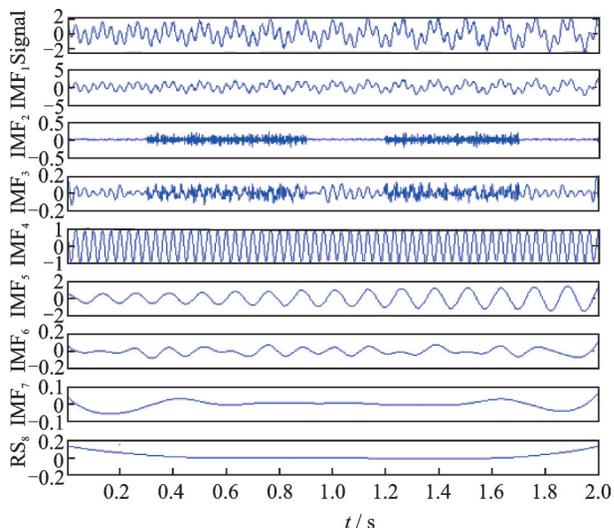


图4 CEEMD自适应分解结果

Fig.4 The decomposition results of CEEMD

去,因此在分解含有间歇信号、脉冲信号这样的瞬态信号过程中,CEEMD分解很难得到正确的IMF分量。

2) 在采用同样噪声幅值的白噪声信号和同样的集总平均次数下,改进的MEEMD剔除了信号中的间歇性噪声信号,准确得到了有效的IMF,抑制了模态混叠、端点效应和噪声残留的问题,更适用于含有间歇类噪声的非线性、非平稳性瞬态类信号的自适应分解。

4 实测信号分析与应用

为了验证改进的MEEMD-HHT算法在绝对重力仪振动特性分析中的实际应用效果,用本研究方法对实测的振动数据进行了分析研究。实验在中国计量科学院昌平基地重力比对实验室进行,实验平

台采用基于激光干涉法的NIM-3A型绝对重力仪,主要由激光干涉仪、自由落体装置、数据采集装置、拾振器和测控终端组成,如图5所示。其中,拾振器位于绝对重力仪正下方,与激光干涉仪直接相连,与重力仪主机部分相对独立。

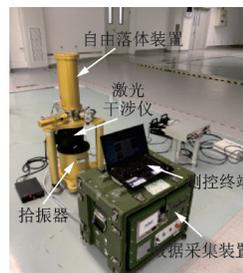
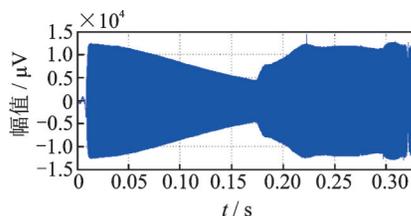


图5 硬件实验平台

Fig.5 The hardware experiment platform

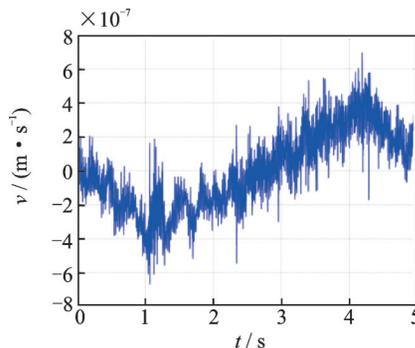
实验过程中激光干涉条纹信号和振动数据同步采集,其中:激光干涉条纹由PXI-5124采集,带宽为150 MHz,采样频率为200 MHz,AD量化位数为12-Bit;振动数据由VSE-311M拾振器同步获取,采样频率为500 Hz,带宽为0.03~70 Hz,分辨率为 $5 \times 10^{-8} g$ 。根据信号特性和采样定理的相关分析,选用的实验平台满足系统测试需求。

相同实验条件下,共进行了6组实验,每组实验做20次自由落体运动。实验结束后,随机抽取了一次实验的激光干涉条纹信号和对应的振动信号如图6所示,其中图6(a)为激光干涉条纹信号,图6(b)为重力仪振动信号。



