

齿轮箱状态监测中的振动信号多标度分析

李 鹏, 孔凡让, 何清波

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 合肥 230027)

摘 要: 利用齿轮箱振动信号的自相似性, 以局域标度分析算法提取齿轮箱振动信号中包含的微弱设备状态特征信息, 将局域标度指数与主成分分析法相结合, 通过提取局域标度指数多元统计量的低维主分量对齿轮箱状态进行监测。实验结果证明, 该方法具有较高的检测效率和准确识别率。

关键词: 标度指数; 局域标度分析; 主成分分析; 齿轮箱; 状态监测

Multiscale Analysis on Vibration Signal in Gearbox Condition Monitoring

LI Peng, KONG Fan-rang, HE Qing-bo

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

【Abstract】 Based on the self-similarity in vibration time series of gearboxes, local scaling analysis is developed to extract the weak information in vibration signals. Combining local scaling exponents and Principal Component Analysis(PCA), low dimensional principal components of local scaling exponents statistics are used to monitor the conditions of gearboxes. Experimental results indicate the proposed method has high efficiency and correct rate on gearbox condition monitoring.

【Key words】 scaling exponent; Local Scaling Analysis(LSA); Principal Component Analysis(PCA); gearbox; condition monitoring

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.14.082

1 概述

齿轮箱是现代机械设备的重要组成部分, 齿轮磨损是齿轮箱常见的故障之一。齿轮磨损造成的冲击振动会产生噪声, 降低设备性能, 严重时甚至可能导致设备瘫痪。而振动信号能够直接反映设备状况且易于采集, 因此, 对振动信号进行监测与分析对及时把握设备状况具有十分重要的意义^[1]。

文献[2]提出的分形概念首次对自然界广泛存在的自相似现象进行了系统建模。分形时间序列(如分形高斯噪声和分形布朗运动)具有相似的功率谱形态: $S(f) \sim 1/f^\beta$, 其中, β 为标度指数。通过对标度指数的分析, 可以获得信号内在的结构特征, 进而实现对信号的解读和分类。

在实际应用中, 绝大多数分形信号具有多标度特征, 即包含无限个奇异点, 标度指数随时间而变化, 因此, 传统的标度指数无法对这类分形时间序列进行精确衡量。局域标度指数(Local Scaling Exponents, LSE)是单标度分形概念的推广, 其分别计算信号各时刻的标度指数, 形成标度指数谱, 可以对多标度信号进行更加精确的描述。本文将齿轮箱振动信号的局域标度指数与主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)相结合, 提出了一种基于局域标度指数统计量的低维主分量监测齿轮箱工作状态的新方法。

2 基于局域标度分析的振动信息提取方法

2.1 局域标度分析

与 Hurst 指数一样, 标度指数是分形信号的基本特征之一, 被广泛地用于生物、图像、网络、模式识别等领域^[3]。分析齿轮箱的振动信号可以发现, 由制造、装配误差及其他部件影响产生的振动信号一般是平稳随机信号。一旦齿轮箱出现局部故障, 当故障齿轮的损伤点与其他齿轮发生啮合时, 都将产生冲击作用, 导致齿轮箱系统的短时高频谐振。这种

高频振动的突出表现就是其非平稳和非线性特征, 并伴随着明显的尺度自相似现象。但其持续时间极短, 常常被系统的其他信号所淹没。

去趋势波动分析(Detrended Fluctuation Analysis, DFA)方法^[4]自提出以来, 已经成为在非平稳时间序列上探测分形标度特性与长程相关性时广泛使用的技术。与同类技术相比, DFA 计算量小, 效果良好, 具体算法见文献[5]。为了更有效地分析多标度信号, 本文基于 DFA 算法提出了使用局域标度分析(Local Scaling Analysis, LSA)算法对齿轮箱信号进行尺度分析的新思路。该算法计算每一个数据点的局域标度指数, 是对 DFA 算法的一种推广, 能够更加精细地描述齿轮箱振动信号结构。对于 FBM 类型的连续时间信号 $x(t)$, LSA 的主要流程如下:

(1)对每个信号点 t 计算尺度 s 下的滑动平均:

$$\mu(t|s) = \phi(t|s) \otimes x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(t-\tau|s)x(\tau)d\tau \quad (1)$$

其中, 权重函数为:

$$\phi(t|s) = \frac{u(t) - u(t-s)}{s} \quad (2)$$

(2)计算信号点二阶中心距(方差):

$$m_2 = (t|s) = \phi(t|s) \otimes [x(t) - \mu(t|s)]^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(t-\tau|s)[x(\tau) - \mu(\tau|s)]^2 d\tau \quad (3)$$

(3)对所有无标度区尺度重复步骤(2), 得到 i 点的波动函

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075379, 51005221); 中央高校基本科研业务费基金资助项目

