

基于HHT的复合扰动环境中 结构基本自振周期优化识别

许言¹, 李永强^{1,2}, 周仰新¹, 刘旭锋¹, 彭聪¹, 姬雪明¹

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 南昌市应急管理局, 江西 南昌 330038)

摘要: 基于希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, 简称HHT)方法探索了在风、人为振动及传感器误差等复合干扰及低信噪比条件下脉动信号中与结构本质特征关联频率的优化提取和分析方法。以南昌市某小区临街12层住宅楼为分析对象,在干扰信号较多的白天进行结构脉动信号实测,测试表明,在拾振器所在层有非天然振动干扰时,波形的平稳度及频谱特征改变对后续分析产生了显著影响。在未处理干扰信号、基线偏移等的前提下,分别应用FFT、R/F谱比、HHT 3种方法提取结构基本自振周期,并进行分析效果对比,结果表明,HHT方法展现出良好的信号频率提取能力,同时可以通过余项表达信号基线漂移的误差,优化了建筑结构基本自振周期识别方法,拓展了脉动法使用范围,为规模化结构健康监测预警提供了有效参照。

关键词: 基本自振周期;脉动法;HHT;FFT;经验模态分解

中图分类号: TU311.3; O327

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)06-0531-07

Optimization and identification of basic natural vibration periods of structures in complex disturbance environment based on HHT

XU Yan¹, LI Yongqiang^{1,2}, ZHOU Yangxin¹, LIU Xufeng¹, PENG Cong¹, JI Xueming¹

(1. School of Civil and Architecture Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Nanchang Emergency Management Bureau, Nanchang 330038, China)

Abstract: Based on the Hilbert-Huang transform (HHT) method, the optimal extraction and analysis were explored of the frequency associated with the essential features of the structure in the pulsating signal under the combined interference of wind, artificial vibration and sensor error and the condition of low signal-to-noise ratio (SNR). Taking a 12-story residential building facing a street in Nanchang as the analysis object, the structure pulsation signal was measured during the day when there were more interference signals. Test results show that when there is unnatural vibration interference on the floor where the vibration collector is located, the change of waveform smoothness and that of spectrum characteristics have a significant impact on the subsequent analysis. On the premise that the interference signal and baseline deviation were not processed, three methods of FFT, R/F spectrum ratio and HHT were used to extract the basic natural vibration period of the structure, and the analysis results were compared. Research results show that the HHT method exhibits good signal frequency extraction ability. At the same time, the error of signal baseline drift could be expressed through the remaining terms. The basic natural vibration frequency identification method of building structures is optimized, the application range of pulsation method is expanded, and an effective reference for large-scale structural health monitoring and early warning is provided.

Keywords: basic natural vibration period; pulsation method; HHT; FFT; empirical mode decomposition

收稿日期:2023-11-01

基金项目:江西省自然科学基金项目(20202BABL204064);江西省“双千计划”项目(DHSQT32022006/JXSQ2020101041);国家自然科学基金项目(52068002)

第一作者简介:许言(1997—),女,河南济源人,硕士研究生,研究方向:结构健康监测及AI识别等。

通信作者:李永强(1983—),男,河南济源人,副研究员,博士,研究方向:岩土地震工程与波动数值模拟等。

我国城镇建设中积累了大量旧建筑,潜在的安全风险日益严峻且多样化。面大量广的工程设施亟需进行高效、可靠的健康监测,结构的基本自振周期是实用可靠的选择之一。工程结构振动(地震、风振等)破坏控制及优化与加固设计中,基本自振周期的准确、快速及自动识别是分析的关键和难点之一,该研究也可为结构健康状态的判别提供依据。

