

运用 EMD 分形盒维数的电梯机械故障诊断

陈建灿, 刘晓梅

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对电梯机械故障的诊断, 提出经验模态分解(EMD)和分形盒维数的诊断方法. 利用 EMD 对电梯正常运行和各故障工况时的加速度信号按频率高低依次分解, 得到分解后的固有模态函数(IMF). 通过信号重组得到去除背景信号和噪声后的振动信号, 再利用分形盒维数计算其重组信号和各分量 IMF 的盒维数. 实验计算表明: 各工况的盒维数具有良好有效的区分度和区间范围.

关键词: 电梯; 经验模态分解; 盒维数; 故障诊断

中图分类号: TH 211.6; TH 165.3

文献标志码: A

电梯主要是由机械系统、拖动系统和电气控制部分组成. 拖动系统也可以归入电气系统, 所以电梯的故障就可以分为机械故障和电气故障两大类. 其中, 电梯的机械故障对乘客安全威胁最大, 因此, 及时诊断电梯的机械故障对保证乘客安全, 避免重大事故是非常重要的. 本文针对电梯机械故障的诊断, 提出经验模态分解 EMD 和分形盒维数的诊断方法.

1 经验模态分解法 EMD

经验模态分解法(EMD)是将任意信号分解为固有模态函数(IMF)的方法^[1], 建立以瞬时频率为表征信号变化的基本量, 以固有模态函数 IMF 为基本时频信号的新时频分析方法体系. 这一方法体系从根本上摆脱了传统信号处理理论的束缚. 不同于用很多谐波分量来代表复杂的非平稳信号的传统傅里叶变换方法, 也不同于小波变换方法, 经验模态分解法(EMD)与频率的经典定义方法相一致, 可以给出信号频率变化的精确表达式, 特别适合于非平稳信号的处理.

满足固有模态函数 IMF^[2]的两个条件:

- 1) 在整个数据集中, 其极值点个数和过零点的数目相等或最多差 1 个;
- 2) 在任意点, 由局部极大值构成的上包络和由局部极小值构成的下包络线的均值必须为零.

用 EMD 方法把信号分解成各个 IMF 的步骤^[3]如下: 先识别出时间序列信号为 $X(t)$ 的所有极值点, 然后用所有极大值点和所有极小值点分别拟合出 $X(t)$ 的上包络线 $u(t)$ 和下包络线 $v(t)$, 满足

$$v(t) \leq X(t) \leq u(t), \quad (1)$$

则上、下包络的平均曲线 $m(t)$ 为

$$m(t) = \frac{1}{2}[u(t) + v(t)]. \quad (2)$$

在理论上, 用 $X(t)$ 减去 $m(t)$ 后剩余部分就是 IMF, 用 $h_1(t)$ 表示, 即

$$h_1(t) = X(t) - m(t). \quad (3)$$

实际上, 由于包络线样条逼近的过冲和俯冲作用, 会产生新的极值影响原来极值的位置和大小. 因此, 分解得到的 $h_1(t)$ 并不完全满足 IMF 条件. 为了得到满足要求的 IMF, 进一步应用 $h_1(t)$ 代替 $X(t)$,

收稿日期: 2012-09-17

通信作者: 刘晓梅(1970-), 女, 副教授, 主要从事时间序列高阶谱分析的研究. E-mail: liuxm@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975098); 福建省自然科学基金资助项目(2012J01213)

与 $h_1(t)$ 相应的上、下包络线为 $u_1(t)$ 和 $v_1(t)$, 重复这个过程, 即

$$\left. \begin{aligned} m_1(t) &= [u_1(t) + v_1(t)]/2, & h_2(t) &= h_1(t) - m_1(t), \\ m_{k-1}(t) &= [u_{k-1}(t) + v_{k-1}(t)]/2, & h_k(t) &= h_{k-1}(t) - m_{k-1}(t), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

直到所得的 $h_k(t)$ 满足 IMF 条件. 这样就可分解得第 1 个 IMF, 即 $C_1(t)$ 和信号的剩余部分为 $r_1(t)$, 即 $C_1(t) = h_k(t)$, $r_1(t) = X(t) - C_1(t)$.

