

基于经验模态分解法的桥梁应变信号降噪方法研究

张 晖 鲁明明 丁华平 沈庆宏

(南京大学电子科学与工程学院 南京 210023)

摘 要: 针对桥梁应变信号的特点,提出了一种基于经验模态分解法的降噪方法。当信号中噪声分布在某些特定频段且与信号混叠时,现有的降噪方法如小波阈值法无法很好地对其进行处理。本文在对桥梁应变信号进行经验模态分解的基础上,具体分析分解后的本征模函数分量,对含噪较大的本征模函数分量进行特定的阈值滤波处理,并将处理后的本征模函数分量与含噪较小的本征模函数分量以及残余分量进行信号重构,得到降噪后的桥梁应变信号。将此方法用于实际测得的数据,实验结果表明,其能在保留原始信号特征的前提下,消除桥梁应变信号中的噪声,从而达到降噪的目的。

关键词: 经验模态分解;降噪;桥梁应变

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research of de-noising method of bridge strain signal based on empirical mode decomposition method

Zhang Hui Lu Mingming Ding Huaping Shen Qinghong

(School of Electronic Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: This paper proposes a de-noising method for bridge strain signal based on empirical mode decomposition. When the noise appears in some certain frequency and blends with signal, the existing de-noising method such as wavelet threshold filtering method can not work well in this regard. This paper carries on empirical mode decomposition method for actual bridge strain signal and then picks out intrinsic mode functions which contain much noise. For these IMFs we carry on specific threshold filtering process method. After this, we use remaining IMFs, processed IMFs and the residual component to reconstruct the signal. The result shows that, this method can eliminate noise of bridge strain signal under the premise of preserving features of original signal.

Keywords: empirical mode decomposition; de-noise; bridge strain signal

1 引 言

在桥梁结构健康监测中,获得桥梁关键部件的应变数据,并对其进行分析是一个重要的途径。而现有的基于传感器采集得到的应变数据总是不可避免地包含大量的噪声,如果不对其进行降噪处理,则很可能导致我们后续分析得到的结论不可靠,从而造成重大的安全隐患^[1]。因此在对原始应变信号进行分析之前,需要选择适当的方式对其进行降噪处理。

最基本的降噪方法基于傅里叶变换,将原始信号从时域转换到频域进行分析,以频率来界定信号与噪声,当信号与噪声在频域可分时,通过设计合适的滤波器,以频域滤波的方式将噪声消除。杜艺等^[2]提出了一种基于傅里叶变换

的降噪方法,对图像中的条带噪声的去除有着较好的效果。但基于傅里叶变换的降噪法有着其先天性的不足,其无法对噪声与信号混叠的原始信号进行处理,于是便诞生了小波降噪法。小波变换不仅在频域对信号进行分解,且有良好的局部性,于是在信号处理领域得到了广泛的应用。姜州等^[3]提出了一种改进的小波阈值滤波法处理具有瞬时较大波动信号;高天等^[4]提出了一种基于超声缺陷回波分析的小波降噪方法用来对信号进行降噪。但是分析实际桥梁应变信号后发现,桥梁应变信号通常具有显著的非平稳性^[5],其频率构成非常复杂,而且噪声与信号在频率并不具有显著的可区分性,通常在高频成分,噪声较多且与信号混叠,而在低频成分,噪声则相对比较少。如果我们直接使用频域滤波或小波滤波对其进行处理,则很可能在滤除噪

声的同时将有用信号一起滤除,从而损失信号的原始特征。所以在处理桥梁应变信号的时候,傅里叶变换法与小波降噪法是行不通的。

经验模态分解法将原始信号按照不同频率的波动趋势逐渐分解开来,产生一系列具有不同特征尺度的序列称为本征模函数。各本征模函数分量也就相应地包含了原始信号从高到低频率段的成分,每一个频率段所包含的本征模函数分量都是不同的,且随原始信号本身的变化而变化。HaeKyungJung 提出了一种基于经验模态分解法的降噪方法来消除无线心电监护信号中的运动伪影^[6],采用直接舍弃对应频域的 IMF 分量实现;李振兴等人提出一种基于经验模态分解与小波阈值的降噪法来对信号进行降噪处理^[7-14]。但是上述方法在处理桥梁应变信号时,总是无法完美的去除原始信号中的噪声,基于此本文提出一种改进的基于经验模态分解的降噪方法来处理桥梁应变信号,将原始采集到的应变信号通过经验模态分解得到一系列的本征模函数分量,然后对含噪较大的本征模函数分量进行特别设计的阈值滤波,再将其与含噪较小的本征模函数分量以及残余分量进行信号重构,从而达到降低桥梁应变信号噪声目的,并用实际测得的青马大桥箱梁内某结点的应变数据进行了计算验证。

