

高速列车监测数据的奇异性特征研究

孙永奎, 余志斌, 金炜东, 李坤贤

(西南交通大学电气工程学院 成都 610031)

【摘要】针对高速列车运行中的状态表征问题, 提出基于监测数据的多重分形谱参数描述高速列车状态的新方法, 计算了监测数据的多重分形谱, 分析了多重分形谱参数与列车状态之间的关联关系, 提取了多重分形谱的宽度($\Delta\alpha$)、分形维数差(Δf)和谱偏斜度 k 3个参数为高速列车状态的特征。实验结果证明了多重分形谱参数能描述高速列车的运行状态, 列车的状态发生了变化, 监测数据的多重分形谱参数也随之发生变化。

关键词 高速列车; 监测数据; 多重分形分析; 奇异谱特征

中图分类号 U279; TP391

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.03.012

On the Singularity Characteristics of High-Speed Trains

SUN Yong-kui, YU Zhi-bin, JIN Wei-dong, and LI Kun-xian

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University Chengdu 610031)

Abstract In order to evaluate in-service performance of high-speed trains, a new method for representing the running state of high-speed trains is proposed based on the multifractal spectrum parameters of the monitoring data is proposed in the paper. The multifractal spectrum of the monitoring data is calculated by using the multifractal theory. The relationship between the multifractal spectrum parameters and the train running states is analyzed, and the multifractal spectrum width $\Delta\alpha$, the fractal dimension difference Δf and spectrum skewness k are selected as the characteristics of the high-speed train running states. Experimental results testify that the spectrum parameters can be used to characterize the running state of high-speed trains. When the train running states are changed, the multi-fractal spectrum parameters of the monitoring data are changed accordingly.

Key words high-speed train; monitoring data; multifractal analysis; singularity spectrum characteristics

随着京津、武广、京沪等高速铁路相继开通运营, 运营里程达1 300 km, 最高运营时速350 km, 我国已成为高速铁路“建设速度最快、运营里程最长、运营速度最快”的国家^[1]。尽管我国高速列车的设计、制造和集成技术已具有世界先进水平, 然而, 高速列车的安全运营保障技术仍面临着巨大挑战。学者近年来对列车轮对的监测^[2-3]、高速列车的结构安全性能分析与评估^[4]以及高速列车/线路耦合系统的动力学关键科学问题^[5]的研究工作值得借鉴。由于高速列车、线路和环境耦合的复杂性、轮轨的非线性性, 高速列车运行状态呈现其特殊性和复杂性, 如磨耗加快、部件参数快速蜕变等, 对高速列车的状态监测和评估变得非常复杂和重要。文献[6]研究了高速列车转向架横向振动的统计量特征随运行时间的变化趋势。文献[7]研究高速列车车体、构架等部件在不同条件下的振动响应。高速列车在

运行中状态的改变更能及时表征其性能的变化, 在监测数据中通常体现为幅值和频率的突然变化, 即数据中的奇异性。各种时频分析方法, 如短时傅里叶变换、Wigner分布和小波变换等均可用来研究信号的奇异性^[8], 其中小波变换方法得到了广泛的应用^[9-11]。该方法把Lipschitz指数作为信号的奇异性指标, 其估计值为小波模极大值在对数坐标系中随尺度变化曲线的最大斜率。由于小波的最小尺度受限和文献[9]中定理4指出, 所获得的Lipschitz指数是一个保守的估计值, 并且不能保证识别每个奇异点。

多重分形是对测度集合的标度特征的描述, 它用一个谱函数来描述分形体不同层次的行为特征, 从信号的局部出发来研究其最终的整体特征, 能够很好揭示复杂信号的本质特征, 并在振动信号特征分析取得了一定的成果^[12-13]。本文提出了基于监测数据的多重分形谱参数描述高速列车状态的方法,

收稿日期: 2013-04-10; 修回日期: 2013-09-30

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(61134002); 中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU09BR056)