对信号的剩余部分 $r_1(t)$ 继续进行 EMD 分解, 直到所得的剩余部分为一单调信号或其值小于预定给定的值时, 分解完毕, 最终分解得到所有的 IMF 分量及余量, 即

$$r_2 = r_1 - C_2, \dots, r_n = r_{n-1} - C_n, \quad (5)$$

而原始的信号 $X(t)$ 可表示为所有的 IMF 分量及余量之和, 即

$$X(t) = C_1(t) + C_2(t) + \dots + C_n(t) + R_n(t). \quad (6)$$

2 分形盒维数及其估计

分形是指具有无限精细、非常不规则、无穷自相似结构和非整数的点集. 分形理论是基于一种尺度而研究复杂信息问题, 因此, 它对于非平稳的振动信号的处理, 与神经网络、小波分析有同样的研究价值, 应用于机械设备的振动信号的分析 and 识别.

盒维数是分形维数中的一种. 以面积为 S 的二维区域 Ω 作为考察. 如果它可以由 $N(\epsilon)$ 个边长为 ϵ 的正方形覆盖, 则 $N(\epsilon) \approx S/\epsilon^2$, 即

$$\ln N(\epsilon) = \ln S + 2 \ln \frac{1}{\epsilon}. \quad (7)$$

由此, 可得到 Ω 的维数, 即

$$\lim_{\epsilon \rightarrow \infty} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln (1/\epsilon)} = 2 = \dim(\Omega). \quad (8)$$

对于一般点集 $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, 如果它可以由 $N(\epsilon)$ 个边长为 ϵ 的 n 维超立方体覆盖, 则可定义^[4]为

$$\dim_B(\Omega) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln (1/\epsilon)}, \quad (9)$$

并称其为点集 Ω 的容积维数或盒维数. 选择不同的覆盖会导致不同的容积维数, 一般取最小计算结果作为盒维数.

非线性的混沌吸引子^[5]具有分形特征, 可在混沌吸引子 A 所占有的空间上划分很密的网格, 得到大量边长为 ϵ 的正方形(立方体), 然后对吸引子 A 所占据的小正方形(立方体)技术得到 $N(\epsilon)$, 求得 A 的近似容积维数为

$$\dim_B(A) \approx \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln (1/\epsilon)}. \quad (10)$$

3 实验设计

导靴是电梯导轨与轿厢之间的可以滑动的尼龙块, 它可以将轿厢固定在导轨上, 让轿厢只可以上下移动. 导靴上部有油杯, 可减少靴衬与导轨的摩擦力. 固定在轿厢上的导靴可以沿着安装在建筑物井道墙体上的固定导轨往复升降运动, 防止轿厢在运行中偏斜或摆动. 随着电梯的运行时间增长, 导靴和导轨的配合间隙会越来越大, 轿厢在运行中产生晃动, 甚至会出现冲击. 导靴夹紧可以增大靴衬与导轨的摩擦力, 从而加速磨损和减小电梯速度; 导靴弹簧放松(增大配合间隙)可以使导靴和导轨的配合间隙增大, 轿厢会出现晃动和冲击. 钢丝绳放松使绳与曳引轮槽之间不能处于良好的接触状态, 同样轿厢会出现晃动和冲击. 因此设计的实验电梯正常, 导靴夹紧, 导靴弹簧放松, 钢丝绳放松.

实验中采用泉州中侨富士电梯有限公司提供的实验电梯, 在轿厢运动的左右方向安装加速度传感器, 分别采集电梯在正常工作状态下和各故障状态下的加速度振动信号进行分析、处理. 在实验中采样频率设置为 1 024 Hz, 读取频率为 512 Hz. 利用美国国家仪器有限公司(NI)软件 LabVIEW 构建检测平台, 使用 PCI-604 数据采集卡、加速度传感器、信号放大器等设备进行数据的采集.

