

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.03.010

# 基于振动分析的电梯状态监测技术研究\*

徐金海<sup>1</sup>, 徐雷<sup>1</sup>, 汪宏<sup>1</sup>, 郑波<sup>1</sup>, 唐波<sup>2\*</sup>

(1. 杭州市特种设备检测研究院, 浙江 杭州 310003; 2. 中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对电梯系统运行过程中振动信号的非平稳、随机性、不稳定等问题,利用振动信号时域峰值、频域频率值及功率谱密度和时频域能量分布的多参数振动特征量,对电梯机械部件不同工况下的振动特性进行了研究。分析了振动监测系统及其工作原理,在此基础上阐述了机械振动特征量的提取分析方法,论述了小波包分析理论和经验模态分解法;应用上述振动信号提取方法,分别对电梯曳引机减速箱正常和异响工况下的振动信号进行了监测和特征提取。实验结果表明:采用多参数特征量融合表征电梯机械振动特性的方法是可行的,能为电梯机械部件潜在安全隐患识别和故障诊断提供技术支持。

**关键词:**电梯;减速箱;振动特征量;多参数;状态监测

**中图分类号:**TH113.1;TH17;TH39

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2019)03-0279-05

## Condition monitoring of elevators based on vibration analysis

XU Jin-hai<sup>1</sup>, XU Lei<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>1</sup>, ZHENG Bo<sup>1</sup>, TANG Bo<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Special Equipment Inspection Institute, Hangzhou 310003, China; 2. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of non-stationary, random and unstable vibration signal in the operation of elevator system, the vibration characteristics of elevator & escalator mechanical components were carried out under the different conditions, by means of multi-parameter vibration feature quantities of the peak value in amplitude domain, frequency value and power spectral density in frequency domain, energy distribution property in time-frequency domain. The vibration monitoring system and operating principle of elevator & escalator mechanical components were analyzed. On this basis, the extraction methods of vibration characteristic quantities were described, and the wavelet packet analysis and empirical mode decomposition method were emphasized. By means of the above methods, the vibration signals were measured and the feature quantities were extracted in the normal and abnormal sound conditions for the gear reducer box of elevator tractor. The experimental results indicate that the method of the multi-parameter feature fusion is feasible, and this work can provide the core technology for safety hazard identification and fault diagnosis of elevator & escalator mechanical components.

**Key words:** elevators; gear reducer box; vibration feature quantity; multiple parameter; condition monitoring

## 0 引 言

目前,电梯已经成为人们生活和出行必不可少的有机组成部分<sup>[1-2]</sup>。为确保电梯设备安全可靠运行,开展电梯状态监测研究具有重要的现实意义,能为电梯

安全风险识别和评价提供技术支持<sup>[3-5]</sup>。

电梯是一个非线性机电耦合系统,其运行过程中往往伴随有机械振动,而振动信号又是一种反映电梯设备运行状态的有效信息载体,因此可通过振动加速度传感器监测电梯机械部件以反映其运行状态,进一步提取反映工况状态变化的最敏感信息作为特征信

收稿日期:2018-09-30

基金项目:国家质量监督检验检疫总局科技计划项目(2016QK144);浙江省自然科学基金资助项目(LQ16F030003)