(a) 激光干涉条纹信号

(a) The laser interference fringes



(b) 振动信号

(b) The vibration signal

图6 激光干涉条纹信号和振动信号

Fig.6 The laser interference fringes and vibration signal

在绝对重力仪的测试过程中,激光干涉条纹信息和振动数据同步采集,对应交点时刻落体上的时间-位移坐标受到的振动是线性相关的,本次实验对应重力加速度 g 的拟合残差如图 7 所示。

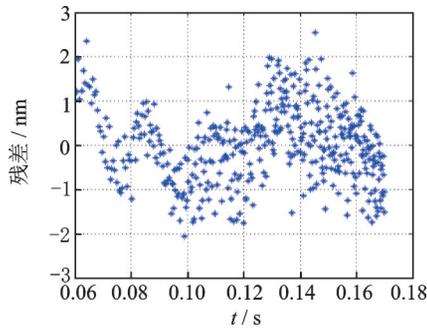


图 7 拟合残差

Fig.7 The fitting residual error

从图 6、图 7 的分析可以看出,测量过程中的振动噪声导致重力加速度 g 的拟合过程中存在残差,幅值范围在 ± 3 nm 以内。

为了更好地研究环境噪声和仪器噪声引入的振动误差问题,在重力仪不工作的状态下,通过拾震器采集了 3 组实验室环境下的地面振动,采样频率为 500 Hz,采样时间为 4.5 s,结合重力仪工作时的振动数据,进行了对比分析。其中,重力仪不工作时的 3 组地面振动数据如图 8(a) 所示,随机抽取重力仪工作时的 3 组振动数据如图 8(b) 所示。

通过图 8(a,b) 两幅图的对比分析可以看出:重力仪不工作时,拾震器采集的 3 组振动数据具有一定的周期性和规律性,振动幅值较小,变化平稳;重力仪工作时振动信号的前半段(电机未启动、落体未运动时),振动较平缓;1.26 s 左右电机启动、落体开始运动时,振动明显加强。

鉴于排列熵^[22]算法可以验证时间序列的复杂程度,在此引入排列熵来验证以上 6 组振动信号的复杂性。经过计算得到重力仪不工作时 3 组振动数据的排列熵分别为 0.667 3, 0.673 6 和 0.660 3,而重力仪工作时 3 组振动数据的排列熵分别为 0.851 6, 0.844 8 和 0.854 8,可见由于仪器振动的加入,排列熵值明显增大。综上,测量过程中的仪器噪声加剧了振动对于测量精度的影响,在进行隔振系统设计时需要关注仪器的振动噪声和周围环境的振动噪声。

分别采用 CEEMD 和改进的 MEEMD 对图 6 选取的振动信号进行了自适应分解,限于篇幅,只列出 MEEMD 的分解结果如图 9 所示。其中,CEEMD 和 MEEMD 中添加的噪声幅值和对数分别为 0.2 和 100。