4 实验分析

4.1 EMD 分解分析

取正常状态和故障 3 加速度振动信号为例子做 EMD 分解结果,各共有 10 个 IMF,如图 1 所示.

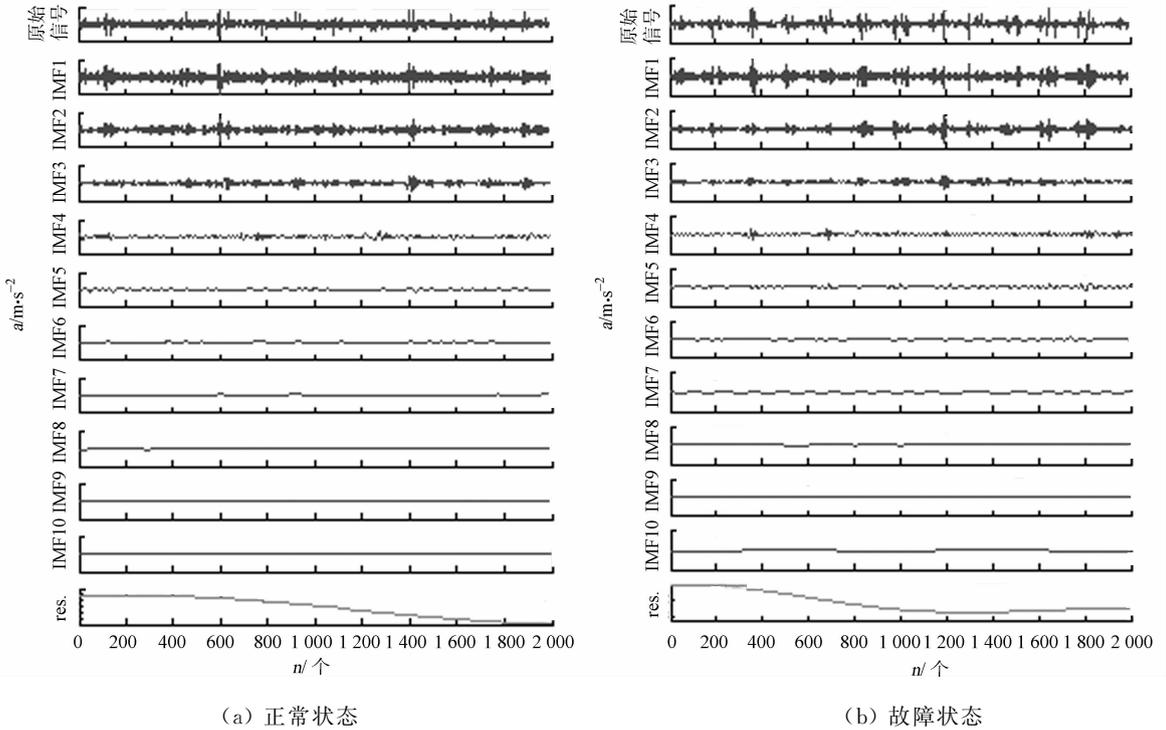


图 1 EMD 分解结果

Fig. 1 Results of EMD

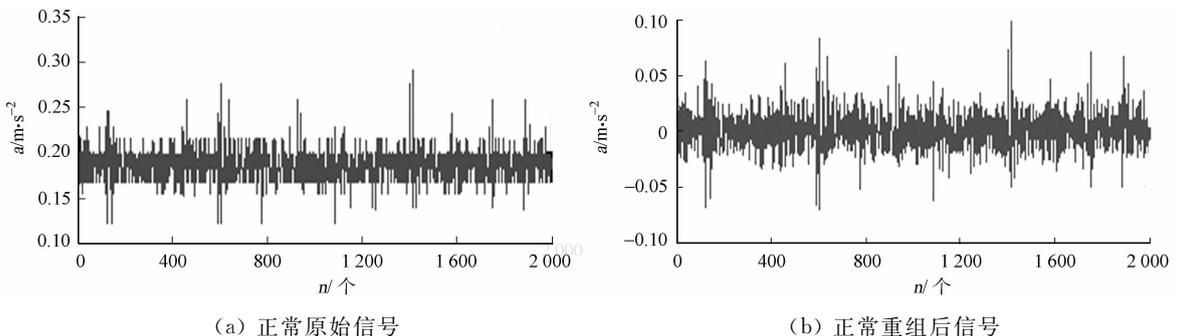
从图 1 可以看出:EMD 把信号分解成了 10 个 IMF 和余量(趋势项)之和.因为 EMD 总是先将信号中包含的最主要信息提取出来,所以信号的主要信息包含在前 3 个 IMF 中,其他为低频分量 IMF4~IMF10 和余量趋势项,其低频分量为电梯的固有频率.因此,可以将前 3 个 IMF 进行组合,这样就可以得到剔除背景信号和噪声后的振动信号.

分别对各故障加速度信号进行 EMD 分解,分解出 IMF 的个数:正常状态为 10,故障 1 为 9,故障 2 为 9,故障 3 为 10.各主要信息都包含在前 3 个 IMF 中,分别对其进行重组得到重组后的振动数据,如图 2 所示.

4.2 盒维数计算

分别对重组后的振动信号和各前 3 个 IMF 进行盒维数计算,得到的盒维数以及盒维数计算图(图 3 中斜率的大小即为盒维数),分别如表 1 和图 3 所示.

从表 1 和图 3 中可以知道:重组信号的盒维数,故障类型不相同,分形盒维数也不相同.故障 2 的分形盒维数最大可达到 1.639 8;故障 3 的分形盒维数最小为 1.536 5;正常和故障 1 的分形盒维数分别为 1.582 5 和 1.600 0.