2 经验模态分解简介

2.1 经验模态分解介绍

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)是 Hilbert-Huang 变换(HHT)的核心算法,由中国台湾海洋学家黄锬提出^[15]。经验模态分解算法的目的在于将非平稳、非线性的信号分解成一组稳态和线性的数据序列集,即本征模函数(intrinsic mode function, IMF)。IMF 有以下两个性质:1)信号的极值点数目和过零点数目相等或最多相差一个;2)由局部极大值构成的上包络线和由局部极小值构成的下包络线的平均值为 0。通过经验模态分解,原始信号被分解成一组频率从高到低的 IMF 分量以及残余分量。

2.2 经验模态分解法过程

经验模态分解主要分为以下几个步骤:首先找出原始信号 $X(t)$ 的所有极大值点和极小值点,并用 3 次样条函数对极大值点和极小值点进行拟合,得到原始信号的上包络线 $u_1(t)$ 和下包络线 $d_1(t)$,对 $u_1(t)$ 与 $d_1(t)$ 求均值得到 $a_1(t)$,用原始信号 $X(t)$ 减去 $a_1(t)$ 就可以得到 1 个除去低频的新信号 $m_1(t)$,即 $m_1(t) = X(t) - a_1(t)$ 。这时候得到的 $m_1(t)$ 一般不符合 IMF 的要求,为此需要对它重复上述过程,直到得到的 $m_n(t)$ 符合 IMF 的要求,这样就得到了第 1 个本征模函数分量 $c_1(t)$,它表示信号最高频率的成分。在得到第一个 IMF 分量后,紧接着用 $X(t)$ 减去 $c_1(t)$,得到 1 个不含高频成分的新信号 $r_1(t)$;对 $r_1(t)$ 重复进行上述操作,得到第 2 个本征模函数分量 $c_2(t)$ 。如此重复直到最后

1 个数据序列 $r_n(t)$ 不可被分解,这个不可被分解的数据序列 $r_n(t)$ 为残余分量,代表原始信号 $X(t)$ 的趋势或均值。原始信号 $X(t)$ 经过经验模态分解后得到:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

由上述描述可知经验模态分解就是求出原始信号在不同频段分布的过程,由式(1)可知原始信号可以表示为本征模函数分量 $c_i(t)$ 与 1 个残余分量 $r_n(t)$ 的在时域的累加,如图 1 所示,本征模函数的数量视具体信号而定。

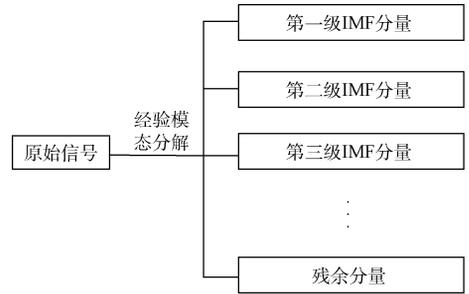


图 1 经验模态分解

3 基于经验模态分解的降噪法

经验模态分解目前最常见的应用是结合希尔伯特谱分析对信号做希尔伯特黄变换,进行时频分析。其将信号分解为从高到低不同频率段的 IMF 分量,对各频率段的 IMF 分量进行具体分析。如果噪声与信号在频域没有混叠,则通过经验模态分解之后,噪声与信号将出现在不同的 IMF 分量中,这时可以直接舍弃噪声部分频段的 IMF 分量,将信号部分频段的 IMF 分量与残余分量进行信号重构以达到对原始信号降噪的目的。但是对于桥梁应变信号,噪声常常与信号在频域没有明显界限,此时对原始信号进行经验模态分解之后,噪声与信号在 IMF 分量会发生混叠,因此无法直接利用舍弃某些频段的 IMF 分量以达到降噪的目的。

这种情况下可以借鉴类似小波变换中的阈值去噪方法,对那些噪声与信号混叠的 IMF 分量作阈值滤波,再将滤波得到的 IMF 分量与没有经过阈值滤波的 IMF 分量以及残余分量进行信号重构,从而达到原始信号降噪的目的。其流程一般如图 2 所示。

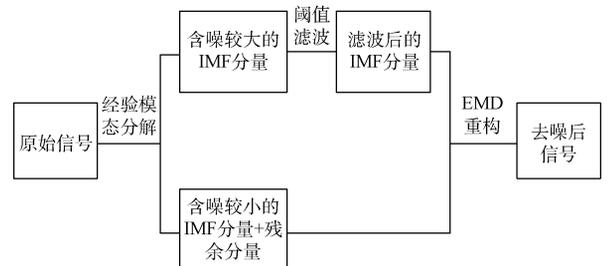


图 2 基于经验模态分解的阈值滤波流程

具体步骤如下所述,原始信号经过经验模态分解后,可以表示为:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (2)$$

