

EMD方法及其在红外气体传感器信号处理中的应用

谢琼 李建平 高晓光 贾建

(中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室 北京 100190)

摘要: 该文研究了经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法在红外气体检测中的应用。针对红外气体浓度信号的特点对算法进行了改进,使得算法能够在不分解出所有IMF(Intrinsic Mode Function)分量的情况下,正确提取所需的IMF分量。与低通滤波和锁相等方法进行了比较分析,结果表明,改进后的EMD算法具有所需数据量少、计算量小、提取的有用信号能量损失少等优点,可以快速识别气体浓度的变化,有效提高气体浓度测量的精度,适用于在线实时检测。

关键词: 红外气体检测; 经验模式分解; 数字锁相

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)10-2516-04

The EMD Method and Its Application to Signal Processing for Infrared Gas Detection

Xie Qiong Li Jian-ping Gao Xiao-guang Jia Jian

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the analysis of the Empirical Mode Decomposition (EMD) method, an improved algorithm for signal processing in IR optical gas detection is presented. It decomposes only frequency-modulated signal without need to decompose every Intrinsic Mode Function (IMF) component. Compared with the methods of low-pass filter and digital lock-in amplifier, the improved algorithm has advantages of short data set, fast computation speed and less signal energy loss. It is more effective and time-saving than the conventional EMD method. The changes of gas concentration can be diagnosed by the algorithm and the precision can be improved at the same time. Thereby the gas concentration can be determined accurately and efficiently and it is suitable for real-time detection.

Key words: IR gas detection; Empirical Mode Decomposition (EMD); Digital lock-in amplifier

1 引言

非分光红外气体传感器(NDIR)具有测量范围宽、灵敏度高、可靠性高和寿命长等优点,在很多领域有着重要用途。它的原理是通过探测输出信号的调制频率信号幅值的测定得到待测气体浓度。然而,在实际气体浓度检测中,调制信号带有大量噪声,如何准确地提取信号幅值是一个问题;此外,许多干扰因素会引起信号幅值的波动,这些干扰因素对检测精度影响很大。目前解决这一问题的方法主要是通过各种信号处理算法^[1,2]。其中低通滤波只是滤除了高频噪声,然后用去噪后的几个周期信号幅值的均值确定气体浓度。这种方法对干扰因素引起的幅值变化无能为力,测定的浓度精度不高,尤其在浓度迅速变化的情况下误差很大。锁相方法是目前采用的较好的一种方法,它能够锁定调制频率信号的幅值,精度较高,但存在参考信号的选取,动态信号检测滞后和能量损失的问题。

经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)信号处理算法^[3]可以将信号的频率成份分解为一系列内蕴模式函数分量(Intrinsic Mode Function, IMF)。近年来已在生物医学、环境工程等许多领域得到较好的应用^[4,5]。

本文将EMD算法引入红外气体浓度信号的处理中,并针对红外气体浓度信号的特点对原算法做了改进;分别采用FIR低通滤波、数字锁相和改进的EMD方法对由三角函数构建的理想信号和光电探测器的甲烷气体检测数据进行分析处理,系统地比较了3种方法的优劣。改进后的EMD算法可以精确提取有用信号的幅值,能够快速识别气体浓度的变化,适用于高精度在线实时检测。

2 EMD算法介绍

Huang NE等人于1998年提出了经验模式分解(EMD)方法^[3],此方法完全由数据驱动,可以通过筛过程(Sifting)自适应地将信号的频率成份分解为一系列具有不同特征尺度的内蕴模式函数分量IMF。这些IMF满足如下条件:(1)极值点和过零点的个数相等或者最多相差1;(2)在任意点由数据中极大值和极小值构成的包络线的平均值为零。

设 $U(t)$ 为原始信号, $S_i(t)$ 为算法中使用的中间变量, 第 1 次迭代时的 $S_0(t)$ 即为 $U(t)$ 。EMD 算法步骤如下:

- (1) 令 $i = 0$;
- (2) 求信号 $S_i(t)$ 的所有极大和极小值点;
- (3) 采用三次样条拟合 $S_i(t)$ 的所有极值点, 得到上包络线 $X_{\max}(t)$ 和下包络线 $X_{\min}(t)$, 计算包络平均值 $m_i(t) = (X_{\max}(t) + X_{\min}(t))/2$;
- (4) 求取 $S_i(t)$ 和 $m_i(t)$ 的差值 $S_{i+1}(t) = S_i(t) - m_i(t)$;
- (5) 令 $i = i + 1$;
- (6) 重复步骤(2)–步骤(5)直到 $S_{i+1}(t)$ 满足 IMF 的条件;
- (7) 将余量 $r(t) = S_0(t) - S_{i+1}(t)$ 视为新的信号, 重复步骤(1)–步骤(6), 求出所有 N 个 IMF 分量, 直到最后的 $|r_N(t)|$ 很小或呈现单调趋势, 循环结束。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N IMF_i(t) + r_N(t)$$

3 EMD 方法与低通滤波和数字锁相方法的比较

先以理想信号为例来说明用于红外气体浓度检测的 3 种方法的优劣。这里构建的理想信号 $s(t)$ 由两段幅值不等的信号 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 组合而成。 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 分别为

$$s_1(t) = 3 \sin(2\pi \times 5t) + 0.2 \cos(2\pi \times 15t + \pi/4) + 0.5 \sin(2\pi \times 50t) \tag{1}$$

$$s_2(t) = 2 \sin(2\pi \times 5t) + 0.2 \cos(2\pi \times 15t + \pi/4) + 0.5 \sin(2\pi \times 50t) \tag{2}$$

$s(t)$ 由频率为 5Hz、幅值分别为 3($s_1(t)$, 前 10 个周期)和 2($s_2(t)$, 后 10 个周期)的正弦函数, 频率为 15Hz、幅值为 0.2、相位为 $\pi/4$ 的余弦函数, 以及频率为 50Hz、幅值为 0.5 的正弦函数叠加而成。原信号以 5Hz 为基频, 采集 20 个周期, 采样率为 200, 共计 800 个点。 $s(t)$ 为含噪信号, 5Hz 信号为有用信号。分别采用低通滤波、数字锁相和 EMD 方法对理想信号进行消噪处理。输入和输出信号如图 1 所示, 其中图 1(a)为理想信号, 图 1(b)–图 1(d)为经低通滤波、数字锁相和 EMD 3 种不同方法处理后的输出信号。

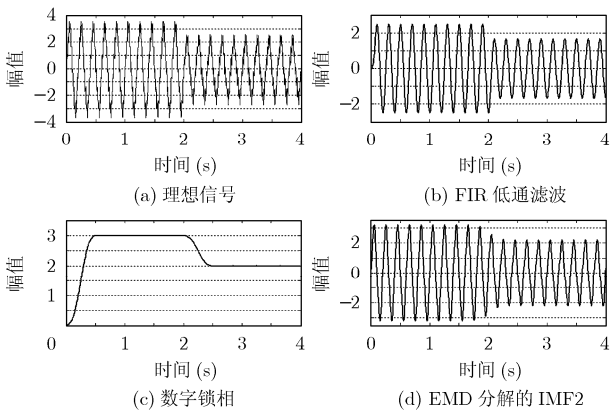


图 1 不同方法提取理想信号中 5Hz 信号的结果对比

(1)低通滤波方法。为了滤除高频噪声, 采用 20 阶截止频率为 0.032 的 Hamming 加窗线性相位 FIR 低通滤波器。从图 1(b)可以看出, 低通滤波有明显的相位延迟; 幅值突变处虽然基本没有明显过渡区, 但有用信号的幅值有相当程度的损失。

(2)数字锁相方法。数字锁相方法能较容易地实现, 外围电路简单、灵活、功能较强。这里参考信号取 $R_x(t) = \sin(2\pi \times 5t)$ 和 $R_y(t) = \cos(2\pi \times 5t)$, 分别与信号 $s(t)$ 相乘后得到 $M_x(t)$ 和 $M_y(t)$, 再分别经过 100 阶截止频率为 0.0016 的 FIR 低通滤波器, 得到输出信号 $X = 0.5L_1 \cos(\alpha)$ 和 $Y = 0.5L_1 \sin(\alpha)$, 从而得到有用信号的幅值 $r = 2\sqrt{X^2 + Y^2} = |L_1|$, r 与信号的相位 α 无关。从图 1(c)可以看出, 数字锁相方法可以将 5Hz 信号的幅值准确地从原始含噪信号中分离出来; 但信号幅值突变处有一定的滞后, 并且过渡区比较长。