由于测试环境不可控,测试过程中很难避免强迫激励或人为振动,甚至测试系统本身零漂或震荡等对结构自振特性测试信号的干扰,导致脉动法采集到的脉动信号信噪比低,从而影响后续数据分析的准确性。为了获得更准确的测试结果,提升分析效率,诸多学者一直在探索高效可靠的数据处理方法。相关分析方法主要有工程振动领域常用的快速傅里叶变换(FFT)法、用于场地卓越频率研究的单点 H/V 谱比法、用于分析结构固有频率的顶层/首层傅里叶频谱比^[1](R/F 谱比法)等,以及对信号进行经验模态分解后再分析的希尔伯特-黄变换(HHT)^[2]。在实际工作中,赵岩等^[3]针对移动随机载荷作用下桥梁结构非平稳随机振动问题,建立了一种基于频域分析的虚拟激励-傅里叶变换方法(PEM-FFT)。吴琛等^[4]从数字方法的角度论述了 HHT 的理论进展与工程应用。杨佑发等^[5]基于 HHT 方法实现了对两类长周期地震动的特殊长周期成分的提取。何定桥等^[6]提出了一种基于 HHT 的结构模态自动识别方法。丁新余等^[7]利用 HHT 方法研究了隧道爆破作用下建筑物的振动响应规律。李传金等^[8]对存在人为振动干扰的场地脉动信号,应用 HHT 方法进行经验模态分解,由原始数据减去 IMF 分量后差值的频谱峰值判别卓越周期。

综上,结合建筑结构形态特征,本文选取 FFT、R/F 谱比及 HHT 方法对建筑结构脉动信号快速处理与分析,并将分析结果进行对比,以探讨各方法的优势与局限性,为结构抗震设防及防灾减灾自动化、智能化提供参考。

1 HHT 基本原理

HHT 方法是由 Norden E. Huang 等^[9]于 1998 年提出的,后来又对其进行了改进^[2]。这种方法核心思想是将时间序列资料通过经验模态分解(empirical mode decomposition,简称 EMD)成数

个本征模态函数(intrinsic mode function,简称 IMF),然后利用 Hilbert 变换构造解析信号,得出资料的瞬时频率和振幅,进而得到 Hilbert 谱。

1.1 经验模态分解(EMD)

设 $x(t)$ 代表需要分解的信号,找出 $x(t)$ 上所有极值点,用 3 次样条曲线连接各极大值点形成 $x(t)$ 的上包络线 $x_{\max}(t)$,同理得到由各极小值点形成的 $x(t)$ 下包络线 $x_{\min}(t)$ 。

从而得到首个瞬时平均值 $m_1(t)$:

$$m_1(t) = \frac{x_{\max}(t) + x_{\min}(t)}{2} \quad (1)$$

用待分解的信号 $x(t)$ 减去首个瞬时平均值 $m_1(t)$,得到第一个去掉低频的新数列 $h_1(t)$ ^[2]:

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (2)$$

若 $h_1(t)$ 满足两个条件:(1)极值点数目和过零点数目相等或最多相差 1 个;(2)在任意点,由局部极大值点和局部极小值点构成的两条包络线平均值为 0。则为本征模态函数,记作 C_1 ;若不满足,将 $h_1(t)$ 作为待分解的信号重复上述步骤,直到经过 k 次筛选后的结果 $h_k(t)$ 满足(1)(2)两个条件,得到第一个本征模态函数 $h_k(t)$ 记作 C_1 。随后,将 C_1 从 $x(t)$ 中分离出来,得到余量 r_1 ^[9]:

$$x(t) - C_1 = r_1 \quad (3)$$

将余量 r_1 作为新的待分解信号重复上述筛选过程,得到第二个本征模态函数 C_2 。直到余量 r_n 变成单调函数或常数,再也没有本征模态函数解析出为止。经过 EMD 处理,可以从 $x(t)$ 中分离出 n 个本征模态函数分量(C_1, C_2, \dots, C_n)和一个趋势项或常数 r_n ^[9],即:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r_n(t) \quad (4)$$

1.2 Hilbert 变换

对任意一个时间函数 $x(t)$,其 Hilbert 变换 $y(t)$ ^[2] 定义为:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} PV \int \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

其中, PV 为柯西主值。则对应于 $x(t)$ 的解析信号 $z(t)$ 为:

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (6)$$

其中, $a(t)$ 称为信号 $x(t)$ 的瞬时振幅; $\theta(t)$ 称为信号的瞬时相位^[9]:

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (7)$$

$$\theta(t) = \arctan \left[\frac{y(t)}{x(t)} \right] \quad (8)$$

由瞬时相位可以得到信号的瞬时频率 $\omega(t)$ ^[9]:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (9)$$

对原始信号的每一阶 IMF 进行 Hilbert 变换后,原始信号可以表达成^[2]:

$$x(t) = R \left\{ \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt} \right\} \quad (10)$$

其中, R 为函数实部。此外,原始信号 $x(t)$ 的表达式中,已经去除了 r_n ,因为 r_n 是一个单调函数或常数。

根据式(10),将信号 $x(t)$ 表示在一个三维图中,在联合的时间-频率平面上,将瞬时振幅 $a_j(t)$ 的轮廓画出来。信号 $x(t)$ 的这种时频表示即为其 Hilbert 谱, $H(t, \omega)$ 定义为:

$$H(t, \omega) = \begin{cases} a(t) & \omega = \omega_j(t) \\ 0 & \omega \neq \omega_j(t) \end{cases} \quad (11)$$

如果将 $H(t, \omega)$ 对时间积分,就可以得到 Hilbert 边际谱 $h(\omega)$ ^[9]。边际谱提供了对于每个频率总振幅的量测,表达了在整个时间长度内累积的振幅。

$$h(\omega) = \int_0^T H(t, \omega) dt \quad (12)$$

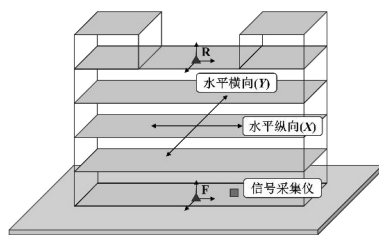
2 结构脉动测试与分析方法

2.1 结构脉动测试

选取南昌市某临街小区结构类型简单的 12 层住宅楼观测脉动信号。测试中检波器采用 891-II 型拾震器,信号采集使用 DH5922N 动态信号测试分析系统。

测试时间特定选择为干扰显著的白天,在建筑内设置 2 个测点,分别在建筑首层(F)、顶层(R)。每个测点 3 个正交方向均布设拾振器,分别观测建筑结构水平纵向(X)、水平横向(Y)及竖直方向(Z)的加速度成分。信号采集仪放置于建筑首层,与拾振器通过缆线连接,采样频率为 200 Hz,单次测试时间保证 10 min 以上,仪器的布置如图 1 所示。

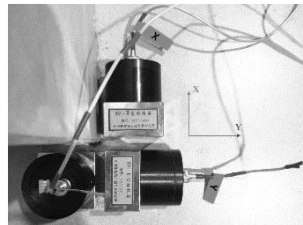
拾振器布置在结构平面刚度中心处的主要承重构件附近,用于保证接收到的信号以平移振动信号为主,尽量减少扭转振动信号。F 与 R 监测点保持在一条铅垂线上,F、R 监测点的水平纵横向与建筑结构水平纵横向一致。



(a) 测点布置



(b) 现场设备连接方式



(c) 拾振器布设示意图

图 1 仪器布置位置和方式

Fig.1 Position and mode of instrument layout

2.2 结构脉动数据分析方法

2.2.1 FFT 功率谱计算

对测量得到的时域数据截取相同的时间长度,加矩形窗,应用 FFT 分别求出顶层(R)结构水平纵向(X)、水平横向(Y)的傅里叶变换功率谱 $P_{RX}(\omega)$ 、 $P_{RY}(\omega)$ 。

2.2.2 基于 FFT 的 R/F 谱比

对测量得到的时域数据截取相同的时间长度,加矩形窗,应用 FFT 分别求出首层(F)和顶层(R)结构水平纵向(X)、水平横向(Y)的傅里叶变换功率谱 $P_{FX}(\omega)$ 、 $P_{FY}(\omega)$ 、 $P_{RX}(\omega)$ 、 $P_{RY}(\omega)$ 。分别计算 X 和 Y 方向的结构顶层和首层的傅里叶频谱比,即:

$$\frac{H_{RX}}{H_{FX}} = \sqrt{\frac{P_{RX}(\omega)}{P_{FX}(\omega)}} \quad (13)$$

$$\frac{H_{RY}}{H_{FY}} = \sqrt{\frac{P_{RY}(\omega)}{P_{FY}(\omega)}} \quad (14)$$