假设噪声与信号混叠在最高频率段的 IMF 分量,即 $c_n(t)$ 。鉴于 IMF 分量的极值点数目和过零点数目相等或至多相差 1 个以及由局部极大值构成的上包络和由局部极大值构成的下包络线平均值为零的性质,以对 $c_n(t)$ 进行如公式(3)所示的阈值滤波:

$$\tilde{c}_n(t) = \begin{cases} c_n(t) - ThrValue_n, & \text{if } c_n(t) \geq average + ThrValue_n \\ average, & \text{if } |c_n(t)| < average + ThrValue_n \\ c_n(t) + ThrValue_n, & \text{if } c_n(t) \leq average - ThrValue_n \end{cases}$$

式中: $average$ 为各个 IMF 分量的平均值, $ThrValue$ 为各个 IMF 分量对应的阈值,其由式(4)计算得出:

$$ThrValue = \sqrt{var} \times 2\log(L) \quad (4)$$

式中: var 为各级 IMF 分量的方差, L 为各级 IMF 分量的长度。对噪声与信号混叠的 IMF 分量 $c_n(t)$ 进行阈值处理得 $\tilde{c}_n(t)$, 将滤波后的 IMF 分量 $\tilde{c}_n(t)$ 与未经滤波的 IMF 分量 $c_1(t) \sim c_{n-1}(t)$ 以及残余分量 $r_n(t)$ 进行信号重构即可获得降噪后的信号。

一般在处理桥梁应变信号时只需对前几个 IMF 分量进行阈值滤波处理,因为桥梁应变信号中,噪声通常只分布在频率比较高的几个 IMF 分量中,在频率低的 IMF 分量以及残余分量重,噪声一般很低,所以无需对其进行阈值滤波处理,具体需要进行处理的 IMF 分量数目需要根据实际数据进一步分析确定。

4 实际数据验证

本文以 Python 为工具,对青马大桥箱梁内某结点一段时间内的应变信号进行了分析,使用上文提出的基于经验模态分解的阈值滤波法进行降噪,结果表明该方法在桥梁应变信号的降噪处理中是十分有效的。

4.1 原始数据分析

桥梁应变原始信号如图 3 所示。

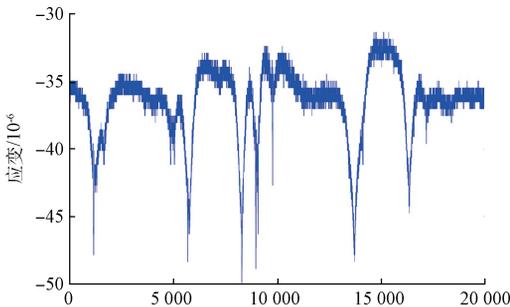


图 3 青马大桥箱梁应变原始信号

由图 3 可以看出采集到的原始应变信号含有较大的噪声,甚至在某些时刻,噪声会淹没信号的原始特征,如果直

接采用原始信号进行桥梁结构健康分析,得到的结论将会是非常不可靠的。所以在利用原始信号进行桥梁结构健康分析之前,对其进行降噪处理是极其必要的。

4.2 经验模态分解获得 IMF 分量

对原始应变信号进行经验模态分解之后的结果如图 4 所示。

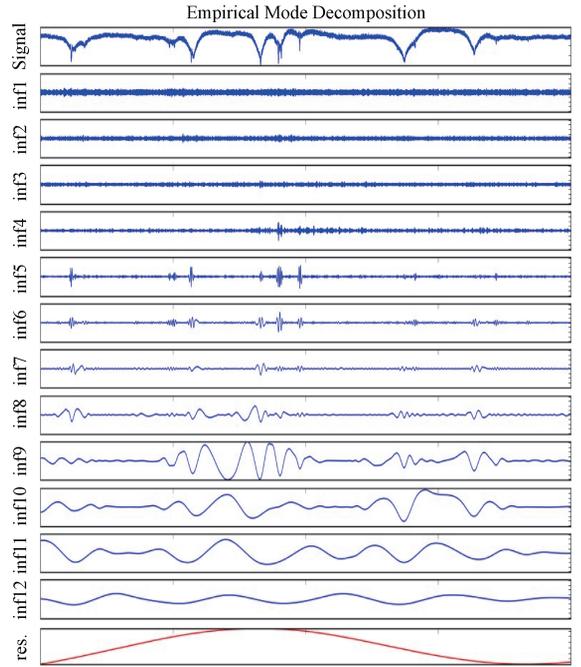


图 4 原始信号经验模态分解后的 IMF 分量以及残余分量

由图 4 可以看出,原信号经过经验模态分解处理之后得到 12 个 IMF 分量以及 1 个残余分量,且前 6 级 IMF 分量中,噪声十分明显,而在后 6 级 IMF 分量中,噪声几乎为 0。因此只需要对前 6 级 IMF 分量进行阈值滤波处理,就可以实现对原始应变信号降噪的目的。