作者简介: 孙永奎(1972-), 男, 博士, 主要从事高速列车服役状态研究、智能信息处理、模式识别等方面的研究。

分析多重分形谱与高速列车运行状态之间的关系, 并把其谱参数作为高速列车运行状态的特征, 实验结果证明了该方法的有效性。

1 多重分形理论与计算方法

设 F 是 d 维分形空间上的分形集, 用 n 个尺度为 $\varepsilon_i (i=1, 2, \dots, n)$ 互不相交盒子 $B_i(x_i, \varepsilon_i)$ 将 F 覆盖, 在每个盒子上定义归一化概率测度为 p_i , 令 $\varepsilon = \max\{\varepsilon_i : i=1, 2, \dots, n\}$, 如果 $\varepsilon_i \rightarrow 0$, 测度 p_i 与尺度 ε_i 之间存在幂律关系:

$$p_i \sim \varepsilon_i^{\alpha_i} \quad (1)$$

则式(1)中的 α_i 为奇异性指数, 它是反映各个盒子 $B_i(\varepsilon_i)$ 奇异程度的一个量。如果相同奇异性指数 α_i 的盒子 $B_i(x_i, \varepsilon_i)$ 个数 $N(\varepsilon_i)$ 与尺度 ε_i 满足关系:

$$N(\varepsilon_i) \sim \varepsilon_i^{-f(\alpha)} \quad (2)$$

则式(2)中 $f(\alpha)$ 为多重分形谱或者奇异谱, 它表示相同 α_i 值的子集的分形维数。

定义一个配分函数为:

$$\chi_q(\varepsilon) = \sum p_i(\varepsilon)^q \quad (3)$$

式中, $q \in R$ 为权重因子, $q \gg 1$, $\sum p_i(\varepsilon)^q$ 求和中的大率子集将起主要作用, $q \ll -1$ 时, $\sum p_i(\varepsilon)^q$ 求和中小率子集起主要作用。 $\chi_q(\varepsilon)$ 可以对一个分析集的内部结构进行精细研究, 如果 $\chi_q(\varepsilon)$ 与尺度 ε_i 存在幂律关系:

$$\chi_q(\varepsilon) \sim \varepsilon^{\tau(q)} \quad (4)$$

则式(4)中 $\tau(q)$ 为质量指数, 即 $\tau(q) = \ln \chi_q(\varepsilon) / \ln \varepsilon$ 。 α 、 $\tau(q)$ 、 $f(\alpha)$ 之间存在勒让德变换关系:

$$\begin{cases} \alpha(q) = d\tau(q)/dq \\ f(\alpha(q)) = q\alpha(q) - \tau(q) \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)中 $\tau(q)$ 的数字微分运算, 要获得足够精度需要大量的计算时间。文献[14]给出了一种直接计算多重分形谱的方法。对尺度 ε 定义归一化的测度 $\mu(q, \varepsilon)$, $q \in R$ 为权重因子:

$$\mu_i(q, \varepsilon) = p_i(\varepsilon)^q / \sum_j p_j(\varepsilon)^q \quad (6)$$

则 $\alpha(q)$ 和 $f(\alpha(q))$ 分别为:

$$\alpha(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mu_i(q, \varepsilon) \log[p_i(\varepsilon)]}{\log \varepsilon} \quad (7)$$

$$f(\alpha(q)) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mu_i(q, \varepsilon) \log[\mu_i(q, \varepsilon)]}{\log \varepsilon} \quad (8)$$

式中, $\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$, $f(\alpha)$ 的曲线形状为钩状或

钟罩状^[15], α_{\min} 对应最小的概率子集, α_{\max} 对应最大的概率子集。下面定义多重分形谱参数^[12,15]。

定义 1 多重分形谱的宽度 $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ 。

$$\Delta\alpha \approx (\ln P_{\min} - \ln P_{\max}) / \ln \delta \quad (9)$$

式中, $\Delta\alpha$ 定量表征了最小概率与最大概率之间的差别, 它描述了测度分布的非均匀的程度, 即可以描述列车监测信号分布的不均匀程度。

定义 2 最大率子集与最小率子集的分形维数差 $\Delta f = f(\alpha_{\min}) - f(\alpha_{\max})$:

$$\Delta f = (\ln N_{\alpha_{\min}} - \ln N_{\alpha_{\max}}) / \ln \delta \quad (10)$$