FFT 和基于 FFT 的 R/F 谱比都是从图中读取第一个峰值对应的频率 f ,其倒数为结构基本自振周期 T 。

2.2.3 HHT 数据处理

HHT 包括 EMD 分解和 Hilbert 变换。使用 EMD 将顶层(R)实测数据分解为 IMF 分量,IMF 分量由结构自振响应及外荷载引起的强迫振动响应两部分构成。对 IMF 分量进行 Hilbert 变换,进而对其积分求得边际谱。

3 实测数据处理与分析

以 12 层住宅楼的顶层 (R) 水平横向 (Y) 数据分析为例,其加速度响应时程如图 2 所示。受初始分析认为无效的低频波形的影响,信号有向上浮动的趋势,产生了基线漂移。若不消除基线漂移,进行 FFT 分析时,会误把趋势项当作采集的原始信号,造成畸变,导致低频部分出现尖峰,甚至淹没主频成分,从而严重影响数据分析的准确性,图 3 为对顶层 (R) 实测数据未消除基线漂移直接进行 FFT 后的图像,由图 3(a) 0~100 Hz 的频率分布可看出,频谱图中有多个主峰,且能量

分布较分散。图 3(b) 为 0~10 Hz 的频率分布,0 Hz 附近出现尖峰,为结构基本自振周期自动分析及后续使用带来了不确定性。

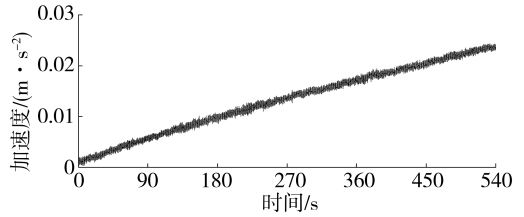


图 2 顶层 (R) 水平横向 (Y) 的加速度响应时程
Fig.2 Acceleration response time history of the top layer (R) horizontally (Y)

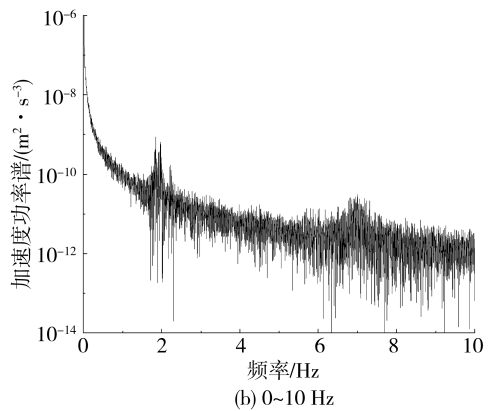
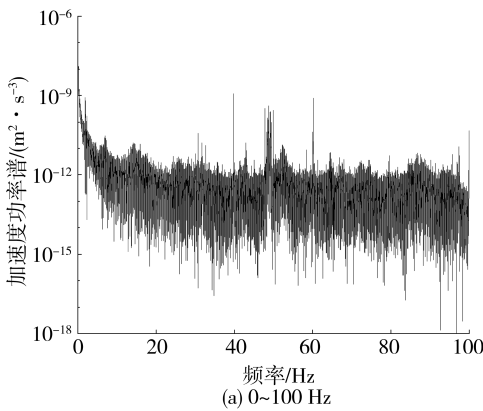


图 3 顶层 (R) 水平横向 (Y) 的 FFT 功率谱

Fig.3 FFT power spectrum of the top layer (R) horizontally (Y)