作者简介: 李 鹏(1984—), 男, 博士研究生, 主研方向: 信号处理, 设备在线监测与故障诊断; 孔凡让, 教授、博士; 何清波, 副教授、博士

收稿日期: 2010-12-11 **E-mail:** lixpeng@mail.ustc.edu.cn

数为:

$$F_i(s) = \sqrt{m_2} \quad (4)$$

对 $\ln(F_i) - \ln(s)$ 作图, 图中拟合直线的斜率即为信号点 i 的局域标度指数。

(4) 对信号所有数据点重复步骤(2)~步骤(3), 即可获得信号完整的局域标度指数谱。

作为与 DFA 算法的对比, 在所有尺度下计算 LSA 算法的波动函数均值:

$$F(s) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i(s) \quad (5)$$

对 $\ln(F) - \ln(s)$ 作图, 用最小二乘法计算线性回归, 直线斜率即为 DFA 算法得到的信号的全局标度指数。

局域标度分析将 DFA 的子区间概念细化到每一个数据点, 通过权重函数调节不同尺度下的滑动平均和二阶中心距, 得到每一个时刻的波动函数, 它比 DFA 算法更加重视信号局部的精细结构。

2.2 主成分分析

局域标度指数虽然可以精细地描述信号结构, 但由于其数据长度与原信号长度相同, 因此不利于进行模式识别。主成分分析是一种掌握事物主要矛盾的有效的多元统计分析工具, 它可以将高维数据投影到较低维空间, 用原有变量的线性组合对原数据进行降维, 有效地解决局域标度指数数据量偏大的问题。

设有信号向量矩阵 x , 其列向量 x_i 为某一状态样本对应的 d 维模式向量, 则可以得到该矩阵的协方差矩阵为:

$$R_x = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x}) \quad (6)$$

其中, N 是训练样本的数量; \bar{x} 是各样本模式向量的均值向量。对 R_x 做特征值分析, 即求解下式:

$$\lambda v = R_x v \quad (7)$$

其中, λ 和 v 分别是 R_x 的特征值和特征向量。最多可以得到 d 个特征值和对应的 d 个特征向量, 将样本投影到特征向量即可得到该方向的主分量特征。80%以上的原始数据信息通常保留在前面少数几个主分量中, 因此, 用低维主分量可以近似表示原始数据结构。

3 基于 LSA-PCA 的齿轮箱状态监测

3.1 实验环境

实验基于一台润滑油摩托车 4 级变速齿轮箱。变速箱放置在四脚减震台上, 由电机带动主动轴匀速转动, 电机转速设为 1 420 转/min, 采样频率为 16 384 Hz。振动信号由固定在齿轮箱箱体表面的加速度传感器进行采集。需要特别指出的是, 在待测齿轮轮毂外侧安装了一台反射式激光计数器, 齿轮转动一周将产生一个脉冲信号, 作为齿轮转动周期同步信号。实验装置如图 1 所示。

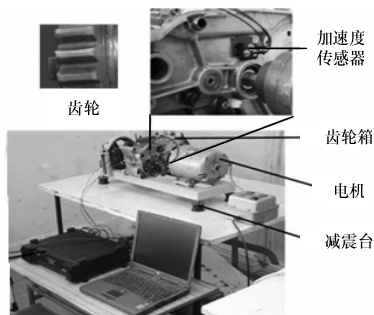


图1 实验环境

在实验中, 变速箱经历由正常工作到发生断齿的完整磨损过程。根据齿轮磨损程度, 整个过程被分为正常工作、30%磨损、70%磨损和断齿 4 种状态。4 种状态的时域信号经标准化后如图 2 所示, 除断齿故障信号存在明显的周期性冲击外, 其他 3 种信号无法直观地区分其所属状态。下面对采集到的振动信号进行 LSA-PCA 分析, 验证本文方法的有效性。

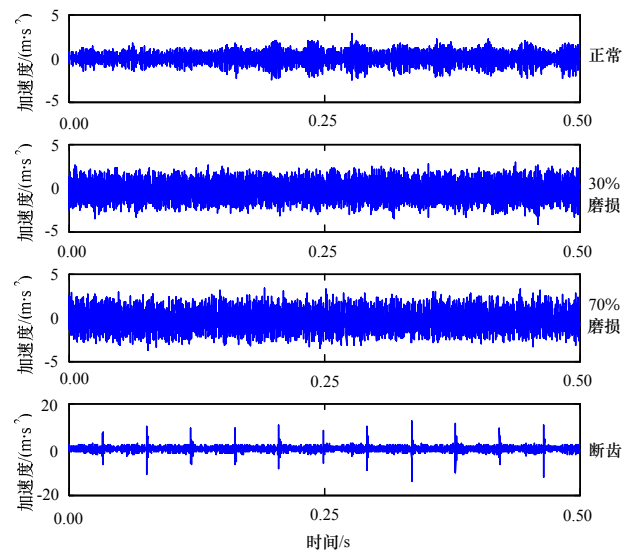


图2 4种状态下的齿轮箱振动信号

3.2 局域标度指数计算

正常状态与 70% 磨损下的振动信号双对数坐标功率谱密度如图 3 所示, 功率谱曲线具有近似的线性形态, 即功率谱符合幂律, 信号具有分形特征。使用线性回归得到直线的斜率介于 2.1 与 2.5 之间, 振动信号确认为分形布朗运动, 适合使用 LSA 方法。