作者简介:徐金海(1972-),男,浙江绍兴人,高级工程师,主要从事电梯安全风险评价方面的研究。E-mail:1071368697@qq.com

通信联系人:唐波,男,讲师,硕士生导师。E-mail:tang-bo001@163.com

号,用于电梯早期安全隐患识别和故障诊断<sup>[6]</sup>。关于电梯振动信号处理方法主要包括两类:(1)传统信号处理方法,包括时域分析、傅里叶变换和相关分析等;(2)现代信号处理方法,包括功率谱密度分析、小波分析、经验模态分解及高阶统计量分析等。目前,在电梯振动测试领域应用最多的是美国 PMT 公司的 EVA-625 型振动仪<sup>[7]</sup>,测试电梯速度、运行距离、加(减)速度、跳动和噪声等数据,结合 GB/T 10058-2009《电梯技术条件》<sup>[8]</sup>、GB/T 24474-2009《电梯乘用质量测量》<sup>[9]</sup>和 GB/T 10059-2009《电梯试验方法》<sup>[10]</sup> 3 个标准的技术参数,用于评价电梯轿厢在运行期间乘梯人的舒适感和电梯乘运质量性能。梅德庆等人<sup>[11]</sup>通过提取某电梯轿厢水平方向振动加速度响应时域曲线和频域功率谱密度特征,验证了滚轮导轨-导轨不平顺激励数学模型的可行性。吴远昊等人<sup>[12]</sup>采用了一种基于小波包分析的丝杠运行状态监测方法对丝杠在不同寿命下运行状态的性能退化程度进行了研究。N. E. Huang 等人<sup>[13-14]</sup>提出了采用经验模态分解(EMD)法对此进行研究。

上述研究尚未对电梯振动特征量进行多参数表征,本文将结合振动信号时域的峰值、频域的频率值及功率谱密度和时频域的能量分布特性,对电梯曳引机电动机运行状态进行多参数表征和状态识别。

## 1 振动监测系统组成及工作原理

该振动监测系统包括:三轴向加速度传感器、数据采集卡、数据通讯模块和振动数据处理软件。首先,在电梯曳引机电动机被测表面上安装三轴向加速度传感器,传感器将感知的振动加速度通过数据通信模块传输到电脑,再提取出加速度峰值、频谱特性、功率谱密度分布等振动特征量进行分析。

为便于分析,将实际复杂的振动测试系统简化为一元二次运动微分方程,即:

$$m\ddot{x} + 2\xi\sqrt{mk}\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

式中: $m$ —系统等效质量; $k$ —系统等效刚度; $\xi$ —系统等效阻尼系数; $x, \dot{x}, \ddot{x}$ —系统输出的位移、速度和加速度; $f(t)$ —系统内部各种振动量激励源。

从式(1)中可以看出,振动加速度不仅与内部的激励源有关,还与系统的等效刚度和等效阻尼系数有关,因此,利用加速度振动曲线及其特征量可以表征电梯的运行状态。

## 2 振动信号特征量提取方法

由于电梯振动信号的随机性和波动性,很难直接

从振动曲线上看出系统内在的变化规律,需要采用多种手段对振动信号进行处理。

### 2.1 小波包信号处理方法

小波包分解法不仅针对低频部分,也对高频部分实施分解,而且小波包分解能根据信号特性和分析要求自适应地选择相应频带与信号频谱相匹配,是一种比小波分解更为精细的分解方法<sup>[15]</sup>。小波包原理来自多尺度分析的塔式算法,小波包的分解是通过  $C_{j+1,k,n}$  求  $C_{j,l,2n}$  以及  $C_{j,l,2n+1}$  实现的,具体分解算法为:

$$\begin{cases} C_{j,l,2n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k h_{k-2l} C_{j+1,k,n} \\ C_{j,l,2n+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k g_{k-2l} C_{j+1,k,n} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_{j,l,2n}, C_{j,l,2n+1}$ —下一层小波包分解结果; $C_{j+1,k,n}$ —上层分解的结果; $j$ —尺度系数; $l$ —位置系数; $n$ —频率; $k$ —变量; $h, g$ —正交共轭低通、高通滤波器。

### 2.2 经验模态分解信号处理方法

经验模态分解采用三次样条插值算法的方式,自适应地从信号中分解出多个具有物理意义的本征模态函数(IMF),其需要满足两个条件<sup>[16]</sup>:(1)在整个时间序列中,信号的极值点和过零点的数目必须相等或至多相差 1 个;(2)对于任意点,由局部极大值点构成的包络线和局部极小值点构成的包络线均值均为零。

信号  $x(t)$  经验模态分解的具体实现步骤如下:

(1) 确定信号  $x(t)$  上所有极值点,将极大值点用三次样条曲线连接起来形成包络线,同理形成下包络线。上下包络线的均值记为  $m_1$ ,数据  $x(t)$  与  $m_1$  的差记为  $h_1$ ,则:

$$h_1 = x(t) - m_1 \quad (3)$$

将  $h_1$  视为新的信号  $x(t)$  重复此过程至  $h_1$  满足 IMF 的条件,便成为原始信号中分离出的第一阶 IMF。

(2) 将  $h_1$  从  $x(t)$  中剔除,得到一个差值信号  $r_1$ 。将差值信号作为新的信号重复上述步骤,直至第  $n$  阶的残余信号成为单调的,不能再分离出 IMF 分量。这样信号  $x(t)$  就被分解为  $n$  个 IMF 分量和一个残余项的和,其表达式为:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n h_j(t) + r_n(t) \quad (4)$$

式中: $r_n(t)$ —残量,代表信号中的平稳趋势,而各 IMF 分量  $h_j(t)$  则分别代表信号从高到低不同频率段的成分。

当第一个条件满足时,附加波的影响可以消除;对于第二个条件是难以满足的,因此需要一个分离过程的停止标准,为此 Huang 等人提出了通过限制标准差

$S$  的大小来确定,即:

$$S = \sum_{k=1}^n \frac{|h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \quad (5)$$

式中: $S$  的值通常定在 0.2 ~ 0.3 之间。

### 3 实验及结果分析

本研究应用前面介绍的几种振动信号特征量提取方法,对现场正常运行和有异常响声的两台自动扶梯曳引机驱动主机减速箱运行状态进行监测,其中,自动扶梯的基本参数如下:功率为 8 kW,额定速度为 0.5 m/s,理论输送能力为 9 000 人/h,倾斜角为 30°。

将三轴向加速度传感器安装于自动扶梯曳引机电机减速箱侧面平台上,用于采集 3 个方向上的驱动主机减速箱的振动数据,其中  $x$  轴代表主机前后方向, $y$  轴代表主机左右方向, $z$  轴代表主机重力方向,采样频率为 256 Hz,采样时间为 20 s。

2 种不同工况下获取每个振动数据样本集包含有  $3 \times 5120$  点,电机正常运行状态下的三轴向加速度振动波形如图 1 所示。

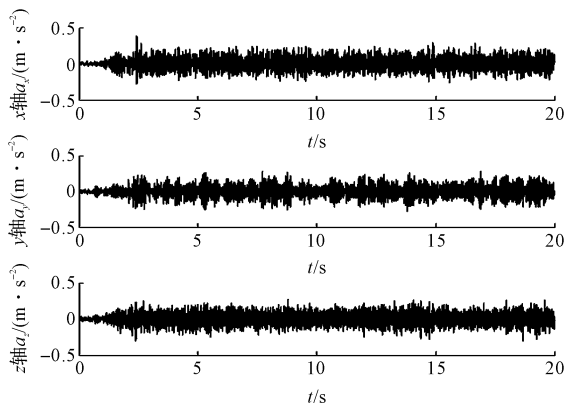


图 1 电机正常运行状态下的三轴向加速度振动波形

异响状态下的三轴向加速度振动波形如图 2 所示。

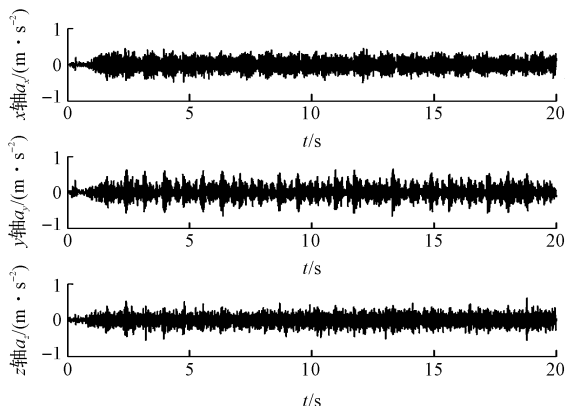


图 2 电机异响状态下的三轴向加速度振动波形

从图(1~2)中可以看出:在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的振动加速度差别不显著,而在  $z$  轴方向上振动加速度两者差别很大,正常时的加速度最大峰值为 0.372 m/s<sup>2</sup>,异响时的加速度最大峰值为 0.715 m/s<sup>2</sup>。