通过上述方法可得到首层 (F) 水平横向 (Y) 实测结构脉动数据的 FFT 后的功率谱,再按照式 (14) 得到该结构 Y 方向的 R/F 谱比。图 4 为首层 (F) 水平横向 (Y) 的 FFT 功率谱,图 5 为顶层 (R) 与首层 (F) 水平横向 (Y) 的功率谱比。

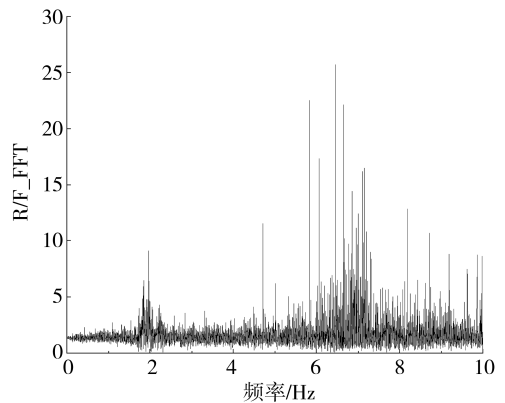
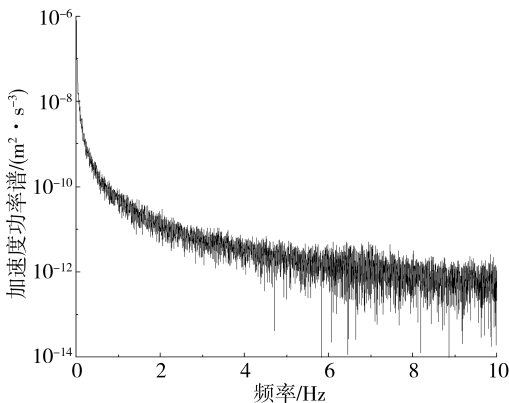


图 5 顶层 (R) 与首层 (F) 水平横向 (Y) 的功率谱比
Fig.5 Power spectrum ratio of the top layer (R) and the first layer (F) horizontally (Y)

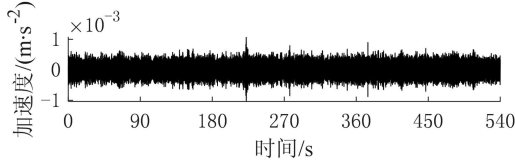
由图 5 可见,基线漂移有较好改善,主峰相较于图 3(b) 更加凸显,显示结构的第 1 阶频率在 1.5~2.5 Hz 之间。由于谱比的原因,图 5 中在 6.5 Hz 处有一个明显的谱比增强带,而实际上由图 3 (b) 可知其反应要显著低于“第一个峰值”处的功

图 4 首层 (F) 水平横向 (Y) 的 FFT 功率谱
Fig.4 FFT power spectrum of the first layer (F) horizontally (Y)

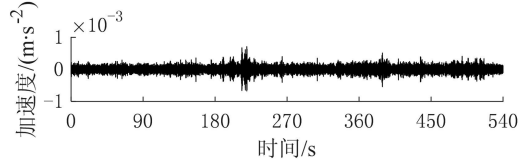
率谱值,因而,谱比法为自动识别和后处理带来了新的干扰。

对原数据进行 EMD 分解,得到 10 个 IMF 分量及余项,图 6 展示了顶层(R)水平横向(Y)测试数据的前 5 个 IMF 分量及一个余项。所有分量的

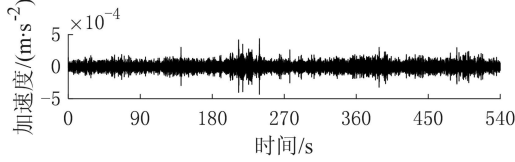
Hilbert 谱如图 7 所示,Hilbert 变换后得到的幅值-频率-时间三维分布如图 8 所示,能量越高颜色越亮,实测信号中,非结构固有的高频信号能量显著,值得注意的是,在图 7 中 2 Hz 附近依然存在较为明显的频率条带,为结构固有的低频率成分。