式中, Δf 反映了概率子集中最大、最小率元素个数的比例, 值的大小反映列车监测信号中最平稳的子集个数与波动最剧烈的子集个数的比例。

定义 3 多重分形谱的偏斜度 $k = \frac{\alpha_0 - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_0}$,

α_0 为 $f(\alpha)$ 取最大值时的奇异值。

多重分形谱偏斜度 k 表示多重分形谱顶点的左右偏斜程度, $k > 1$ 表示奇异值小所占比例多, 信号局部奇异性越强; $k < 1$, 奇异值大的所占比例较多, 信号局部奇异性越弱。 k 值的大小可以反映列车监测信号的不均匀性。

2 高速列车监测数据的奇异特征分析

对某型列车的正常状态、抗蛇行减震器失效、横向减震器失效的3种典型工况进行实验, 每种工况的实验速度如表1所示。抗蛇行减震器失效和横向减震器失效主要影响车体的横向振动, 在车体地板上采集了横向加速度, 数据记录时间为60 s, 采样频率为243 Hz。

表1 高速列车工况

工况	速度/km·h ⁻¹
正常	80、160、200、250
抗蛇行减震器失效	80、160、200、220
横向减震器失效	80、160、200、250

注: 抗蛇行减震器失效, 列车速度超过220 km/h失稳。

取数据长度 $N = 512$ 点进行多重分形分析, 尺度 $\varepsilon = n/N$, n 取 16。设 $S_i(\varepsilon)$ 为尺度 ε 时第 i 个一维盒子内的数据之和, 则被分析数据和为 $\sum S_i(\varepsilon)$, 第 i 个一维盒子内平均值的分布概率 $p_i = S_i(\varepsilon) / \sum S_i(\varepsilon)$ 。 q 的取值范围为 $-100 \sim 100$, $\Delta q = 0.01$ 。对所采集的数据进行了多次分析并统计其结果。图 1 所示为高速列车正常状态的不同速度下的横向振动多重分形谱。

从图1可知, 列车速度在80~250 km/h, 多重分

形谱的变化趋势是随着速度增大，谱宽度 $\Delta\alpha$ 逐渐增加，但是增加幅值很小， $f(\alpha)$ 形状基本保持不变。

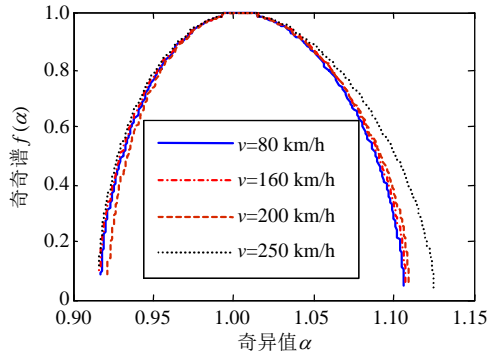


图1 正常状态多重分形谱的变化趋势

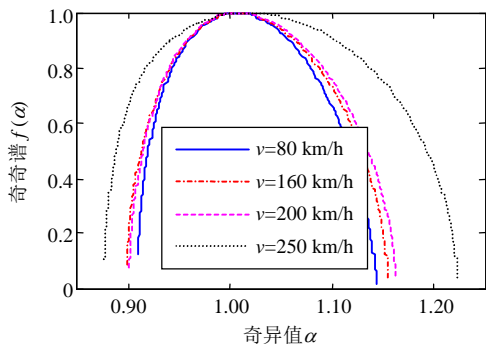


图2 横向减振器失效多重分形谱的变化趋势

图2、图3分别为横向减振器失效和抗蛇行减振器失效在不同速度下的横向振动多重分形谱。列车速度在80~250 km/h，多重分形谱的变化趋势是随着速度增大，谱宽度 $\Delta\alpha$ 逐渐增加，增加幅度明显比正常状态大，并且每个速度谱宽度 $\Delta\alpha$ 都比正常状态宽，随着速度增大，其 $f(\alpha)$ 形状发生明显的变化，谱线偏向右。

