

基于 LabVIEW 的局域均值分解方法 及其在列车轴承故障诊断中的应用

王 鹏¹, 李晓亮²

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院 河北 石家庄 050043; 2. 山东莱芜供电公司 山东 莱芜 271100)

摘要: 列车轴承故障诊断是保证铁路运营安全的重要手段, 轴承振动信号的处理方法是实现故障诊断的关键。局域均值分解方法是一种自适应的信号处理方法, 对于非线性非平稳信号的解调具有良好的性能。利用在测试测量领域广泛使用的 LabVIEW 进行了局域均值分解方法的编程, 将方法与虚拟仪器技术结合搭建了一套高速、可靠、可移植性强的系统, 通过仿真信号和轮对实验的验证, 证明该方法适用于工程实践。

关键词: LabVIEW; 局域均值分解; 故障诊断

中图分类号: TH212; TH213.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)03-0057-04

0 引言

轴承是列车转向架的重要部件之一, 其健康状况直接影响列车运行安全, 因此对其进行故障诊断十分必要。振动加速度信号分析是一种常用的轴承故障诊断手段, 但是能够准确反映轴承部件损坏情况的信号往往被噪声调制, 因此信号解调是故障诊断的重点和难点。随着信号处理技术的发展, 各种信号处理方法层出不穷, 局域均值分解 (LMD) 方法^[1]便是一种新颖、有效的信号解调方法, 该方法可以自适应地将多分量调制的复杂信号分解为多个乘积函数 (PF), 此外还能快速、准确的得出 PF 分量的瞬时频率, 较先前的解调方法有着明显的优势^[2], 也在工程应用中取得了良好的效果^[3-5]。使用 LabVIEW 实现 LMD 方法能够借助虚拟仪器技术快速地搭建一套低成本、高性能以及高可靠性的诊断系统, 在诊断中利用 LMD 方法对振动信号进行自适应解调并加以分析, 可以对轴承健康状况进行准确的判断, 对保障列车安全具有重要价值。

1 局域均值分解原理

LMD 方法的核心是通过信号的局部极值点求取局域均值函数和包络估计函数进而得到纯调频信号, 通过它们可以求得 PF 分量并可直接计算出该 PF 分量的瞬时幅值与瞬时频率, 对于信号 $x(t)$ 具体实现方法如下:

(1) 确定 $x(t)$ 的所有局部极值点 n_i , 对相邻的两个局部极值点进行计算求出局部均值 m_i 和包络估计值 a_i

$$m_i = \frac{n_i + n_{i+1}}{2} \quad (1)$$

$$a_i = \frac{|n_i - n_{i+1}|}{2} \quad (2)$$

(2) 分别对所有的 m_i 、 a_i 进行滑动平均处理得到局域均值函数 $m_{11}(t)$ 和包络估计函数 $a_{11}(t)$ 。

收稿日期: 2013-03-06

作者简介: 王鹏 男 1987 年出生 硕士研究生

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB723301); 国家自然科学基金(11227201; 11202141; 11172182);

铁道部重点项目(2011J013-A); 河北省自然科学基金(A2013210013); 河北省教育厅项目(Z2011228; zh2011215)

(3) 将 $m_{11}(t)$ 从 $x(t)$ 中分离出来并除以 $a_{11}(t)$ 得到调频信号 $s_{11}(t)$ 。

$$s_{11}(t) = \frac{x(t) - m_{11}(t)}{a_{11}(t)} \quad (3)$$

(4) 根据步骤(1)、(2)的方法求取 $s_{11}(t)$ 的包络估计函数 $a_{12}(t)$ 。若 $a_{12}(t) = 1$, 则 $s_{11}(t)$ 为纯调频信号, 否则 $s_{11}(t)$ 不为纯调频信号, 需将其带入步骤(1), 重复上述的步骤, 迭代 n 次直至 $s_{1n}(t)$ 为纯调频函数, 即 $a_{1(n+1)}(t) = 1$ 。