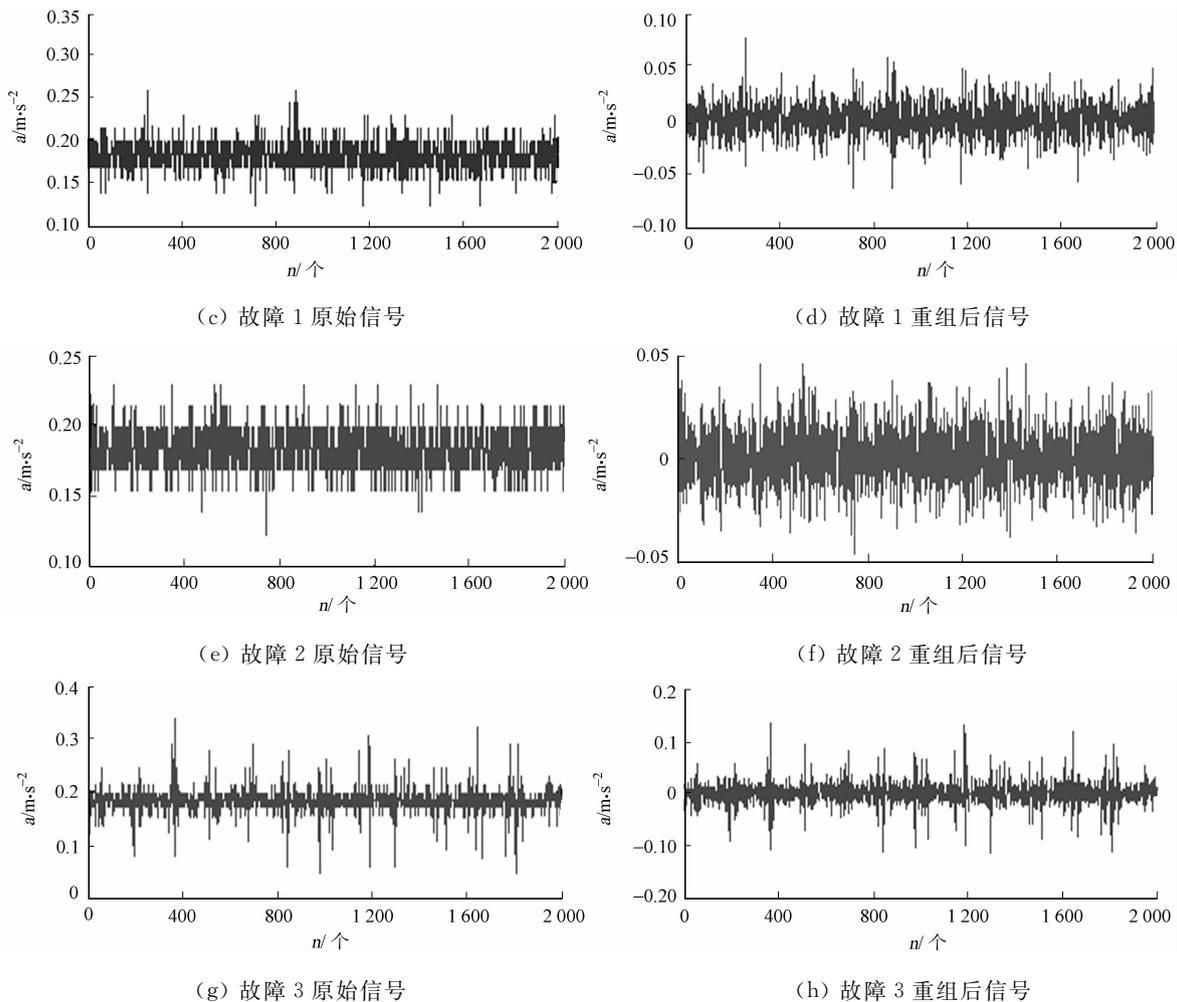


图 2 重组后的振动数据

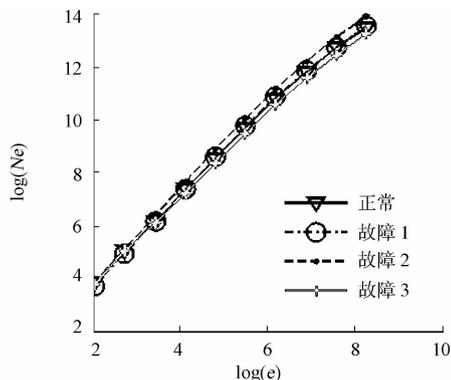
Fig. 2 Vibration datas after reorganization

表 1 盒维数

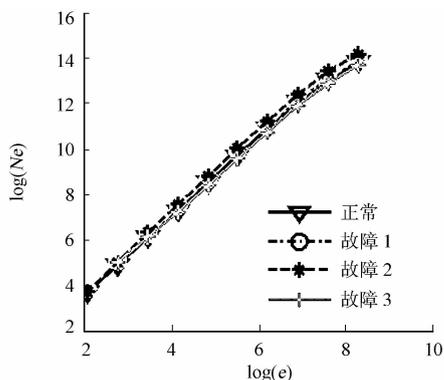
Tab. 1 Box dimension

项目	正常	故障 1	故障 2	故障 3
重组信号	1.582 5	1.600 0	1.639 8	1.536 5
IMF1	1.659 7	1.654 0	1.703 0	1.596 7
IMF2	1.568 6	1.519 6	1.560 9	1.531 1
IMF3	1.491 4	1.463 3	1.445 7	1.490 9