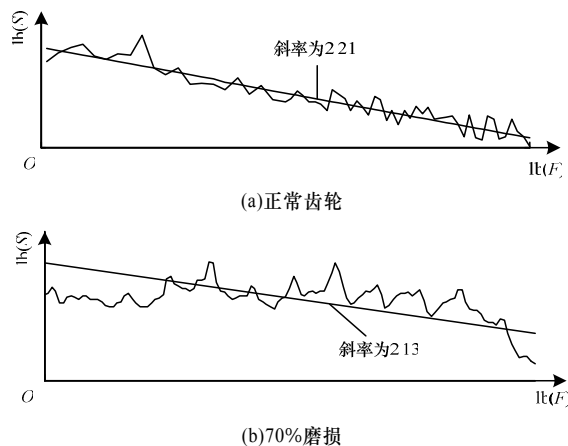


图3 基于 PSD 的信号类型判断

根据“尺度-波动函数”双对数坐标曲线的线性程度可以确定信号的无标度区。本文选择 10~100 尺度进行分析并发现, 当尺度小于 20 时, 结果不具有统计意义; 当尺度大于 70 时, 不存在明显的尺度现象。因此, 可以确定该信号的无标度区间为 20~70。

在无标度区计算信号局域标度指数, 结果如图 4 所示。正常齿轮振动信号的局域标度指数形态比较杂乱, 没有明显的周期现象。当齿轮经历磨损过程时, 局域标度指数逐渐出现幅度超过 1 的周期性峰值。这是由于齿轮故障点周期性啮合时激励齿轮箱产生结构共振, 这种共振信号具有较强的尺度行为, 相邻的信号点有较强相关性。30% 磨损下的局域标

度指数在某些时刻已经出现了周期峰值(如 0.3 s 左右)。70% 磨损下的局域标度指数的周期性峰值已经非常明显, 峰值间隔约为 700 个采样点, 折合约 40 ms, 与故障齿轮的旋转频率吻合。发生断齿故障时, 相同周期的峰值更加明显, 幅度大幅上升。这些现象证明, 齿轮箱振动信号的局域标度指数对于齿轮磨损故障非常敏感, 两者存在非常强的关联性, 即齿轮磨损点的啮合振动往往伴随着该时刻局域尺度因子的剧烈增大。但局域标度指数数据量大, 不易直接进行模式识别, 因此, 之后使用 PCA 进行数据压缩, 获得易于使用的低维特征。

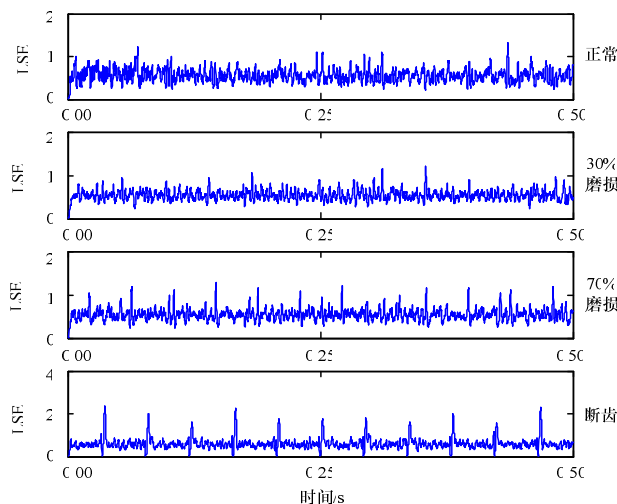


图4 4种状态下振动信号的局域标度指数

3.3 齿轮箱磨损状态识别

时域统计特征是描述时间序列的重要而有效的参数。由于电机转速可能存在一定的波动, 齿轮的旋转周期也会有微小差异, 因此选取全局意义上的统计量进行研究是非常必要的。使用激光计数器产生的周期同步信号, 对 4 种原始信号分别提取 40 个周期的信号样本(每周期约 40 ms, 700 个采样点, 包含 1 次故障齿啮合过程), 其中, 20 个作为训练集; 20 个作为测试集。选取绝对均值、最大峰值、有效值、方根幅值、方差、斜度、峭度、峰值因子、波形因子、脉冲因子、裕度因子等 11 个统计参数组成特征向量, 作为主成分分析对象。分别对训练集中的原始信号和局域标度指数的 11 维统计量进行 PCA 特征提取, 并选择第一、第二维主分量进行分类。通过对比图 5 与图 6 的结果可以看出, 原始信号统计量的第一、第二维主分量在 30% 与 70% 磨损情况下存在大量的重叠, 不能将 4 种工作状态成功区分; 而使用局域标度指数统计量的第一、第二维主分量进行分类时, 4 种状态聚类性良好, 状态之间也有较大的间距, 具有很好的分类效果。

