

小波域二维隐 Markov 模型滤波方法*

叶大鹏 丁启全 吴昭同

【摘要】 针对旋转机械工作过程中产生非平稳信号的特点,在分析非平稳振动信号小波分解后同层小波数和层间小波系数之间关系的基础上,结合二维隐 Markov 模型(2D-HMM)拓扑结构的表达能力,提出小波域2D-HMM滤波方法,并给出了具体的实现步骤,最后通过 Bently-Nevada 转子试验系统的实测信号验证算法的有效性。结果表明:小波域 2D-HMM 滤波算法能够有效地去除非平稳振动信号的噪声。

关键词: 旋转机械 振动信号 二维隐 Markov 模型 小波分析 滤波

中图分类号: TH17; TN911.7 **文献标识码:** A

Filtering Method Based on Wavelet 2D-hidden Markov Model

Ye Dapeng¹ Ding Qiquan² Wu Zhaotong²

(1. Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

The 2-D hidden Markov model (2D-HMM) has the ability of representing the signals, which are non-stationary and worse reappearance in the rotor run-up process. Analyzing the relationship of different level wavelet coefficients and the same levels, a new filtering method based on wavelet 2D-HMM was proposed and its detail steps were presented. Finally, this method was validated by the data collected from Bently-Nevada rotor experimental system (Model 24755). The results demonstrate that it is effective to remove the noise of non-stationary signals of rotor system.

Key words Rotating machinery, Vibration signal, 2D-HMM, Wavelet analysis, Filtering

引言

基于振动信号分析方法的机械故障监测与诊断、系统参数识别的前提是^[1~2]:在分析中所采用的信号必须能够真实可靠地反映出系统的特性。然而,由于实测振动信号中存在着各种干扰,在对振动信号进行分析之前,往往要进行滤波处理。小波消噪、隐 Markov 模型滤波等各种新理论被应用于该领域中,取得了一定的效果^[3~5]。

工程实际中存在大量非平稳、非高斯信号,因而采用单一滤波处理难以得到满意的效果。Crouse 等人在分析小波变换的特点后,考虑到信号经小波处理后得到的系数之间相关性,结合隐 Markov 模型(HMM)的特点,将小波系数看成是 HMM 的观测

变量,用链状或树状的 HMM 建立小波系数模型,描述小波系数之间的关系,并对信号进行滤波处理,取得了较好的效果^[6]。该方法只考虑了不同层小波系数之间关系,显然是不全面的。二维隐 Markov 模型(2D-HMM)作为 HMM 的改进模型,由内部 HMM(I-HMM)和外部 HMM(E-HMM)构成,综合利用 2D-HMM 的 I-HMM 和 E-HMM,分别从时间和尺度两个维度上同时表达小波系数和尺度系数,进而使表达信号的小波分解系数的模型更完善。

1 基本理论

1.1 二维隐 Markov 模型(2D-HMM)

二维隐 Markov 模型(2D-HMM)是从 HMM 演变而来,其拓扑结构如图 1 所示。

收稿日期:2007-12-18

* 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50075079)