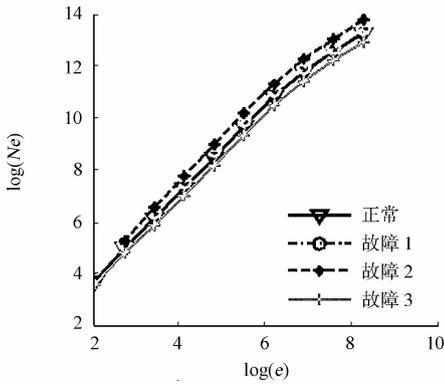
对于各 IMF1 的盒维数, 分布情况与重组信号的一样. 故障 2 的 IMF2 分形盒维数最大为 1.703 0; 故障 3 的分形盒维数最小为 1.596 7; 正常和故障 1 的分形盒维数在两者之间. 这与 EMD 总是先将信



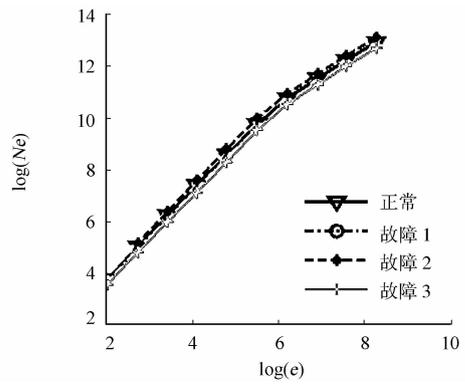
(a) 各重组信号的盒维数



(b) 各 IMF1 的盒维数



(c) 各 IMF2 的盒维数



(d) 各 IMF3 的盒维数

图 3 盒维数组图

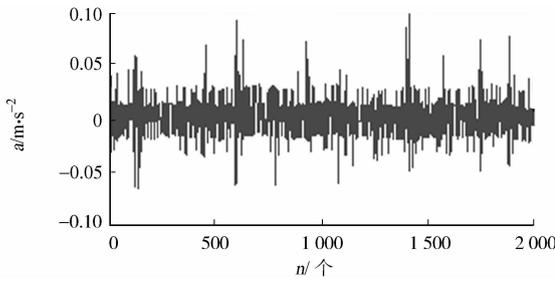
Fig. 3 Box dimension diagrams

号中包含的最主要信息提取出来一致. 对于各 IMF2 和 IMF3 的盒维数, 不同故障类型区分度明显.

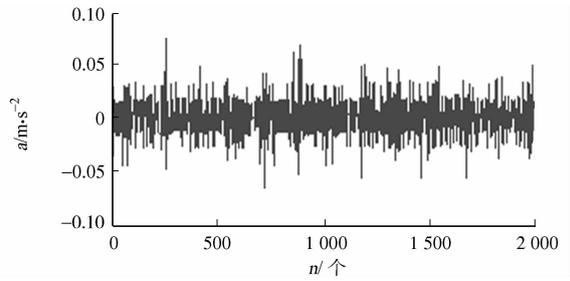
从重组后的波形和盒维数的大小可以知道: 正常的信号和故障 1 的信号较为相近, 分形盒维数也较为接近, 即两者信号的规则度和复杂性较为接近, 说明故障 1 对电梯的正常运行影响较小.

4.3 EMD 重组信号与五点滑动平均法处理信号的盒维数比较

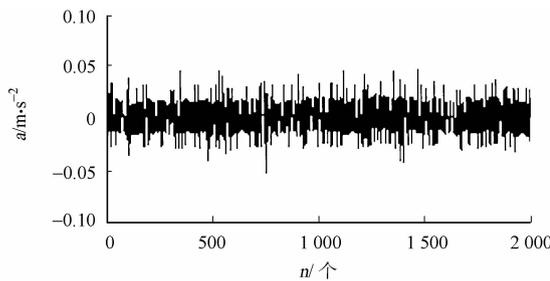
将各工况的振动信号运用五点滑动平均法处理, 去除背景信号和噪声. 得到处理后的振动信号, 如图 4 所示. 将处理后的振动信号分别求其盒维数, 并与 EMD 重组信号盒维数的比较, 如表 2 所示.