(5) 将迭代过程中产生的包络估计函数相乘, 即可求得第一个 PF 分量的包络信号

$$a_1(t) = \prod_{j=1}^n a_{11}(t) a_{12}(t) \cdots a_{1n}(t) \quad (4)$$

(6) 将包络信号与纯调频函数相乘即可得到 PF 分量

$$PF_1(t) = a_1(t) s_{1n}(t) \quad (5)$$

$PF_1(t)$ 的包络信号 $a_1(t)$ 即为其瞬时幅值, 瞬时相位可由 $s_{1n}(t)$ 求出

$$\varphi_1(t) = \arccos(s_{1n}(t)) \quad (6)$$

通过对瞬时相位函数进行相位展开和求导可求得 $PF_1(t)$ 的瞬时频率

$$\omega_1(t) = \frac{d\varphi_1(t)}{dt} \quad (7)$$

(7) 将第一个 PF 分量从原信号 $x(t)$ 中分离出来得到 $u_1(t)$, 将其带入步骤(1), 重复上述步骤 k 次, 直至 $u_k(t)$ 为单调函数, 从而得到全部 PF 分量和残余分量 $u_k(t)$ 。

$$\begin{cases} u_1(t) = x(t) - PF_1(t) \\ u_2(t) = u_1(t) - PF_2(t) \\ \dots\dots\dots \\ u_k(t) = u_{k-1}(t) - PF_k(t) \end{cases} \quad (8)$$

2 LMD 方法的 LabVIEW 实现

LabVIEW 是一种基于数字流的编程语言, 其特点是图形化、模块化, 因此 LabVIEW 编程具备了高效率、高可靠性以及天生的并行运算特性。使用 LabVIEW 实现 LMD 方法可使该算法能够易于在测试工作中被移植, 从而更广泛地应用于工程实践。

由于信号的端点通常不是极值点, 在运算中会产生端点效应对计算结果产生一定的影响。为了降低端点效应对分解结果的影响, 在程序中采用了相似极值延拓方法^[6]对边界极值点进行处理。该方法在应用中既能保证对端点效应进行有效抑制, 又具有较高的运行速度。

在对纯调频信号进行判断时, 规定调频函数 $s_{1n}(t)$ 的包络估计函数 $a_{1(n+1)}(t)$ 需满足条件 $a_{1(n+1)}(t) = 1$, 但在实际应用中该条件不易实现。因此通常取一较小值 Δ , 规定满足条件 $1 - \Delta \leq a_{1(n+1)}(t) \leq 1 + \Delta$ 时判定 $s_{1n}(t)$ 为纯调频函数。在本程序中取 $\Delta = 10^{-3}$ 。利用上述方法, 在 LabVIEW 中编程实现, 其逻辑结构如图 1 所示。由于 LabVIEW 基于数字流的特性, 程序将域均值函数和包络估计函数的运算并行化, 故可降低运算所需时间。

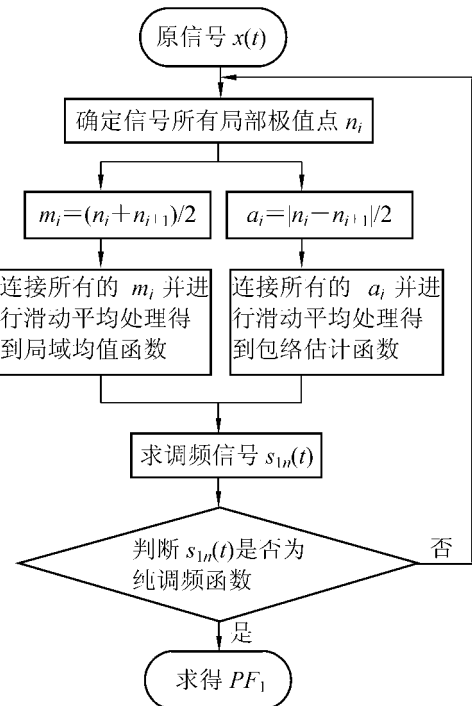


图1 求取 PF 分量程序的逻辑结构

3 仿真信号分析

以式(9)中的信号为例

$$(1 + 0.5 \cos 10\pi t) \sin(200\pi t + 1.5 \sin 50\pi t) + \sin 30\pi t \quad t \in [0, 1] \quad (9)$$

图 2 是该信号的时域波形。在不对端点效应进行处理的情况下,使用 LMD 方法对其进行分解,得到的两个 PF 分量 $PF_1(t)$ 、 $PF_2(t)$ 和残余分量 $u(t)$ 如图 3 所示。使用相似极值延拓方法处理端点效应,分解得到 $PF_1(t)$ 、 $PF_2(t)$ 和残余分量 $u(t)$ 如图 4 所示。通过对比 $PF_2(t)$ 和 $u(t)$ 可以看出,使用该方法能够对端点效应进行有效的抑制。由图 4 也可以看