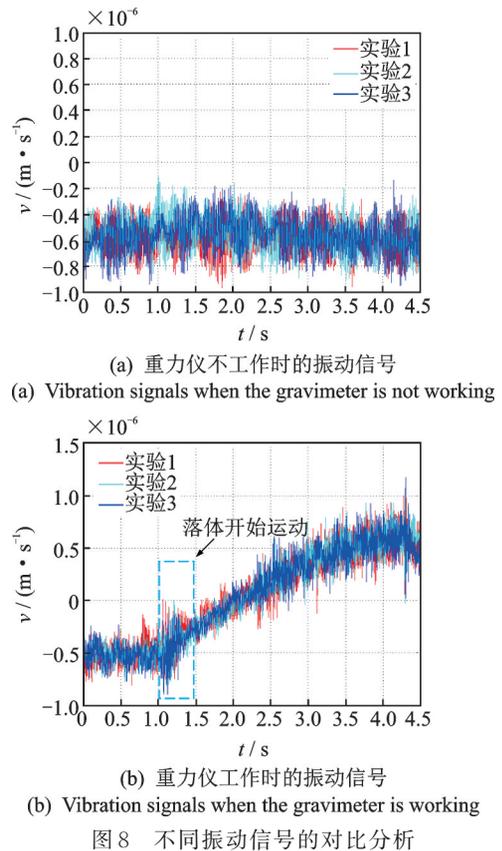


图 8 不同振动信号的对比分析

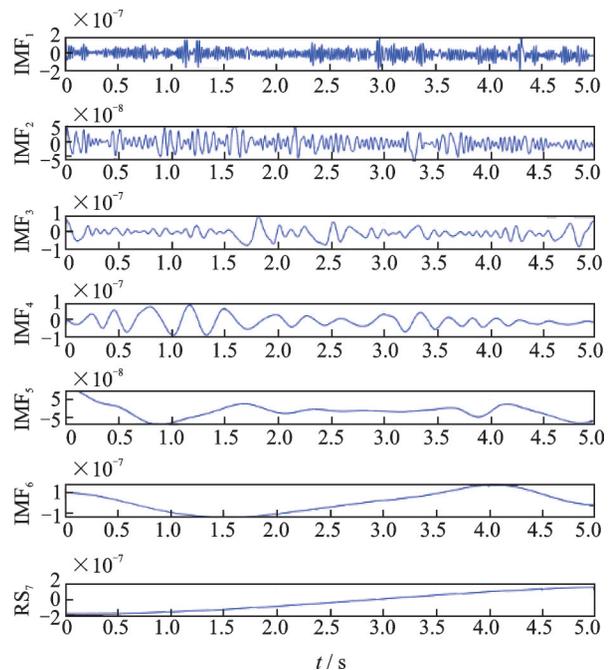


图 9 改进 MEEMD 自适应分解实测振动信号结果

Fig.9 The results of vibration signal decomposed by improved MEEMD

对自适应分解得到的各 IMF 进行 HHT 变换后,所得希尔伯特-黄谱如图 10 所示,其中右边的彩条代表信号的能量分布情况,颜色越深,能量越大,反之则越小。

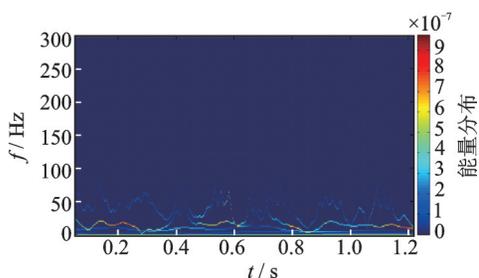


图 10 希尔伯特-黄谱

Fig.10 The Hilbert-Huang spectrum

通过图 9、图 10 的分析可以看出:改进的 MEEMD-HHT 对实测信号自适应分解后得到 6 个 IMF (IMF₁~IMF₆) 和 1 个余项 R₇, 分解的分量个数较为合理, 信号频率较低, 幅值较小。从希尔伯特-黄谱时频特性分析可以看出, 信号主要集中在 70 Hz 以内, 大部分为低频信号。

鉴于振动特性与各频段的能量分布密切相关, 振动在某频段内的能量越大, 对自振频率在相同频段内仪器的振动影响越强。为了更加直观地观测所测振动信号各频段内能量的高低分布情况, 在此将频率划分为多个频段后, 用能量直方图展现各频段内的能量分布, 如图 11 所示。

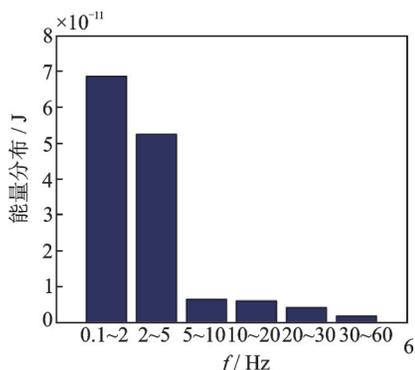


图 11 各频段的能量分布

Fig.11 Energy distribution in each frequency band

为了研究能量分布的规律性, 对以上 6 组实验的数据进行归一化处理, 从每组实验中随机抽取 1 次实验中的振动数据, 用改进的 MEEMD-HHT 算法自适应分解后, 提取各 IMF 的能量谱如图 12 所示。