4.3 阈值滤波处理

对前 6 级 IMF 分量做如式(3)所示的阈值滤波,其原始信号和阈值滤波处理后的结果如图 5 所示。

图 5(a)为原信号通过经验模态分解后所得到的 1~6 级 IMF 分量,(b)为经过阈值滤波之后的 1~6 级 IMF 分量。可以很明显地看出通过式(3)对前 6 级 IMF 分量进行阈值滤波之后,IMF 分量中的噪声基本被滤去,并且各级 IMF 分量完整的保留了原始信号的 IMF 分量的基本特征。

4.4 信号重构

将经过阈值滤波得到的前 6 级 IMF 分量与原始信号的后 6 级 IMF 分量以及残余分量进行信号重构,其原始信号波形和降噪后的信号波形如图 6 所示。

图 6(a)为桥梁应变原始信号,(b)为降噪处理后的应变信号。对比(a)和(b)可以看出桥梁应变原始信号所含的

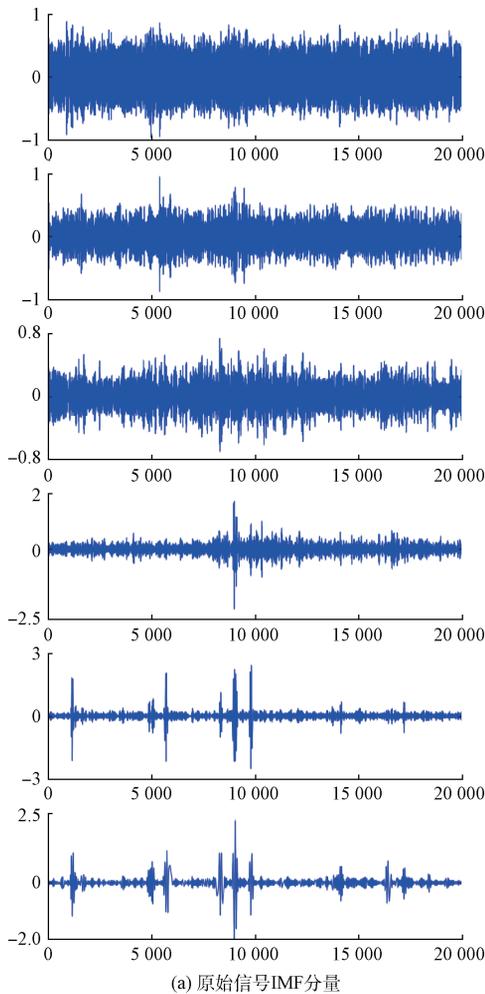


图 5 原始信号及经过阈值滤波后的 1~6 级 IMF 分量

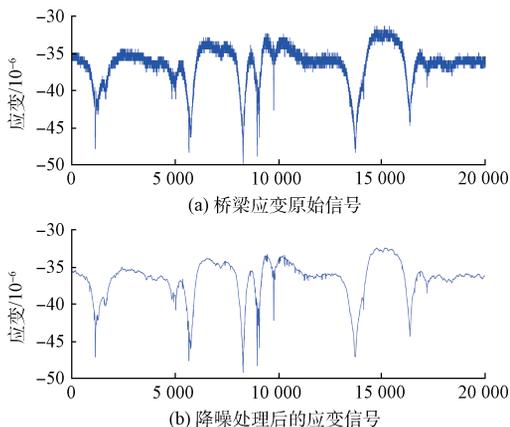


图 6 原始信号波形与降噪后信号波形

方法在处理桥梁应变信号中达到了保留原始信号基本特征并降低噪声的预期目标。

5 结 论

针对桥梁应变信号的特性,提出了先将原始信号进行经验模态分解,对含噪较大的 IMF 分量进行特定的阈值滤波,再把滤波后的 IMF 分量与不含噪声或含噪声较小的 IMF 分量以及残余分量进行信号重构的滤波方法,从而解决了桥梁应变信号降噪的问题。实验结果表明,该方法在处理类似桥梁应变信号降噪问题的时候是一种有效且便利的方法,为接下来桥梁健康监测中使用应变信号做进一步分析和分析消除了很多不确定因素,保证了桥梁健康监测的可靠性。

