

基于 VMD 算法的光栅莫尔条纹去噪方法

鲍克勤¹, 卢丹^{1*}, 吴文峰¹, 陈丹²

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 国网蚌埠供电公司, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 光栅莫尔条纹的信号质量直接决定其测量精度, 将基于变分模态分解(VMD)的方法用于对光栅莫尔条纹信号的去噪处理。首先对莫尔条纹仿真信号进行 VMD 分解成若干个不同频率段的本征模态函数(IMF); 然后利用希尔伯特变换对 IMF 分量时频特性进行分析, 滤除高频噪声信号。结果表明: 与经验模态分解(EMD)算法的分解结果相比, VMD 算法能够很好地抑制模态混叠现象, 准确地将不同频率段的信号分解出来, 而且提高了去噪之后信号的信噪比, 去噪效果好。

关键词: 光栅莫尔条纹; 变分模态分解; 去噪; 本征模态函数; 希尔伯特变换; 经验模态分解

中图分类号: TN915.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)01-0028-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.01.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Grating Moire fringe denoising method based on VMD algorithm

BAO Keqin¹, LU Dan^{1*}, WU Wenfeng¹, CHEN Dan²

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. State Grid Bengbu power supply company, Bengbu Anhui 233000, China)

Abstract: The signal quality of grating Moire fringe directly determines its measurement accuracy. The method based on variational mode decomposition (VMD) is used to denoise the grating Moire fringe signal. The simulation signal of Moire fringe is decomposed into several intrinsic mode functions (IMF) in different frequency bands by VMD, and then the time-frequency characteristics of IMF components are analyzed by Hilbert transform to filter out high-frequency noise signals. The results show that compared with empirical mode decomposition (EMD) decomposition results, VMD algorithm can effectively suppress the mode aliasing phenomenon, accurately decompose the signals of different frequency bands, and improve the signal-to-noise ratio of the signal after denoising, the denoising effect is well.

Key words: grating Moire fringe; variational mode decomposition; denoising; intrinsic mode function; Hilbert transform; empirical mode decomposition

0 引言

光栅位移传感器因其具有分辨率高、测量范围广等优点在精密测量等领域得到了广泛的应用, 而光栅位移传感器输出的莫尔条纹信号由于直流电平漂移、随机干扰信号和光栅刻画工艺等因素的干扰会变成

类似正弦曲线的波形^[1,2], 提高光栅莫尔条纹精度的关键在于去除信号中的滤波成分来提高其信号质量^[3,4]。

目前, 孙磊等人利用小波变换去噪法实现对光栅传感器信号的滤波^[5], 但小波算法的阈值选择实现过程比较复杂, 不便于操作; 杨华辉等人利用经验模态分解(EMD)算法实现对光栅时变信号模型的去噪处理^[6], 但 EMD 算法存在端点效应、模态混叠等现象。本文在前人的基础上进行研究, 提出利用变分模式分解(Variational Mode Decomposition, VMD)算法^[7-12]来实现对光栅莫尔条纹信号的降噪处理。

1 VMD 算法原理及去噪过程

1.1 VMD 算法原理

VMD 是由 Dragomiretskiy 等人于 2013 年提出的

收稿日期: 2018-08-23。

基金项目: 国家自然科学基金(61573239)资助。

作者简介: 鲍克勤(1965-), 男, 上海人, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 上海电力学院自动化工程学院教师。主要研究方向为电厂控制系统优化、电网安全评估技术以及电气设备状态检测技术研究。目前在上海电力学院自动化工程学院任教, 曾获得华东电网科技奖、浙江省电力公司科技进步奖等, 主持和参加过 20 多项科研项目, 如 500kV 变电站安全评估技术、运行维护技术和电缆试验技术等。



* 通信作者: 卢丹(E-mail: fightingludan@163.com)。

一种非递归的自适应、准正交的分解方式。VMD 算法分解的实质是把一路输入的原始信号 f 分解为一系列包含原信号局部特征信号的本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 分量 u_k , 各 IMF 分量被定义为调幅-调频 (AM-FM) 信号^[13-15], VMD 算法分解分两个过程, 分别为约束变分模型的构造和变分模型的求解。

1.1.1 变分模型的构造

变分模型的构造步骤如下:

①将模态函数 $u_k(t)$ 经过 Hilbert 变换得到其相对应的解析信号 $u_k^+(t)$, 计算解析信号获取单边频谱;

②将模态函数 $u_k(t)$ 与指数混合来估计中心频率, 通过频移将模态函数 $u_k(t)$ 的频谱解调到相对应的基频带;

③通过高斯平滑解调信号来估计模态函数 $u_k(t)$ 的带宽。

通过以上步骤可以得到相对应的约束变分模型:

$$\begin{cases} \min_{\{u_k, \{W_k\}\}} \left\{ \sum_k \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-jW_k t} \right\} \\ \text{s.t.} \sum_k u_k = f \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\delta(t)$ 表示脉冲信号; $u_k(t)$ 表示 VMD 算法分解之后得到的 k 个 IMF 模态分量; w_k 表示第 k 个 IMF 模态分量的中心频率; K 为模态分量总数。

1.1.2 变分模型的求解

本文将有限权重下二次惩罚因子 α 与拉格朗日乘子 $\lambda(t)$ 相结合, 解算出式 (1) 中目标函数约束变分问题的最优解, 将目标函数的约束性优化变分问题转变为非约束优化变分问题, 得到相对应的拉格朗日函数表达式:

$$L(\{u_k\}, \{W_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-jW_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left[\lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right] \quad (2)$$

接着运用交替方向乘子算法 (Alternate Direction Method of Multipliers, ADMM) 交替更新 u_k^{n+1} 、 w_k^{n+1} 和 λ^{n+1} , 求解得出式 (2) 的鞍点, 从而解决式 (3) 中的非约束变分问题。当 VMD 算法分解的每一个本征模态分量小于判别精度 ε ($\varepsilon > 0$) 时, 迭代过程停止。

$$\sum_{k=1}^K \frac{\left\| \hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n \right\|_2^2}{\left\| \hat{u}_k^n \right\|_2^2} < \varepsilon \quad (3)$$

1.2 VMD 算法的降噪过程

VMD 算法的降噪过程如下:

①通过 VMD 算法将原始信号分解为一系列包含原信号局部特征信号的本征模态函数;

②对函数进行希尔伯特变换得到函数的时频信息;

③对含有噪声信号的高频 IMF 分量进行滤波;

④将滤波后的高频 IMF 分量和低频 IMF 分量进行重组得到降噪之后的信号。

2 仿真实例与分析

2.1 仿真信号

为了验证所提出的 VMD 算法对莫尔条纹信号去噪效果的有效性, 本文构建了莫尔条纹信号模型进行仿真^[16,17], 其信号方程为:

$$y = A_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) + A_3 \sin(2\pi f_3 t + \varphi_3) + n(t) \quad (4)$$

其中, 基波信号 y_1 的幅值 $A_1 = 2.5V$, 频率 $f_1 = 10Hz$, 相位 $\varphi_1 = \pi/3$; 二次谐波 y_2 的幅值 $A_2 = 1V$, 频率 $f_2 = 20Hz$, 相位 $\varphi_2 = \pi/6$; 五次谐波 y_3 的幅值 $A_3 = 0.25V$, 频率 $f_3 = 50Hz$, 相位 $\varphi_3 = 0$; $n(t)$ 表示标准差为 0.1 的高斯白噪声。仿真信号的采样频率为 1000Hz, 采样点数为 1000, 仿真信号图如图 1 所示。

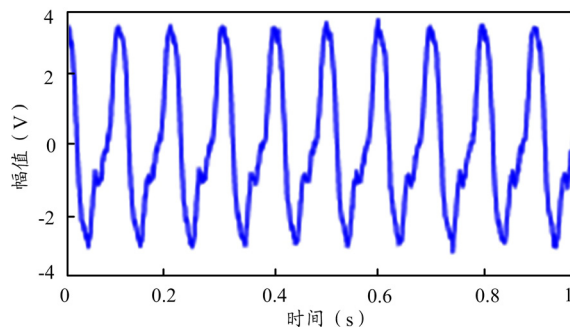


图 1 仿真信号波形原始波形图

2.2 VMD 算法分解

本文对仿真信号进行 EMD 算法分解, 其分解 IMF 分量的时域图和频域图分别如图 2 和图 3 所示。经过 EMD 算法分解出 7 个 IMF 分量 (IMF1~IMF7), 频率由高到低依次排列, 但是对于仿真信号的频率并不能清晰地分解出来, 分解结果存在一定的模态混叠情况, 且分解出的 IMF 分量并不是正弦波, 存在较大误差。