由上述分析可知,虽然振动加速度峰值在  $z$  轴方向上存在较大差异,但是由于电梯曳引机振动信号具有随机、非线性特性,同时受到外部机械振动信号扰动,需要进一步采用频域分析方法提取其他特征量予以佐证。

笔者采用经典快速傅里叶算法,从幅值频谱图和功率密度曲线两个方面,对上述  $z$  轴振动加速度信号进行分析,得到两种工况下的  $z$  轴加速度幅值频谱图和功率密度曲线,如图(3~4)所示。

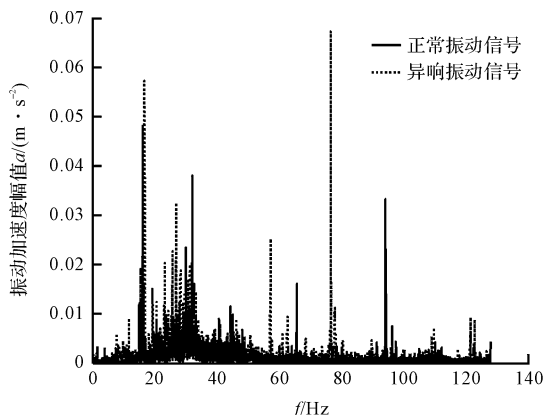


图 3 两种工况下的  $z$  轴加速度幅值频谱图

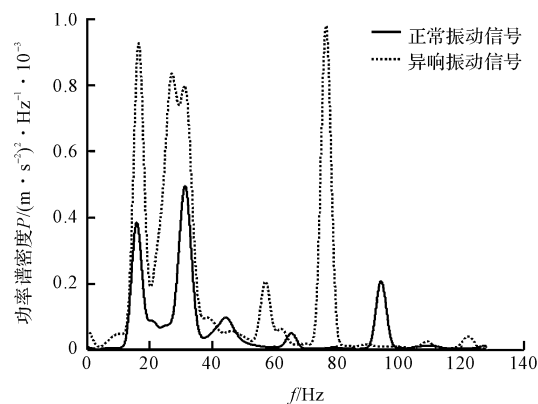


图 4 两种工况下的  $z$  轴加速度功率密度曲线

从图(3~4)中可以看出:电梯正常运行状态下的频谱图呈现以基频 16 Hz 及其谐波倍频信号的分布规律;而当电梯运行状态发生变化时,出现了非 16 Hz 的倍频信号;在两者的功率谱密度曲线上可以明显区分出电梯运行正常和异响状态。

上述快速傅里叶分析是假设电梯振动信号具有周期性,而实际上振动波形具有非稳态和非周期特点,因

此要对电梯  $z$  轴方向加速度振动信号进行三层小波包分解。

本研究选用‘db4’小波基函数,分解为 8 个频带,其小波包各频带能量百分比分布情况如表 1 所示。

表 1 各频带能量百分比分布情况

名称	正常情况/(%)	异响情况/(%)
d1	3.339 2	11.769 3
d2	50.845 5	39.953 4
d3	4.590 6	7.922 7
d4	21.977 9	17.916 3
d5	1.234 7	1.200 9
d6	6.191 7	1.070 9
d7	2.950 3	15.849 1
d8	8.870 1	4.317 4