(3)EMD 方法。利用 EMD 信号分解原理可以减少和消除信号中混杂的噪声^[6]。图 2 为该算法分解出的 6 个 IMF 分量, 从分解出的结果看(图 1(d), 图 2(b)), EMD 方法成功地分解出了 50Hz 信号(IMF1), 但没有从 5Hz 基频信号中分解出 15Hz 倍频信号。这是因为 EMD 算法是根据待分解信号的极值点来进行信号分解的。而根据近期的研究报道^[7], 一个含有倍频成分的信号, 当倍频信号的能量满足某些条件时将隐藏在它的基频信号内, 表现为这些倍频信号没有自己的极值点, 因而不会改变基频信号极值点的数量。因此根据基频的极值点抽取的 IMF 含有倍频成分。可以看到, IMF2 分量的幅值约为 3.2, 比 5Hz 信号幅值略大, 就是因为含有 15Hz 信号分量。从图中还可以看到, 信号幅值突变处的过渡区较短。

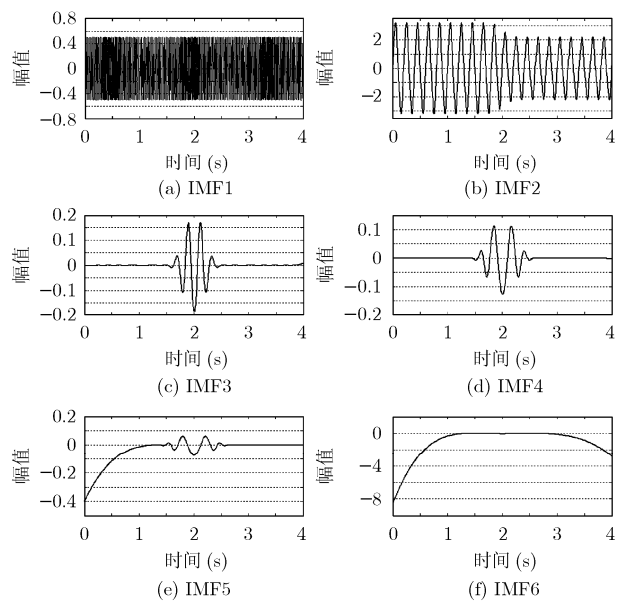


图 2 EMD 分解的各内蕴函数分量

4 改进的 EMD 算法在红外气体检测中的应用

实验系统采用长度为 10cm 的固定气室，光源和探测器同轴固定。使用电调制的 MEMS 工艺红外光源^[8]和光电二极管红外探测器^[9]，光源发射 2~12μm 范围的广谱红外光，探测器表面镀有红外滤光膜，适合测量吸收峰在 3.4μm 附近的气体，如甲烷和乙醇。A/D 采样率为 1k/s。红外气体传感器中探测器输出浓度信号的频率为 16Hz，即光源调制频率。根据 Lambert-Beer 定律^[10]，其幅值的变化信息反映了气体浓度的变化。

图 3 为原始信号中浓度相对平稳处的 8 个周期顶部局部放大后的图形。可以看出信号顶部高频噪声较多，噪声分布呈非平稳性的特点，且信号幅值在一均值附近上下波动。这主要是由于探测器响应率波动、光源功率波动和其它高频干扰等因素造成的。图 4 为探测器输出的周期信号波形。气体的浓度信号即为 16Hz 信号的幅值包络。图 5(a)为原始信号的幅值包络。下面分别采用 3 种方法对原始数据进行处理，并对最后的结果进行比较。

(1)低滤波方法。采用 100 阶截止频率为 0.032 的 Hamming 加窗线性相位 FIR 低通滤波器对原始信号进行滤波，然后提取信号幅值包络。从图 5(b)可以看出，精度与原始数据相比几乎没有提高，幅值衰减严重。

(2)数字锁相方法。最后一级滤波采用 1000 阶截止频率为 0.001 的 Hamming 加窗线性相位 FIR 低通滤波器。参考信号取 $R_x(t) = \sin(2\pi \times 16t)$ 和 $R_y(t) = \cos(2\pi \times 16t)$ 。从图