取 $K=5$ 、 $\alpha=2000$ 对仿真信号进行 VMD 算法分解, 其分解 IMF 分量的时域图和频域图分别如图 4 和图 5

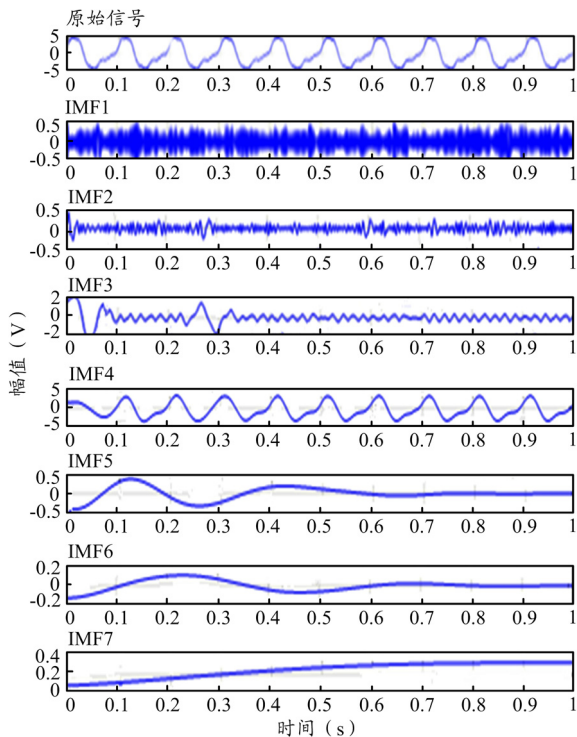


图2 EMD 算法分解各分量时域图

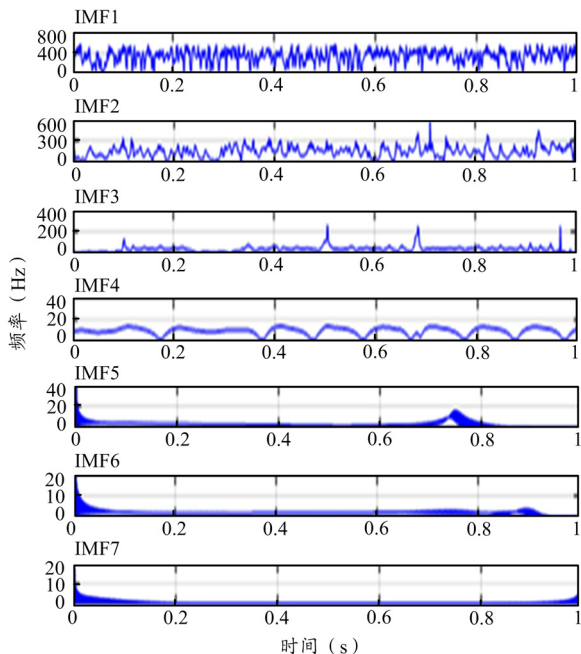


图3 EMD 算法分解各分量频域图

所示。分量 IMF1 为频率在 10Hz 左右的基波分量, 分量 IMF2 为频率在 20Hz 左右的谐波分量, 分量 IMF3 为频率在 50Hz 左右的谐波分量, 分量 IMF4、IMF5 是高频信号分量。由图 4 和图 5 可知, VMD 算法能够将含有谐波分量的莫尔条纹信号分解出来, 分解得到的 IMF 分量更能体现出仿真信号的波性特征。VMD 算法