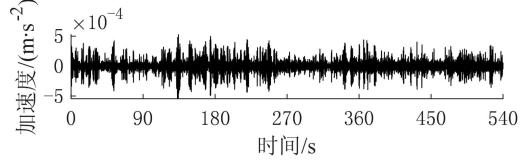
(a)顶层水平横向第 1 个 IMF 分量



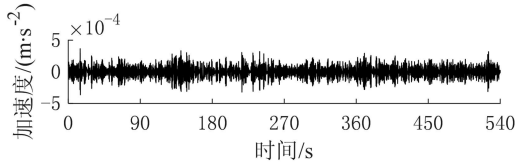
(b)顶层水平横向第 2 个 IMF 分量



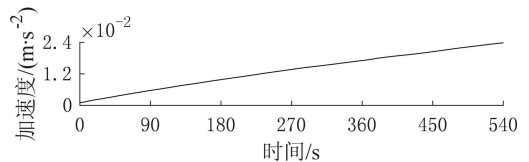
(c)顶层水平横向第 3 个 IMF 分量



(d)顶层水平横向第 4 个 IMF 分量



(e)顶层水平横向第 5 个 IMF 分量



(f)顶层水平横向余项

图 6 EMD 后的前 5 个 IMF 分量和余项

Fig.6 The first 5 IMF components and remaining items after EMD

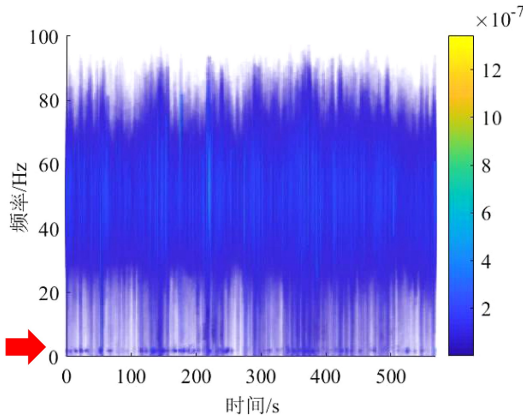


图 7 所有分量的 Hilbert 谱

Fig.7 Hilbert spectra of all components

对各 IMF 分量 FFT 分析后,得到各分量频谱图,图 9 展示了前 5 个 IMF 分量经 FFT 后的频谱图。可以看出,各图像中主峰突出,且能量较为集中,先分解出高频部分,然后频率依次降低。排除 IMF 各分量中非结构固有的高频部分,结合结构第 1 阶固有频率相对范围,IMF4 所对应的 FFT 图像更加清晰地展示了该结构水平横向频谱图中第一个峰值为 1.85 Hz。EMD 分解出分量后,进行

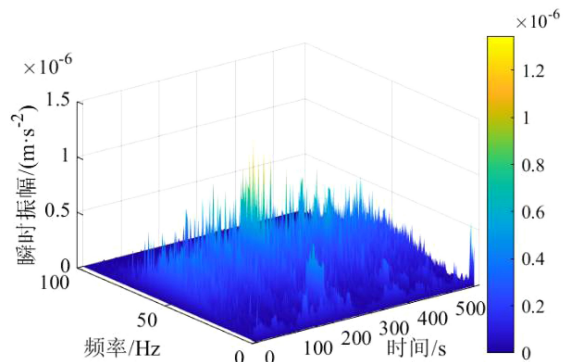


图 8 Hilbert 变换后得到的幅值-频率-时间三维分布

Fig.8 Three-dimensional distribution of amplitude-frequency-time obtained after Hilbert transformation

识别和选取,从建筑结构基本自振周期范围,选择出更精确的结果。

对分解出来的 IMF4 信号经 Hilbert 变换后得到了幅值-频率-时间的函数关系,由式(12)得到了 IMF4 的边际谱如图 10 黑线所示。同时,图 10 中给出了基于 FFT 的 R/F 谱比结果,为方便对比,已将两者进行归一化处理。在未处理噪声的前提下,两种方法都表现出了良好的波峰形态,且