表 1 中,电梯正常运行时前 4 个频带能量在 80.753 2%,而异响状态下也有 77.561 7%,可见,前四阶频带占据了大部分能量。

两种工况下的  $z$  轴加速度小波包分解如图 5 所示(其中 d2 和 d4 对应频带为 64 Hz ~ 96 Hz 和 0 ~ 32 Hz)。

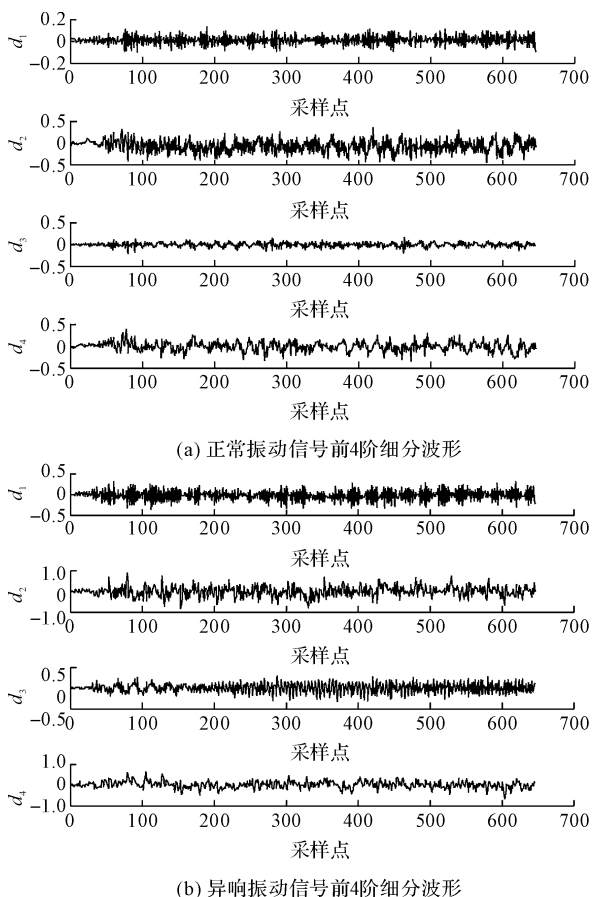


图 5 两种工况下的  $z$  轴加速度小波包分解

结合表 1 和图 5 可知:对于同种工况,相比其他频带幅值变化,小波包分解 d2 和 d4 频带波形振幅大,两频带占据了整个频带大部分能量;对于电梯异响状态下,削弱了 d2 和 d4 频带所占能量比重,同时其他频带的能量占比有所增加。

对上述的  $z$  轴加速度振动信号进行 EMD 分解,共得到 11 个固有模态函数。对于电梯正常和异响振动情况而言,前 2 个 IMF 的频谱分布特征区别明显。前 2 个 IMF 的 FFT 如图 6 所示。

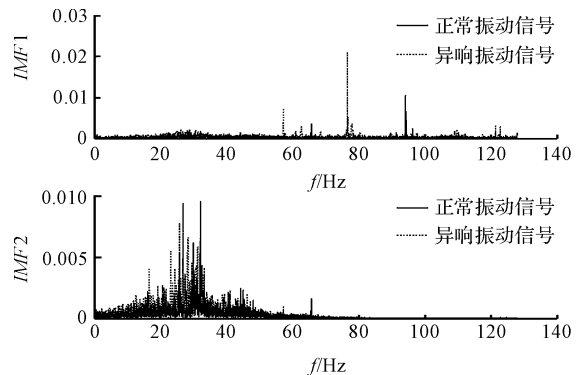


图 6 前 2 个 IMF 的 FFT

由图 6 可知:对于正常和异响振动信号,其固有模态函数对应的频率值发生偏移,因此可根据对应频率值偏移情况判断是否存在潜在机械故障。

综上所述:

(1)从时域看:异响时振动信号  $x, y$  和  $z$  的加速度幅值均大于正常振动信号,根据加速度与激振力的关系可知,异响振动状态电梯曳引机减速箱齿轮之间的振动冲击较大;