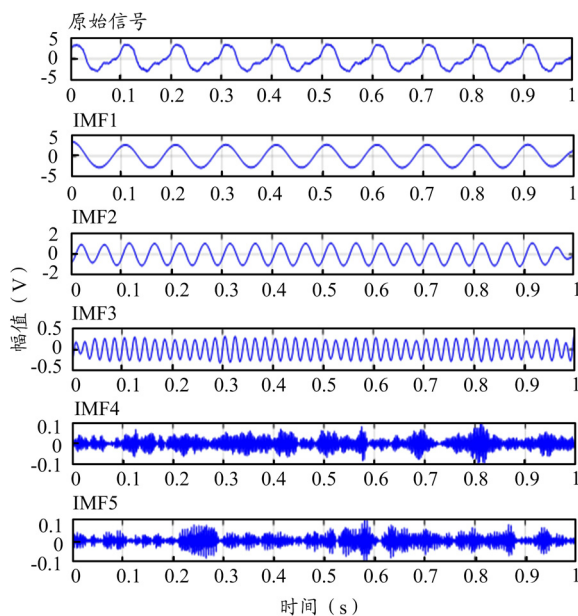


图4 VMD 算法分解各分量时域图

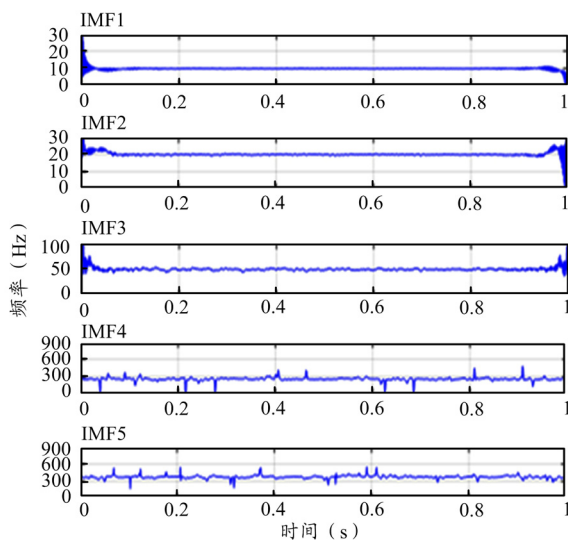


图5 VMD 算法分解各分量频域图

分解的分量、频率由低到高, 不同频率段的 IMF 分量都被分解出来, 模态混叠的情况得到了很好的抑制, 这为之后的光栅莫尔条纹去噪提供了有力的保障。

2.3 信号降噪效果分析

IMF1 与基波 $y_1(t)$ 、IMF2 与二次谐波 $y_2(t)$ 和 IMF3 与五次谐波 $y_3(t)$ 的波形对比图分别如图 6、图 7 和图 8 所示。通过对比发现, 仿真信号经过 VMD 算法分解之后, IMF 分量与仿真信号分量的波形基本一致, 且收敛时间短, 能够很快地将噪音信号分离出来。

为了更好地说明 VMD 算法的去噪效果, 本文分别对 EMD 算法和 VMD 算法的分解结果进行信噪比

计算, 其中 EMD 算法处理后的信噪比为 16.5342, VMD 算法处理后的信噪比为 28.8957。由结果可知, 使用 VMD 算法对光栅莫尔条纹信号去噪的方法得到的信噪比更高, 去噪效果更好。