叶大鹏 福建农林大学机电工程学院 副教授, 350002 福州市

丁启全 浙江大学机械与能源工程学院 教授 博士生导师, 310027 杭州市

吴昭同 浙江大学机械与能源工程学院 教授 博士生导师

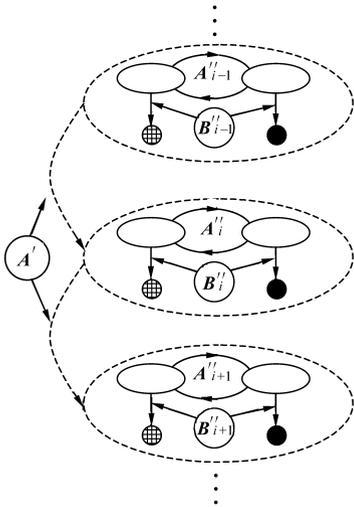


图 1 2D-HMM 的拓扑结构图

Fig.1 Topological structure of 2D-HMM

图中虚线椭圆表示 E-HMM 的状态(图中分别为第 $i-1, i$ 和 $i+1$ 状态), A' 为 E-HMM 的状态转移矩阵, 它表示状态之间的转移关系。每个 E-HMM 中均包含一个 I-HMM, 用实线椭圆表示 I-HMM 包含的状态(图中为两状态, 也可以不相同), A_i^j 表示 E-HMM 处于状态 i 时所对应 I-HMM 的状态转移矩阵, 同样它也表示 I-HMM 的状态之间的转移关系; 而 B_i^j 为 E-HMM 处于状态 i 时所对应 I-HMM 的输出矩阵或分布, 它反映了状态与观测之间的关系; 网格状圆或黑色的圆点表示模型的观测向量(可为离散或连续变量)。此外, 与经典的 HMM 相似, 还需要初始状态概率矢量、E-HMM 和 I-HMM 的状态数等表达完整的模型。2D-HMM 的基本算法有 3 个, 分别是用于计算概率的前向-后向算法、求解最优状态路径的 Viterbi 算法和训练模型的 Baum-Welch 算法。其具体公式详见文献[7]。

1.2 小波分析

小波分析是一种性能优良的时-频分析工具, 具有局部性、多尺度性、压缩性、持续性和聚集性等特性。它通过小波函数 $\psi(t)$ 的伸缩和平移, 以及尺度函数 $\phi(t)$ 的平移来表示信号[8], 即

$$\begin{cases} \psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \\ \phi_{j,k}(t) = 2^{-j_0/2} \phi(2^{-j_0}t - k) \end{cases} \quad (j, k \in \mathbf{Z}) \quad (1)$$

则信号 $x(t)$ 可以表示成

$$x(t) = \sum_k u_k \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j=-\infty}^{j_0} \sum_k v_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (2)$$

其中 $u_k = \int x(t) \phi_{j_0,k}^*(t)$

$$v_{j,k} = \int x(t) \psi_{j,k}^*(t)$$

式中 u_k ——尺度系数, 反映信号近似部分

$v_{j,k}$ ——小波系数, 表达信号的细节部分

j ——尺度因子, 其值越小所对应的分辨率越高, 反之越低

j_0 ——最低分辨率级所对应的尺度因子

k ——平移因子

实际上, $x(t)$ 的分辨率是有限的, 可根据应用要求对 j 求有限和。

2 小波域 2D-HMM 滤波

2.1 小波域 2D-HMM 滤波原理

Crouse 等人采用 Daubechies 系列小波对带有噪声的信号作小波变换, 利用高斯混合和 HMM 建立小波系数模型, 最后再利用训练得到的模型估计出原始信号, 从而有效地去除了噪声。其基本假设是: 一个典型信号经小波分解后, 其小波系数是由少量的大系数和大量的小系数组成。他将每个小波系数建模成两高斯混合模型, 然后, 再利用 HMM 来定义概率图, 用于表达不同尺度小波系数之间的耦合关系[6]。

参照 Crouse 等人提出的小波域 HMM 滤波的思想, 同时考虑到时间轴和尺度轴上分解后的小波系数(尺度系数和小波系数的总称)的关系, 利用 2D-HMM 中的 I-HMM 的各状态之间转移关系来描述同一尺度下不同时刻系数之间关系, 而用 E-HMM 中各状态之间的关系来表示不同尺度下系数之间的依赖关系。把时间轴和尺度轴上的两维系数同时综合到 2D-HMM 模型中。其概率模型结构如图 2 所示。

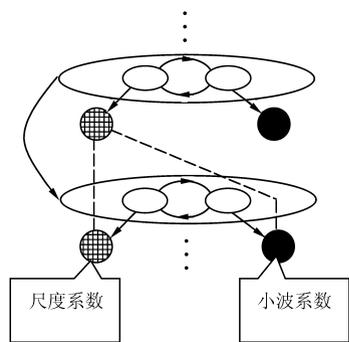


图 2 小波 2D-HMM 概率图

Fig.2 Probability scheme of wavelet 2D-HMM

图中虚线连接表示相邻分辨率的系数间关系(由小波的多分辨率算法决定)。

2.2 滤波实现步骤

采用小波域 2D-HMM 模型的信号滤波方法主要由 2 部分组成: 模型训练, 给定一组训练数据, 通过 Baum-Welch 算法估计出模型参数; 滤波实现, 对小波系数采用贝叶斯估计得到估计值, 最后重构得到滤波结果。其流程如图 3 所示, 图中的测试样本