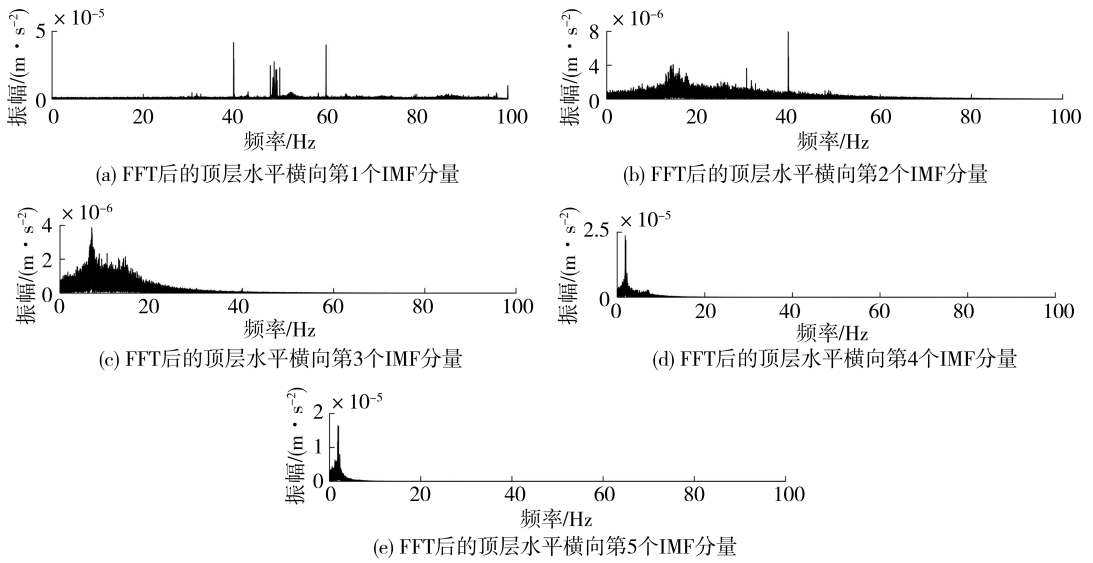


图 9 前 5 个 IMF 分量 FFT 后的频谱图

Fig.9 Spectrum diagram after FFT of the first 5 IMF components

两者的第一个主峰对应的频率基本一致。由于 IMF4 是经过 EMD 分解得到的信号分量,故其峰值单一清晰更易判别,而基于 FFT 的 R/F 谱比的频率分布中,4~10 Hz 部分仍有比较显著的多个信号频率,若为固有频率较高的低层建筑,可能会出现频率混淆的情况,造成不易识别的困扰。此外,HHT 方法仅需建筑结构顶层的脉动信号即可进行分析,相较于需要同时实测两个测点的 R/F 谱比方法,其不需要用更长的缆线连接设备并部署更多的拾振器,更加省时省力,对重要结构持续观测具备良好的经济性。

对该小区共计 7 栋建筑分别实测 3 次,从时域脉动数据中截取相同的时间长度,利用 FFT、R/F 谱比、HHT 3 种方法,获取结构基本自振周期,最后取 3 次测试结果的平均值,得到表 1 所示的结果。由表 1 可见,3 种方法得到的建筑结构自振周期基本一致。在读取的难易程度上,R/F 谱

比方法有时会让信号较强的频率峰值显著放大,会让“第一个峰值”淹没于众多峰值中,反而难以识别,HHT 发挥比较稳定,优于其他两种方法。

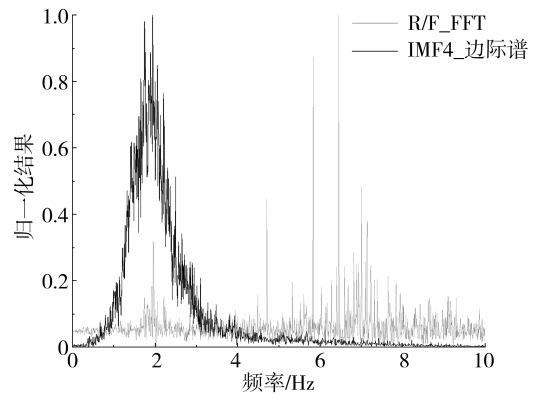


图 10 归一化后的 R/F 谱比计算结果和 IMF4 的边际谱计算结果

Fig.10 Normalized R/F spectral ratio calculation results and IMF4 marginal spectrum calculation results