5(c)可以清楚地看到，数字锁相方法能够有效提高检测精度。实验中还发现数字锁相方法得到的浓度信号的能量有一定程度的衰减。这主要是因为探测器实际信号波形呈非对称性，见图 4。图 6 为原始信号去掉直流分量后的频谱分布图。可以看到信号不仅含有基频，还包含多个倍频。而采用锁相方法处理信号时，只能锁住选定频率的信号，其它倍频成分全部丢失，因此会造成信息的浪费。此外，探测器输出信号的波形随光源调制频率和探测器种类的不同差异较大，这就涉及参考信号的选取问题，为了得到较高的精度，必须通过实验确定合适的参考信号波形。

(3)改进的 EMD 方法。对于采集到的实际信号，由于频率成分复杂，采用原有的 EMD 算法经常会遇到不能正确分解的情况，很难满足实际应用的需要。图 7 的信号为 1s 内采样得到的 1000 个数据点，用原有的 EMD 算法进行分解，由于前 0.7s 的波形上带有毛刺，见图 4，也被当作有效极值点一起参与计算，造成分解有误。还有一些实际的信号，即使花费大量时间能够正确分解出所有的 IMF 分量，其中大多数分量并不是所需的。对于气体浓度检测而言，所需信号是调制频率信号的幅值包络，因此只需要从原始信号中分解出对应调制频率的 IMF 分量即可。针对这一特点，本文对原 EMD 算法进行了改进，将原算法中反复寻找所有最大值和最小值点修改为只寻找一次调制频率对应的极值点，然后进行包络拟合。改进后的 EMD 算法不但可以确保分解过程能够顺利进行，分解出正确的 IMF 分量，还可以大大减少计算量，满足实时检测的要求。对提取出的有用信号的幅值包络进行测定即可得到消噪后的气体浓度。

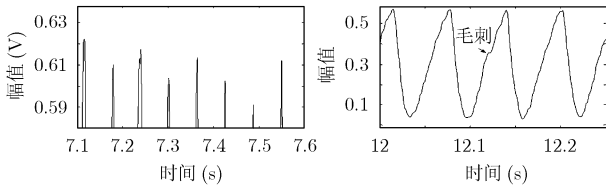


图 3 原始信号顶部局部放大图 图 4 周期信号波形

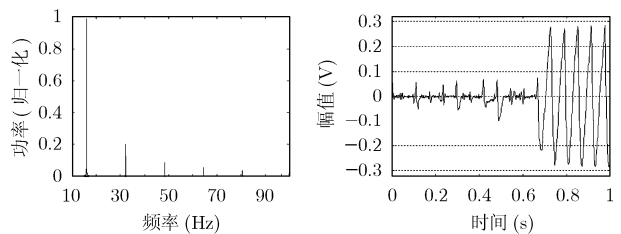


图 6 原始信号的频谱 图 7 原 EMD 算法提取的 IMF 分量

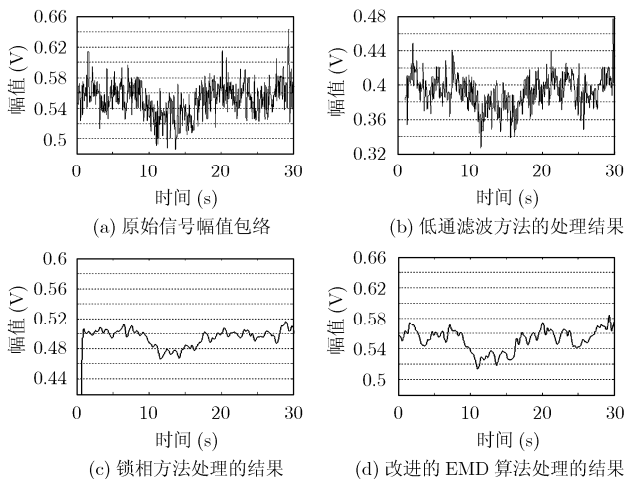


图 5 3 种方法处理的 16Hz 气体浓度信号幅值包络

改进的 EMD 算法实现步骤如下：

- (1)令 $i = 0$ ，找到 $S_i(t)$ 的所有极大值和极小值点；
- (2)从找到的所有极值点中，根据调制频率和采样率，每隔一个调制频率对应的周期选择一个极大值点和极小值点，这样就能够使算法仅分离出所需频率成分的分量，其它极值点视为噪声不予考虑；
- (3)通过三次多项式对选择的极值点进行插值得到上、下包络线，计算包络线平均值 $m_i(t) = (X_{\max}(t) + X_{\min}(t))/2$ ；
- (4)计算 $S_{i+1}(t) = S_i(t) - \lambda^i m_i(t)$ ，其中 λ 是根据 Peng 等人提出的 Modified EMD sifting Algorithm^[11]引入的收敛因子，由实验数据得到经验值 $\lambda = 0.9$ ；