通过图 11、图 12 的分析可以看出: 重力仪的振动特性具有较好地复现性和一致性, 能量谱可以很好地展现出各个频段的能量分布; 振动噪声主要由低频段的地脉动噪声 (0.1~5 Hz) 和部分高频段的自振噪声组成, 幅值较小; 振动噪声的能量主要集中在低频段 (IMF₄~IMF₆), 衰减速度快, 高频段的能量较小, 而衰减速度相对较慢。因此, 设计在超低频段具有更好隔振效果的隔振装置以克服地面振动的影响, 研究系统自振产生的原因并消除系统自振的

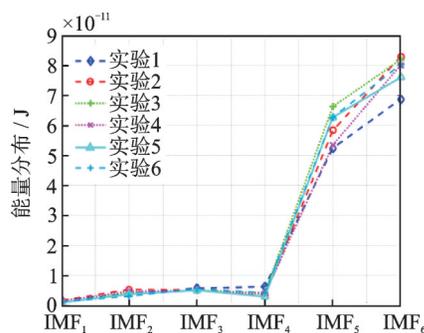


图 12 各 IMF 的能量谱

Fig.12 Energy spectrum of the IMFs

影响, 是提高绝对重力仪测量精度的有效手段。

5 结束语

在自由落体式激光干涉绝对重力仪的测量过程中, 参考棱镜在背景振动和系统自振的作用下呈现复杂的振动特性, 影响绝对重力仪的测量精度。笔者在借鉴现有技术的基础上, 对绝对重力仪的振动特性进行了分析研究, 提出了一种基于改进 MEEMD-HHT 的绝对重力仪振动特性分析方法。通过模拟仿真信号验证了该方法在自适应分解瞬态类、非平稳信号方面的优势, 有效抑制模态混叠的同时还能剔除无效的 IMF 分量, 信号重构误差为 10⁻¹⁵ 量级, 实现了分解结果的准确性。采用改进的 MEEMD 算法对实测绝对重力仪振动数据进行自适应分解, 选取有效 IMF 后, 进行 HHT 变换, 得到了各频段振动信号的时频特征和能量谱特征, 0.1~20 Hz 低频段能量占比 95.73%, 从能量的角度对振动特性进行了分析研究。本研究成果对进一步提高绝对重力仪的测量精度, 以及更高精度的隔振系统的设计研发具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 吴琼, 郝晓光, 滕云田, 等. 系统自振对绝对重力仪的影响模式分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(8):980-983.
WU Qiong, HAO Xiaoguang, TENG Yuntian, et al. Influence mode analysis of self vibration on absolute gravimeter[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(8):980-983. (in Chinese)
- [2] WILLIAMS S D P, BAKER T F, JEFFRIES G. Absolute gravity measurements at UK tide gauges[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(12):2317-2320.
- [3] 胡华, 伍康, 申磊, 等. 新型高精度绝对重力仪[J]. 物理学报, 2012, 61(9):544-551.
HU Hua, WU Kang, SHEN Lei, et al. A new high precision absolute gravimeter[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9):544-551. (in Chinese)
- [4] 冯金扬, 李春剑, 粟多武, 等. 绝对重力仪的发展现状