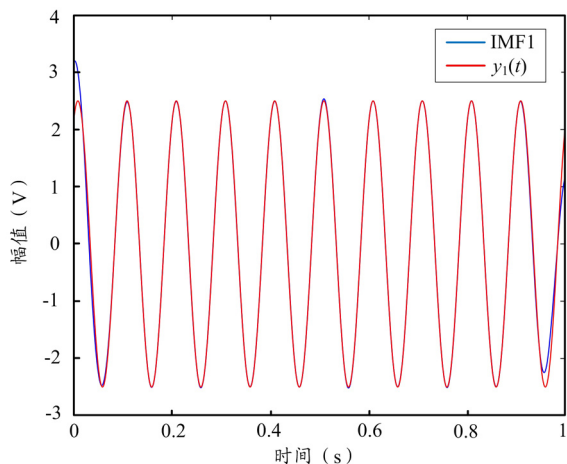


图 6 IMF1 与基波波形 $y_1(t)$ 对比图

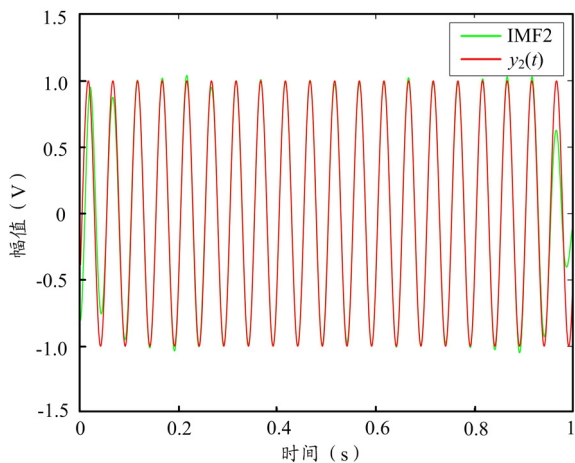


图 7 IMF2 与二次谐波波形 $y_2(t)$ 对比图

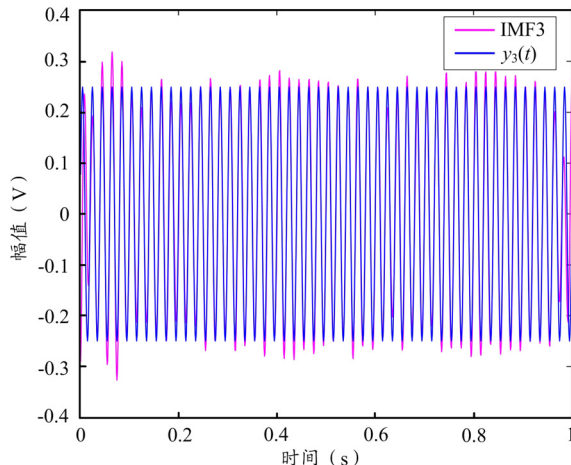


图 8 IMF3 与五次谐波波形 $y_3(t)$ 对比图

3 结束语

本文利用 VMD 算法来实现对光栅莫尔条纹信号仿真模型信号的去噪处理, 利用该方法将仿真信号模型分解出一系列的 IMF 分量, 利用 Hilbert 谱能分析分解出的 IMF 分量的时频特性, 并将噪声信号滤除, 完成了对光栅莫尔条纹信号仿真模型的去噪。仿真结果显示: VMD 算法能够很好地将基波信号、二次谐波、五次谐波和噪声信号分离出来, 且能够准确反映出仿真信号的频率成分及其频率随时间变化的动态情况; 与 EMD 算法作对比, VMD 算法不仅能够很好地抑制模态混叠现象, 扰动误差小, 而且还提高了信号的信噪比, 降噪效果明显。

参考文献:

- [1] 王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 379-386.
- [2] 冯英翹, 万秋华. 小型光电编码器细分误差校正方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1374-1379.
- [3] 郭瑞. 增量式光电编码器莫尔条纹信号细分方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [4] 熊文卓, 孔智勇, 张伟. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1745-1748.
- [5] 孙磊, 张志利, 谭立龙, 等. 采用小波阈值的时变光栅莫尔信号去噪方法 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 576-580.
- [6] 杨华晖, 刘福, 冯伟利. 基于 EMD 算法的光栅莫尔条纹信号去噪方法研究 [J]. 计量学报, 2016, 37(5): 467-471.
- [7] 张涛. 基于 VMD 的航空发动机中介轴承故障诊断 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [8] 黄传金, 周铜. 基于变分模态分解的电能质量扰动检测新方法 [J]. 电力自动化设备, 2018(3): 116-123.
- [9] 陈陈, 李晓明, 杨玲君, 等. 变分模态分解在电力系统谐波检测中的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 63-70.
- [10] 崔锡龙, 王红军, 邢济收, 等. 广义形态滤波和 VMD 分解的滚动轴承故障诊断 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018(4): 51-57.
- [11] 魏勇召. 基于变分模态分解的机车轴承故障诊断 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [12] LIU C, ZHU L, NI C. Chatter detection in milling process based on VMD and energy entropy [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018, 105: 169-182.
- [13] 陈强伟, 蔡文皓, 孙磊, 等. 基于 VMD 的谐波检测方法 [J]. 电测与仪表, 2018, 55(2): 59-65.
- [14] 赵昕海, 张术臣, 李志深, 等. 基于 VMD 的故障特征信号提取方法 [J]. 振动测试与诊断, 2018, 38(1): 11-19, 202.
- [15] 卢晓东. 基于 VMD 的齿轮箱故障诊断方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- [16] 吴宏圣, 曾琪峰, 乔栋, 等. 提高光栅莫尔条纹信号质量的滤波方法 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1944-1949.
- [17] 左洋, 龙科慧, 刘金国, 等. 非均匀采样莫尔条纹信号的分析与处理 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1146-1152.