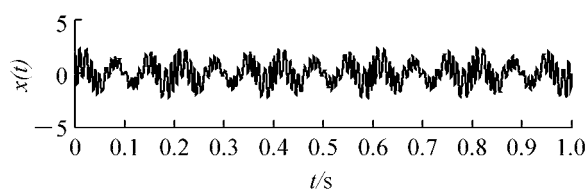
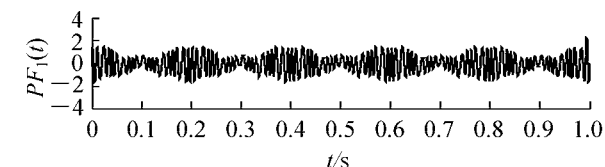
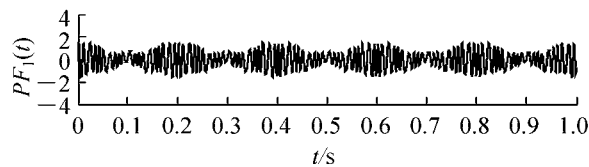


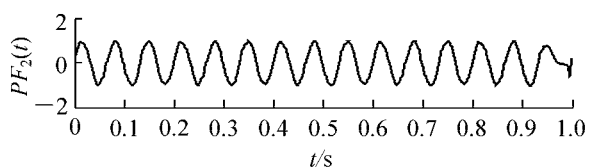
图 2 仿真信号式(9)的时域波形



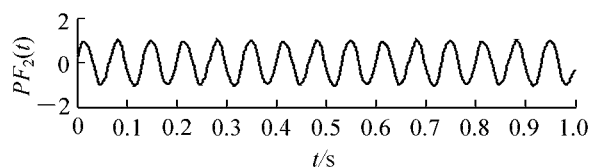
(a)未处理端点效应时分解 $x(t)$ 得到的第一个 PF 分量



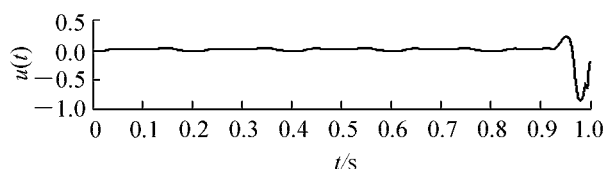
(a)处理端点效应时分解 $x(t)$ 得到的第一个 PF 分量



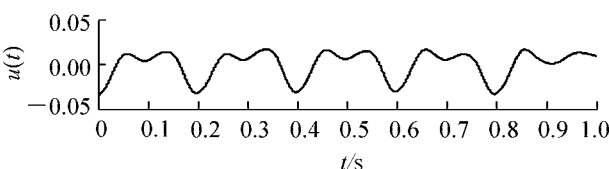
(b)未处理端点效应时分解 $x(t)$ 得到的第二个 PF 分量



(b)处理端点效应时分解 $x(t)$ 得到的第二个 PF 分量



(c)未处理端点效应时分解 $x(t)$ 得到的残余分量



(c)处理端点效应时分解 $x(t)$ 得到的残余分量

图 3 未处理端点效应时的 PF 分量和残余分量 图 4 处理端点效应时的 PF 分量和残余分量
出 LMD 方法能够从复杂的原始信号中解调出相对简单的分量。

由于使用了 LabVIEW 进行并行编程,程序运算速度较快,通过 5 次 LMD 运算的测试,记录每次求得 3 个 PF 分量及其瞬时幅值函数和瞬时相位函数并作图所用的时间,得到平均用时为 0.98 s,故可满足在线检测的需求。

4 列车轴承故障诊断实例

利用石家庄铁道大学机械工程学院自行研制的铁路列车轮对滚动轴承故障诊断试验台对目前在线运营车辆上常用的 352226X2-2RZ 型滚动轴承进行试验研究,试验台如图 5 所示。试验中所使用的故障轴承为北京铁路局石家庄电力机务段提供的 352226X2-2RZ 型轴承,其主要技术参数为:中径 176.29 mm,滚子直径 24.74 mm,接触角 8.833° ,滚子数 20 个。该轴承在段修过程中发现外圈存在一处剥离,在 469 r/min 的情况下,对故障轴承进行测试,通过其技术参数可计算出其故障特征频率为 67.327 Hz。

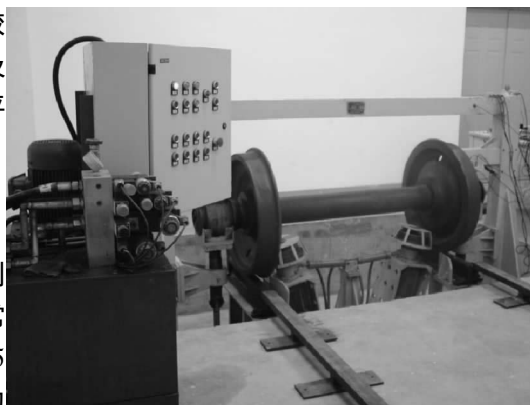


图 5 铁路列车轮对滚动轴承故障诊断试验台

使用美国国家仪器(NI)公司的 CompactDAQ 9172 机箱配合 9233 数据采集卡对轴承运转时的振动加速度信号进行采集,采样率为 5 120 Hz。采集得到图 6 所示的信号,该信号非常复杂,故障特征信息已经