(2)从  $z$  轴加速度的频域看:16 Hz 对应曳引机输入转速 960 r/min,虽然两者前 2 阶振动频率基本一致,但是异响时的振幅更大,根据内部轴承和齿轮啮合频率远大于转动轴频率的关系,对应频谱为高频段,但由于异响和正常振动信号对应轴承和涡轮蜗杆磨损量存在差异,导致频率值分布有差异;

(3)从小波包分析结果看:其中 d4(0 ~ 32 Hz) 和 d2(64 Hz ~ 96 Hz) 两频段包含了大部分能量,该结果与频谱分析的结果对应一致;

(4)从 EMD 分解结果看:得到的前 2 个固有模态函数 FFT 结果基本上对应于 d2 和 d4 的频带,同时也验证了小波包基函数选择的合理性。

## 4 结束语

针对电梯振动信号的非平稳、随机性、不稳定等

特点,本研究提出了一种将振动波形峰值、幅值频谱图、功率谱密度曲线和能量分布特性融合的多参数电梯运行状态表征方法;对比分析了正常运行和异响两种工况下电梯曳引机减速箱振动信号的振动特征量。

测试数据显示虽然两者前2阶振动频率基本一致,但是异响时的振幅更大,异响时电梯曳引机减速器的轴承和涡轮蜗杆磨损量比正常运行时的大,由此验证了所提方法的有效性,该方法可实现对电梯机械部件在不拆机条件下的状态监测和识别潜在故障源。

### 参考文献 (References):

- [1] 徐金海. 在用电梯安全风险评价体系的研究[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学系, 2012.
- [2] 张达敏, 林辉品, 林智勇, 等. 基于神经网络预测控制的节能电梯能量管理[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 3137-3141.
- [3] 林元海, 吴允平, 王廷银, 等. 基于信息终端的电梯健康实时监测系统研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8): 159-162.
- [4] 赵海鸣, 卜英勇, 何学文. 旋转机械在线状态监测与故障诊断系统[J]. 机电工程, 2006, 23(8): 15-17.
- [5] 徐俊. 基于PFMEA的雷达机电控制系统风险识别与改进研究[J]. 机电工程, 2018, 35(5): 512-516.
- [6] 常娜, 何伟, 李志豪. 电梯系统垂直振动减振策略分

- 析[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(2): 117-120, 126.
- [7] 詹洪亮. EVA-625综合分析仪的电梯振动性能检测与应用[J]. 机电技术, 2016(2): 124-126.
- [8] GB/T 10058-2009, 《电梯技术条件》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [9] GB/T 24474-2009, 《电梯乘用质量测量》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [10] GB/T 10059-2009, 《电梯试验方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [11] 梅德庆, 杜小强, 陈子辰. 基于滚动导靴-导轨接触模型的高速曳引机电梯振动分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 264-270.
- [12] 吴远昊, 高宏力, 郭亮, 等. 基于小波包分析的滚珠丝杠状态监测[J]. 机械设计与制造, 2018, (10): 138-141.
- [13] HUANG W, SHEN Z, HUANG N E, et al. Engineering analysis of biological variables: an example of blood pressure over one day [C]. Proceeding of the National Academy of Science, USA, 1998: 4816-4821.
- [14] 朱宁辉, 白晓民, 董伟杰. 基于EEMD的谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 92-98.
- [15] 章浙涛, 朱建军, 匡翠林, 等. 小波包多域值去噪法及其在形变分析中的应用[J]. 测绘学报, 2014, 43(1): 13-20.
- [16] HUANG N E. Computer implicated empirical mode decomposition method, apparatus and article of manufacture [P]. USA, 5983162. 1999-11-09.

[编辑:李辉]

### 本文引用格式:

徐金海, 徐雷, 汪宏, 等. 基于振动分析的电梯状态监测技术研究[J]. 机电工程, 2019, 36(3): 279-283.

XU Jin-hai, XU Lei, WANG Hong, et al. Condition monitoring of elevators based on vibration analysis[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(3): 279-283.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>