表 1 3 种分析方法计算结果对比

Tab.1 Comparison of calculation results of three analytical methods

建筑编号	地上层数	水平纵向			水平横向		
		FFT	R/F 谱比	HHT	FFT	R/F 谱比	HHT
NC0011	18	0.656 5	0.669 2	0.656 5	0.845 0	0.844 7	0.845 0
NC0012	18	0.661 2	0.662 0	0.661 5	0.845 6	0.857 3	0.845 6
NC0013	12	0.446 7	0.448 8	0.447 0	0.541 3	0.541 3	0.541 3
NC0014	12	0.447 8	0.437 3	0.446 4	0.543 8	0.544 3	0.543 9

续表

建筑编号	地上层数	水平纵向			水平横向		
		FFT	R/F 谱比	HHT	FFT	R/F 谱比	HHT
NC0015	18	0.770 3	0.766 2	0.765 5	1.067 8	1.044 6	1.067 8
NC0016	18	0.790 2	0.769 4	0.790 1	1.073 9	1.051 2	1.073 9
NC0017	18	0.763 2	0.768 8	0.763 2	1.069 5	1.048 2	1.064 4

4 结论

1) 由于住宅在白天会存在较强的人为振动干扰,结构脉动信号的功率谱存在多个峰值,能量分散,主峰不明显,高频处具有较高的能量,结构基本自振周期难以识别。

2) R/F 谱比法基于成熟的 FFT 理论,可以在一定程度上改善信号的基线漂移,继而获取建筑结构基本自振周期,具有一定的研究意义。但其需要用更长的缆线连接设备,实现两个测点同时测量的要求,尤其是对于高层或者超高层建筑的测量多有不便。

3) EMD 可将富含干扰信号分解为若干个不同的本征模态函数(IMF)和一个余项。其中各个不同的本征模态函数反映了信号的局部特性,残余量反映了信号的趋势或均值。EMD 通过“筛选”的方法把残余量分离出来,明显改善因基线漂移造成的波形畸变。

4) 利用 EMD 从原始信号中获取若干个信号分量,然后通过 Hilbert 变换和积分获得边际谱,或者直接对各信号分量进行 FFT 获得功率谱,从这两种图谱中都能获得较好结果。HHT 方法显著提高了实测效率和分析的准确性,适用于建筑结构基本自振周期快速、大规模和自动化识别。

参考文献:

- [1] 那仁满都拉,格根塔娜,于欣冉,等. 基于常时微动观测的城市建筑物共振效应评价及地震安全韧性提升研究[J]. 灾害学,2023,38(3):68-74.
- [2] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417-457.
- [3] 赵岩,周瑞鹏,贾甜. 移动随机荷载作用下梁桥非平稳随机振动的 PEM-FFT 方法[J]. 计算力学学报,2019,36(1):65-70.
- [4] 吴琛,项洪,杜喜朋,等. 数值方法进展:从 Fourier 变换到 Hilbert-Huang 变换[J]. 福建工程学院学报,2015,13(6):511-519.
- [5] 杨佑发,向双龙,金鸿慎. 隔震框架结构长周期地震动响应与损伤机理[J]. 铁道工程学报,2023,40(5):88-95.
- [6] 何定桥,杨军. 基于 HHT 的结构模态参数自动化识别方法和试验验证[J]. 工程力学,2022,39(11):109-122.
- [7] 丁新宇,王海亮,李延民,等. 隧道爆破作用下建筑物振动响应分析:以青岛地铁四线大断面隧道为例[J]. 科学技术与工程,2021,21(35):15215-15221.
- [8] 李传金,渐翔,王强,等. Hilbert-Huang 变换在地脉动卓越周期计算中的应用[J]. 地球物理学进展,2021,36(4):1688-1693.
- [9] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971):903-995.

(责任编辑:陈雯)