被完全湮没。通过 LMD 方法对采样长度为 5 120 点的信号进行分解,分别进行 16 次、6 次、12 次、27 次、8 次迭代,得到 5 个 PF 分量和 1 个剩余分量,用时约 1.643 s。对第一个 PF 分量 $PF_1(t)$ 的瞬时幅值进行频谱分析,得到如图 7 的频域图形,从图 7 中可以看到轴承故障特征频率及其倍频成分明显,可以很好地说明轴承存在外圈剥离故障。

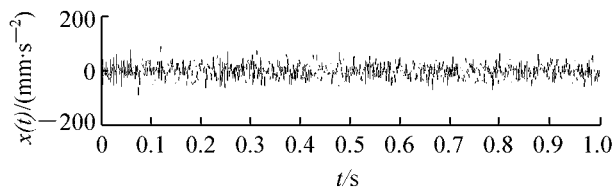
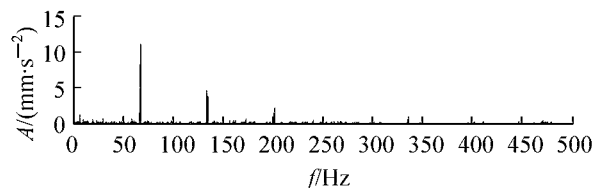


图 6 振动加速度信号时域图形

图 7 $PF_1(t)$ 的频谱

由于信号采集于试验台,故信号噪声较小,在实际应用中由于来自于轮对、铁轨以及车身等部位的噪声,信号中会混有幅值较大的、频率较低的噪声。因此在实际车辆检测时,可采用先进行高通滤波的方式对信号进行预处理再进行 LMD 解调、分析的方式。

5 结论

LMD 方法是一种自适应信号解调方法,对于非线性非平稳信号处理有较大优势。该方法降低了传统解调方法中的解调误差,避免了负频率现象的产生,其采用的滑动平均法也不易出现欠包络和过包络现象。本文通过 LabVIEW 编程实现了 LMD 方法并改善了端点效应对解调精度的影响,通过仿真信号的分析 and 列车轴承故障信息的成功提取,证明其具备优良的性能,能够应用于工程实践。作为一种较新的信号处理方法,LMD 方法中还有许多理论问题需要研究、完善,更有大量的问题需要在实践中发掘、检验。相信随着研究的不断深入,LMD 方法在工程中的应用将会越来越广泛。

参 考 文 献

- [1] Smith J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data[J]. Journal of the Royal Society Interface 2005, 2(5): 443-454.
- [2] Wang Y X, He Z J, Zi Y Y. A comparative study on the local mean decomposition and empirical mode decomposition and their applications to rotating machinery health diagnosis[J]. Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of The ASME 2010, 132(2): 1-10.
- [3] Liu W Y, Zhang W H, Han J G et al. A new wind turbine fault diagnosis method based on the local mean decomposition[J]. Renewable Energy 2012, 48: 411-415.
- [4] Cheng J S, Zhang K, Yang Y. An order tracking technique for the gear fault diagnosis using local mean decomposition method[J]. Mechanism and Machine Theory 2012, 55: 67-76.
- [5] Wang Y X, He Z J, Xiang J W et al. Application of local mean decomposition to the surveillance and diagnostics of low-speed helical gearbox[J]. Mechanism and Machine Theory 2012, 47: 62-73.
- [6] 沈路, 周晓军, 张志刚, 等. Hilbert-Huang 变换中的一种端点延拓方法[J]. 振动与冲击 2009(8): 168-171.

LMD Method Based on LabVIEW and Its Application to Fault Diagnosis of Train Bearing

Wang Peng¹, Li Xiaoliang²

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Shangdong Laiwu Power supply Company, Laiwu 271100, China)

Abstract: Fault diagnosis of train bearing is an important method to ensure the security of railway. The key to the fault diagnosis is the method of signal processing. The local mean decomposition (LMD) is a self-adapted signal processing method with a good performance in nonlinear nonstationary signal processing. Programming with LabVIEW, which is widely used in measurement, the LMD method is achieved, building a high speed, reliable and portable system combined with LMD and virtual instrument technology. With the verification of simulation and wheel set experiment, the improvement method is verified useful in practical application.

Key words: LabVIEW; LMD; fault diagnosis

(责任编辑 刘宪福)