参考文献

- [1] 唐浩,谭川,陈果. 桥梁健康监测数据分析研究综述[J]. 公路交通技术, 2014, 10(5):99-104.
- [2] 杜艺,刘文国,葛帅. 基于傅里叶变换的条带噪声去除方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(8):165-167.
- [3] 姜洲,丁华平,沈庆宏. 具有瞬时较大波动的信号降噪方法研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(3): 116-119.
- [4] 高天,陈怀玉,曹丽. 一种基于超声缺陷回波分析的小波降噪方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(增刊): 73-79.
- [5] 范哲,冯新,周晶. 基于分布式应变监测的大跨度斜拉桥结构损伤探测[J]. 防灾减灾工程学报, 2014(1):46-50.
- [6] HAEKYUNGJUNG, NOH Y, JEONG D. A design of EMD-based filter to remove motion artifacts in wireless eeg monitoring[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2013, 8(11):660-668.
- [7] 李振兴,徐洪洲. 基于经验模态分解的小波阈值降噪方法研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9):325-328.
- [8] 王峰林,王长龙,朱红运. 基于 EMD 的改进小波阈值降噪法在超声信号处理中的应用[J]. 军械工程学院学报, 2013, 25(3):35-39.
- [9] 王思文,郑卫刚. 经验模态分解及其在降噪方面的应用[J]. 机械制造, 2011, 49(10):26-29.
- [10] 李涛,张方,姜金辉. 基于 HHT 变换和独立分量技术的模态参数识别[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3):42-45.
- [11] 沈毅,张敏,张森. 基于小波阈值降噪和经验模态分解的高光谱图像分类算法[J]. 宇航学报, 2012, 33(4):471-477.
- [12] 崔心瀚,马立元,魏忠林,等. 小波阈值降噪与经验模态分解在信号瞬时特征提取中的应用[J]. 机械与

噪声基本被滤除,且降噪后的信号保留了原始信号基本特征,保证了在使用其进一步做结构健康分析时得到结论的可靠性。由此可见,该基于经验模态分解的阈值滤波降噪

电子, 2014(10):12-16.

- [13] 李琳, 张永祥, 明廷涛. EMD 降噪的关联维数在齿轮故障诊断中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(4):145-148.
- [14] 赵志宏, 杨绍普, 申永军. 一种改进的 EMD 降噪方法[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12):35-37.
- [15] 苗晟, 王威廉, 姚绍文. Hilbert-Huang 变换发展历程及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,

28(8):812-818.

作者简介

张晖, 在读研究生, 主要研究方向为电路与系统。

沈庆宏, 1969 年出生, 副教授, 硕士生导师, 研究领域为图像处理与嵌入式视频等。

E-mail: mg1323019@smail.nju.edu.cn

(上接第 161 页)

- [10] 俞凌云, 吴孟茹, 金晶, 等. 流动注射比浊联用法测定制革废水中的氯离子[J]. 中国皮革, 2011(19): 1-4.
- [11] 胡军. 一种微电流测量方法的研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4):31-35.

检测仪的研究。

E-mail: jiabo0829@126.com

祁欣(通讯作者), 博士, 教授, 研究方向为无损检测及水质监测研究。

E-mail: qixin@mail.buct.edu.cn

作者简介

贾波, 硕士研究生在读, 研究方向为光散射式氯离子

(上接第 165 页)

- [5] 王瑶, 杨晓非. 基于 FPGA 的双路高速数据采集系统的设计[J]. 电子测量技术, 2011, 34(9):73-76.
- [6] 梅茹, 卢欢. 基于 EZ-USB FX3 的 FPGA 在线配置设计方法[J]. 中国医疗器械信息, 2015, 21(11): 37-41.
- [7] 呼媛, 李自田, 胡炳樑, 等. EZ-USB FX2 固件与设备驱动开发[J]. 微计算机信息, 2010, 26(7-2): 162-164.
- [8] 任艳娜, 冯志慧, 闫素红. 基于 I²C 总线的 AD7745 控制与读取方法[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(6): 1544-1572.

- [9] 赵伟霞, 李喻奎. 18 位高精密 Δ - Σ A/D 转换器 MCP3421 及其应用[J]. 单片机与嵌入式应用, 2007, 7(8):82-83.

- [10] 何芹, 黄朴, 虞致国等. 基于平均频谱测试高速 ADC 动态参数的方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(7):755-762.

作者简介

张丛丛, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为数模/模数转换器可测性设计。

E-mail: 71705617@qq.com