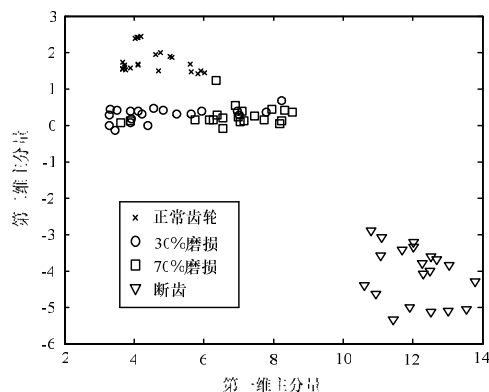


图5 原始信号统计量二维主分量聚类结果

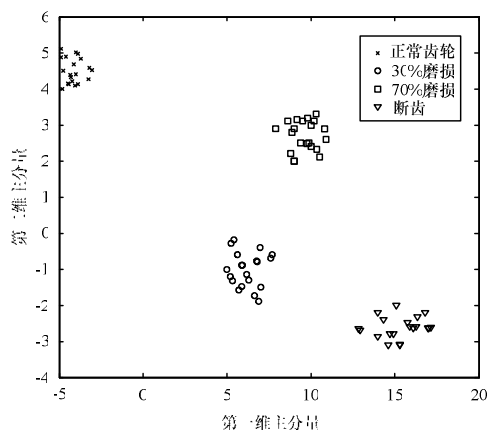


图6 局域标度指数统计量二维主分量聚类结果

根据训练集各状态局域标度指数统计量的第一、第二维主分量聚类结果, 容易得到各状态的几何中心。将测试样本的局域标度指数统计量投影到训练样本集模式矩阵的第一、第二维特征向量上, 得到相同的第一、第二维主分量表示。分别计算某一测试样本与训练集 4 种状态的几何中心的欧式距离, 而该样本应该与其所属状态的几何中心距离最小。根据此方法, 得到如图 7 所示的实验结果, 其中, 横坐标为测试集样本, 1~20 为正常状态, 21~40 为 30% 磨损, 41~60 为 70% 磨损, 61~80 为断齿。图 7 自上而下依次为测试集各样本与训练集的正常状态、30% 磨损状态、70% 磨损状态以及断齿状态的几何中心的欧式距离。可以看到, 各类别的测试样本与其对应的该类别的训练样本的二维主分量中心具有最小的距离, 根据“距离越小, 相似度越大”的原则, 全部测试样本得到了正确的分类, 证明本文方法具有良好的识别效果。

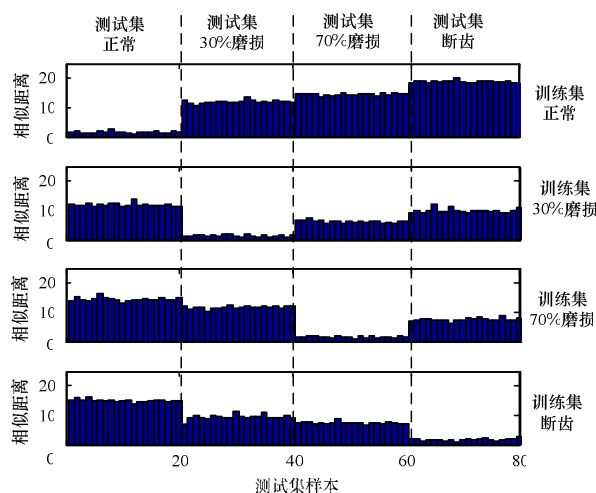


图7 测试集各状态样本与训练集 4 种状态的相似距离

4 结束语

本文提出了一种基于齿轮箱振动信号自相似现象进行特征提取与故障诊断的方法。通过对去趋势波动分析的进一步细化而发展出的局域标度分析算法更加符合齿轮箱振动信号的特点, 能够更精细地描述信号结构以检测出微弱的高频共振带来的周期尺度现象, 实现齿轮箱的状态监测。而利用 PCA 自动提取局域标度指数统计量的主分量特征, 能够有效压缩数据维数, 便于进行模式识别。实验结果证明了本文提出的“局域标度-主成分”分析方法应用于齿轮箱状态监测的有效性。

(下转第 247 页)