(5) 令 $i = i + 1$;

(6) 重复步骤(3)~步骤(5), 直到 $|S_{i+1}(t) - S_i(t)|$ 足够小, 终止算法。

图 8 为采用改进的 EMD 算法从理想信号中抽取的 IMF 分量。与原 EMD 算法抽取的 IMF2 分量(图 1(d))相比, 图 8 的 IMF 分量几乎没有过渡区。可见改进的算法对于幅值动态变化的处理效果更好。

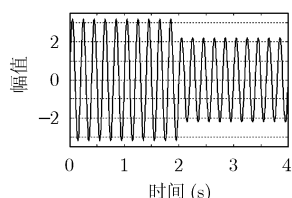


图 8 改进的 EMD 算法抽取的 IMF 分量

从图 5(d)可以看到, 改进的 EMD 方法能够在较好地抑制噪声的前提下保持气体浓度信号的主要信息。锁相方法只能提取调制频率信号的幅值, 而 EMD 算法根据基频的极值点抽取的 IMF 含有倍频成分, 因此提取的信号能量与原始信号相比几乎没有损失。IMF 分量的频谱与图 6 所示原始信号的基频和倍频成分基本一致。这表明提取的信号去除了直流分量和高频噪声, 保留了 16Hz 基频及其所有倍频成分。

5 结束语

本文根据红外气体浓度信号的特点提出了改进的 EMD 方法, 分别与 FIR 低通滤波和数字锁相方法的处理结果进行了比较分析。低通滤波和锁相方法得到的幅值包络能量会有损失, 而改进的 EMD 算法能够正确分解出包含基频和所有倍频成分的 IMF 分量, 提取有用信号过程中几乎没有能量损失。除 FIR 低通滤波外, 数字锁相和改进的 EMD 方法都能有效提高检测精度。对于幅值快速变化的气体浓度信号, 改进的 EMD 方法的处理效果比锁相方法好, 而且能确保迭代的收敛性, 所需数据量少, 计算量小, 更适合用于气体浓度的动态实时检测。该算法为红外气体浓度信号处理提供了新的途径。

参 考 文 献

[1] Leleux D P and Claps R. Applications of Kalman filtering to real-time trace gas concentration measurements [J]. *Applied*

- Physics B*, 2002, 74(1): 85-93.
- [2] Namjou K and Cai S. Sensitive absorption spectroscopy with a room-temperature distributed-feedback quantum-cascade laser [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(3): 219-221.
- [3] Huang N E, Shen Z, and Long S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1998, 454: 903-995.
- [4] Huang W, Shen Z, Huang N E, and Fung Y C. Nonlinear indicial response of complex nonstationary oscillations as pulmonary hypertension responding to step hypoxia [C]. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 1999, 96(5): 1834-1839.
- [5] Datig M and Schlurmann T. Performance and limitations of the Hilbert-Huang transformation (HHT) with an application to irregular water waves [J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(14): 1783-1834.
- [6] Flandrin P, Rilling G, and Goncalves P. Empirical mode decomposition as a filter bank [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, 11(2): 112-114.
- [7] Rilling G and Flandrin P. One or two frequencies? The empirical mode decomposition answers, <http://prunel.ccsd.cnrs.fr/ensl-00113834>, November, 2006.
- [8] Ohlckers P, Ferber A M, and Dmitriev V K, *et al.* A photoacoustic gas sensing silicon microsystem [C]. *Transducers 2001. Germany, 2001, 10-14: 780-783.*
- [9] Remennya M A, Zotovaa N V, and Karandasheva S A, *et al.* Low voltage episide down bonded mid-IR diode optopairs for gas sensing in the 3.3-4.3 μm spectral range [J]. *Sensors and Actuators B*, 2003, 91(2): 256-261.
- [10] Bauman R P. *Absorption Spectroscopy* [M]. New York John Wiley & Sons Inc, 1962, Chapt.10.
- [11] Peng Silong and Hwang Wen-Liang. Adaptive signal decomposition based on local narrow band signals [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 56(7): 2669-2676.

谢 琼: 女, 1978 年生, 博士生, 研究方向为红外气体传感器系统设计及其信号处理。