与训练样本为同源信号。

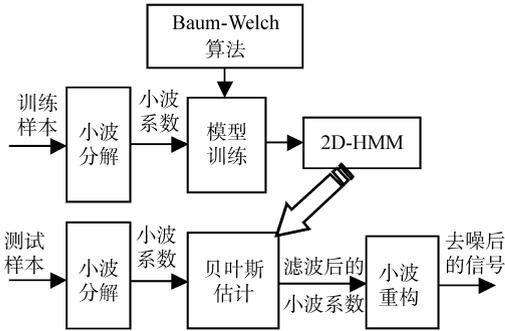


图3 小波 2D-HMM 滤波流程图

Fig.3 Denoising flowchart of wavelet 2D-HMM

其滤波实现的具体步骤为:①根据实际分析的信号,选取合适的小波函数、尺度函数及分解层数,根据文献[8]提供的算法,对待处理信号进行多尺度的小波分解,得到相应的尺度系数和小波系数。②根据训练得到的模型参数,对步骤①分解得到的系数,利用贝叶斯估计获得相应的估计值,即滤波后的系数。③利用小波重构算法对处理后的系数进行重构,得到滤波后的信号。

3 试验验证

为了进一步验证算法的有效性,在 24755 型 Bently 转子试验台上进行转子不平衡升速过程模拟试验。转子由 500 r/min 上升到 8 000 r/min,每增加一定速度采样一次,采样频率为 3 000 Hz,每次采样 1 024 个点,试验设置详见文献[7]。图 4 给出其中一段典型样本的 1 024 个数据点的滤波前后时域波形和相应的幅值谱。

分析中选用 Daubechies5 小波,分解层数为 5,小波的分解和重构算法详见文献[8]。2D-HMM 模型的参数具体设定如下: E-HMM 选用上下型的 HMM 结构(如图 1 所示),选取其隐状态数为 5; I-HMM 为二状态各态历经的 HMM,选用双高斯混合来表达 I-HMM 状态与输出(小波系数和尺度系数)的关系。在进行小波 2D-HMM 滤波时,依据设定的模型参数和选定的小波类型,先利用典型样本(研究中共测试了 50 个样本,选其中 30 个为典型样

本,其余部分作为测试样本)训练生成 2D-HMM 模型,然后再利用模型对信号进行滤波处理。

从图 4 中的原始信号时域波形和相应的谱,可以看出原始信号中存在着高频噪声,经小波 2D-HMM 数字滤波处理后,高频噪声得到了明显抑制,取得了较好的滤波效果。

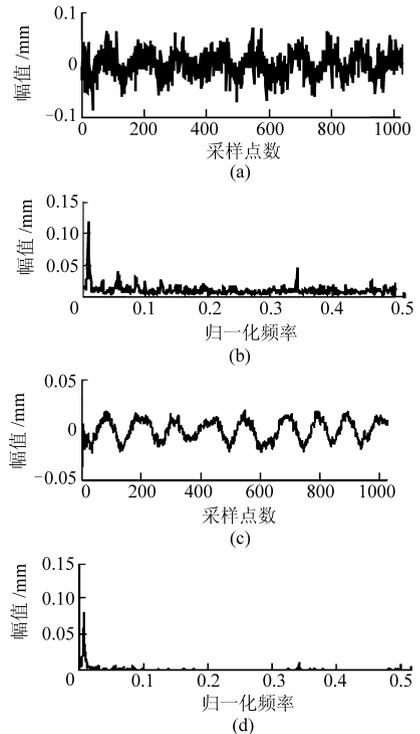


图4 滤波前后信号与幅值谱

Fig.4 Wave forms and spectrums

(a) 滤波前原始信号 (b) 滤波前幅值谱
(c) 滤波后时域波形 (d) 滤波后幅值谱

4 结束语

通过分析小波域 HMM 滤波的特点,在 Crouse 等人的研究基础上,引入 2D-HMM 表达信号经小波分解后的系数,从概率图的角度,深入讨论了 2D-HMM 模型表达小波系数的原理,并给出了具体的实现步骤。最后,通过 Bently-Nevada 转子试验台的转子不平衡升速过程模拟试验的实测信号,对这一滤波方法进行验证。研究结果表明,该方法能够有效地去除转子升速过程振动信号的噪声。