- 及重力计量体系介绍[J]. 导航与控制, 2015, 14(2): 10-16.
- FENG Jinyang, LI Chunjian, SU Duowu, et al. Development of absolute gravimeter and introduction on gravimetry metrological system [J]. Navigation and Control, 2015, 14(2):10-16. (in Chinese)
- [5] 要佳敏, 伍康. 绝对重力仪隔振系统发展综述[J]. 导航与控制, 2019(3):14-26.
- YAO Jiamin, WU Kang. Review on the development of vibration isolators for absolute gravimeter[J]. Navigation and Control, 2019(3):14-26. (in Chinese)
- [6] 熊振宇. 用于绝对重力仪的激光干涉振动测量可行性研究[D]. 合肥:国防科学技术大学, 2016.
- [7] 王观, 胡华, 伍康, 等. 基于两级摆杆结构的超低频垂直隔振系统[J]. 物理学报, 2016, 65(20):44-50.
- WANG Guan, HU Hua, WU Kang, et al. Ultra-low-frequency vertical vibration isolator based on a two-stage beam structure [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(20):44-50. (in Chinese)
- [8] 张兵, 滕云田, 邢丽莉, 等. 激光干涉绝对重力仪参考棱镜隔振系统仿真[J]. 地球物理学报, 2017, 60(11): 4221-4230.
- ZHANG Bing, TENG Yuntian, XING Lili, et al. The simulation of reference corner cube vibration isolation system of laser interference absolute gravimeter [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(11): 4221-4230. (in Chinese)
- [9] HUANG N E, ZHENG S, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971):903-995.
- [10] 王凤利, 邢辉, 段树林, 等. OEEMD 与 Teager 能量算子结合的轴承故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 87-91.
- WANG Fengli, XING Hui, DUAN Shulin, et al. Fault diagnosis of bearing combining OEEMD with teager energy operator demodulation [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 87-91. (in Chinese)
- [11] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [12] YEH J R, SHIEH J S, HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: a novel noise enhanced data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(2):135-156.
- [13] 郑旭, 郝志勇, 卢兆刚, 等. 基于 MEEMD 的内燃机机体活塞敲击激励与燃烧爆发激励分离研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(6): 109-113.
- ZHENG Xu, HAO Zhiyong, LU Zhaogang, et al. Separation of piston-slap and combustion shock excitations via MEEMD method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(6):109-113. (in Chinese)
- [14] 郑近德, 程军圣, 杨宇. 改进的 EEMD 算法及其应用研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(21):21-26, 46.
- ZHENG Jinde, CHENG Junsheng, YANG Yu. Modified EEMD algorithm and its applications [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(21):21-26, 46. (in Chinese)
- [15] 张建伟, 侯鸽, 华薇薇, 等. 基于 VMD-HHT 边际谱的水工结构损伤诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(4): 852-858.
- ZHANG Jianwei, HOU Ge, HUA Weiwei, et al. Damage diagnosis of hydraulic structure based on VMD and HHT marginal spectrum [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(4): 852-858. (in Chinese)
- [16] 王启宇, 冯金扬, 李春剑, 等. 面向绝对重力仪的光束垂直性快速调节[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1):1-7.
- WANG Qiyu, FENG Jinyang, LI Chunjian, et al. Fast alignment of beam verticality for absolute gravimeters [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(1):1-7. (in Chinese)
- [17] 钱锦, 伍康, 王力军. 事件时间测量系统及其在绝对重力仪中的应用[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(4):50-56.
- QIAN Jin, WU Kang, WANG Lijun. Event-time measurement system and its application in absolute gravimeters [J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(4):50-56. (in Chinese)
- [18] HUANG N E. Review of empirical mode decomposition [J]. Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, 2001, 4391:71-80.
- [19] BANDT C, POMPE B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series [J]. Physical Review Letters, 2002, 88(17):174102.
- [20] HUANG N E, WU M L, QU W, et al. Applications of Hilbert-Huang transform to non-stationary financial time series analysis [J]. Applied Stochastic Models in Business & Industry, 2010, 19(3):245-268.
- [21] CHENG J, YU D, TANG J, et al. Application of frequency family separation method based upon EMD and local Hilbert energy spectrum method to gear fault diagnosis [J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(6):712-723.
- [22] TIAN Y, WANG Z, LU C. Self-adaptive bearing fault diagnosis based on permutation entropy and manifold-based dynamic time warping [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 114: 658-673.



第一作者简介:胡若,男,1988年1月生,博士、助理研究员。主要研究方向为重力精密测量技术、信号采集及信号处理技术。曾发表《Effects of fuel temperature on injection performance of an EUP system》(《Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering》2019, No. 2)等论文。

E-mail: huruo@nim.ac.cn

通信作者简介:吴书清,男,1979年8月出生,硕士、副研究员。主要研究方向为重力精密测量技术。

E-mail: wushq@nim.ac.cn