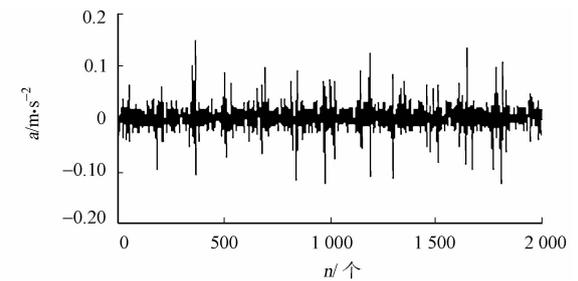
(a) 正常



(b) 故障 1



(c) 故障 2



(d) 故障 3

图 4 五点滑动平均法处理后数据

Fig. 4 Datas after processing with five points sliding average method

表 2 盒维数的比较

Tab. 2 Comparison of box dimension

项目	正常	故障 1	故障 2	故障 3
EMD 重组信号	1.582 5	1.600 0	1.639 8	1.536 5
五点滑动方法信号	1.572 9	1.583 7	1.627 4	1.517 5

由表 2 可以看出: EMD 重组信号比五点滑动方法信号的盒维数大. 两种情况的电梯各工况的盒维数大小分布相同, 都是故障 2 的盒维数为最大, 故障 3 为最小, 正常与故障 1 次之, 且区分度较为一致.

相对于五点滑动方法, EMD 方法故障诊断除了通过重组信号的盒维数, 还可以利用 IMF1, IMF2, IMF3 的盒维数来增强各工况的区分度和辨识度. 这是 EMD 盒维数方法的优点.

5 结论

EMD 对电梯加速度振动信号的分解, 可以有效地提取信号的主要信息, 对振动信号分解后重组, 有效地剔除背景信号、趋势项和噪声. 电梯各故障类型经过信号重组后有着明显不同的盒维数, 区分度明显. 各故障类型的 IMF 盒维数, 分布情况与重组信号的一致, 且区分度高. 各故障类型的 IMF2 和 IMF3 也是不同的故障类型, 盒维数不同, 具有明显的区分度.

综合重组信号和各 IMF 的盒维数分析 EMD 可以比五点滑动平均法处理方法的盒维数更能有效地增强电梯各故障类型的区分度和辨识度. 因此, 通过 EMD 和盒维数相结合, 可以有效地提高电梯机械故障诊断的准确性.

参考文献:

- [1] 李舜酩, 李香莲. 振动信号的现代分析技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 165-200, 224-230, 277-279.
- [2] 关山, 王龙山, 聂鹏. 基于 EMD 与 LS_SVM 的刀具磨损识别方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(2): 144-148.
- [3] 张琳, 黄敏. 基于 EMD 与切片双谱的轴承故障诊断方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(3): 287-290.
- [4] 郝研, 王太勇, 万剑, 等. 分形盒维数抗噪研究及其在故障诊断中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 540-545.
- [5] 樊福梅, 梁平, 吴庚申. 基于分形盒维数的汽轮机转子振动故障诊断的实验研究[J]. 核动力工程, 2006, 27(1): 85-89.

Application of EMD and Box Dimension in Fault Diagnosis of Elevator Machinery

CHEN Jian-can, LIU Xiao-mei

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: For the elevator machinery fault diagnosis, a method of empirical mode decomposition (EMD) and box dimension is presented in this paper. It uses EMD to decompose the acceleration signals of normal and failure conditions of the elevator, and the component IMF is gained. Through the recombination of signals, the vibration signals after removing the background signals and noise are obtained, and then uses the box dimension to calculate the signals and the component IMF. Experimental results show that, the box dimension under normal and failure conditions have good effective discriminations and ranges.

Keywords: elevator; empirical mode decomposition; box dimension; fault diagnosis

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 杨建红)