参考文献

- 1 Randall R B. State of the art in monitoring rotating machinery-part 1[J]. Sound and Vibration, 2004, 38(3): 14~21.
- 2 Randall R B. State of the art in monitoring rotating machinery-part 2[J]. Sound and Vibration, 2004, 38(5): 10~17.
- 3 Anderson B D O. From wiener to hidden Markov models[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1999, 19(3): 41~51.
- 4 Sofia A, Tobias R, Rolf J. Linear optimal prediction and innovations representations of hidden Markov models[J]. Stochastic Processes and Their Applications, 2003, 108(1): 131~149.

组合,可以得到无穷多个组合信息。结合信号的特点选择合适的组合信息能够更为精确地对突变点进行识别和定位。

(3)结合复小波变换的优点,把复小波变换应用

到汽车主减速器故障特征提取中。通过对比主减速器主从动齿轮啮合间隙不当的故障信号经2种小波变换的结果发现,在故障特征识别和定位上复Morlet小波变换优于实小波变换。

参 考 文 献

- 1 孟庆华,周晓军,吴跃成,等. 基于小波免疫系统的车辆总成故障检测[J]. 汽车工程, 2004, 26(5): 619~622.
Meng Qinghua, Zhou Xiaojun, Wu Yuecheng, et al. Vehicle fault diagnosis based on wavelet-immune system[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(5): 619~622. (in Chinese)
- 2 于德介,程军圣,成琼. 基于复小波变换相位谱的齿轮故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(4): 275~277.
Yu Dejie, Cheng Junsheng, Cheng Qiong. Application of phase power spectrum based on complex wavelet transform to fault diagnosis of gears[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2004, 24(4): 275~277. (in Chinese)
- 3 姜洪开,何正嘉,段晨东,等. 基于提升方法的小波构造及早期故障特征提取[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(5): 494~498.
Jiang Hongkai, He Zhengjia, Duan Chendong, et al. Wavelet construction based on lifting scheme and incipient fault feature extraction[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(5): 494~498. (in Chinese)
- 4 张淑清,陈艳,徐红,等. 基于小波分析的机械系统振动信号故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 756~757.
Zhang Shuqing, Chen Yan, Xu Hong, et al. The fault diagnosis of vibration signal for machinery system using wavelet analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 756~757. (in Chinese)
- 5 张昊,石铁洪,刘沛. 基于双正交小波和复小波的次同步谐振检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 3(3): 12~15.
Zhang Hao, Shi Tiehong, Liu Pei. The detection of torsional oscillation based on the bi-orthogonal wavelet and complex wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 3(3): 12~15. (in Chinese)
- 6 徐长发,李国宽. 实用小波方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001: 21~52.
- 7 Huang S J, Cheng T, Huang C L. Application of Morlet wavelets to supervise power system disturbances[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(1): 235~243.
- 8 崔雪梅. 以复小波提取局部放电信号特征的原理及方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
Cui Xuemei. Extraction of partial discharge signal feature with complex wavelet transform[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)
- 9 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与MATLAB7实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

(上接第 186 页)

- 5 丁康,陈健林,苏向荣. 平稳和非平稳振动信号的若干处理方法及发展[J]. 振动工程学报, 2003, 16(1): 1~10.
Ding Kang, Chen Jianlin, Su Xiangrong. Processing methods and developments for stationary and non-stationary vibration signal[J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(1): 1~10. (in Chinese)
- 6 Crouse M S, Robert D N, Baraniuk R G. Wavelet-based statistical signal processing using hidden Markov models[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1998, 46(4): 886~902.
- 7 叶大鹏. 基于2D-HMM的旋转机械故障诊断方法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
Ye Dapeng. Application and research on rotating machinery fault diagnosis based on two dimensional hidden Markov model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- 8 Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674~693.