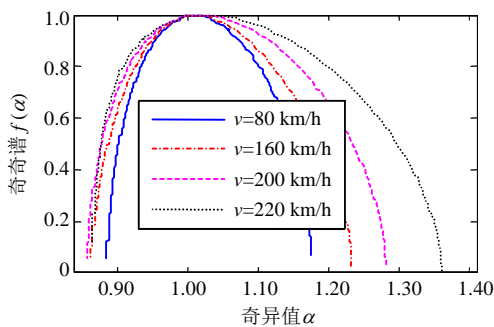


图3 抗蛇形减振器失效多重分形谱的变化趋势

图4所示为200 km/h时3种工况的多重分形谱，列车在相同速度、不同工况下多重分形谱具有明显的区别。

选择多重分形谱的宽度 $\Delta\alpha$ 、分形维数差 Δf 和分形谱偏斜度 k 作为列车运行状态的多重分形特征，表2为不同工况的多重分形谱参数。

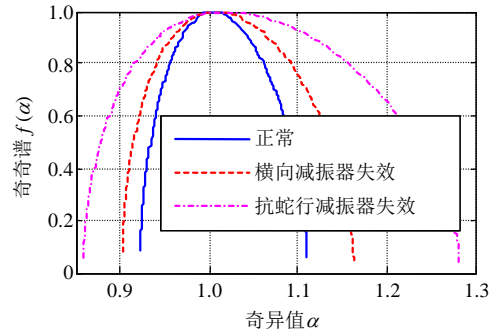


图4 200 km/h时3种工况多重分形谱

表2 不同工况多重分形谱参数

工况	速度/km·h ⁻¹	$\Delta\alpha$	Δf	K
正常	80	0.188±0.044	0.040±0.118	0.882±0.257
	160	0.191±0.037	0.030±0.140	0.896±0.268
	200	0.188±0.038	0.022±0.135	0.840±0.275
	250	0.209±0.038	0.071±0.123	0.763±0.257
横向减振器失效	80	0.235±0.048	0.103±0.137	0.723±0.150
	160	0.257±0.064	0.027±0.101	0.797±0.249
	200	0.262±0.059	0.037±0.126	0.717±0.210
抗蛇行减振器失效	80	0.346±0.079	0.070±0.099	0.712±0.153
	160	0.289±0.080	-0.012±0.124	0.808±0.164
	200	0.370±0.074	0.025±0.118	0.715±0.241
	220	0.425±0.125	0.021±0.097	0.668±0.210
失效	220	0.498±0.110	0.095±0.118	0.513±0.119

从表2中可以看出，不同工况的多重分形谱的参数均不相同，随着速度的增加，其值呈增大的趋势。其中列车正常状态， $\Delta\alpha$ 、 Δf 和 k 变化很小，即列车的横向振动是均匀的。列车横向减振器失效，谱宽度随着速度增加而增加， Δf 除了在速度为80 km/h时外，其余随速度增大而增大， k 逐渐减少的趋势。列车抗蛇行减振器失效时，谱的3个参数变化最为明显。表2中后两种工况3个谱参数的变化趋势都说明了高速列车随速度增大其振动不均匀，异常的振动成分增多。文献[17]指出影响列车的横向振动主要为抗蛇行减振器，其中速度在80 km/h以下时横向减振器的影响很小，上述的分析结果和文献的结论符合。即多重分形谱描述了高速列车不同工况不同速度下的运行状态，可以用谱宽度 $\Delta\alpha$ 、分形维数差 Δf 和谱偏斜度 k 作为其的工况特征。为了验证分析结果，选取了抗蛇行减振器失效在200 km/h时的数据进行傅里叶分析，并与正常状态进行了比较，如图5所示。

图5a中，列车正常状态振动情况明显比抗蛇行减振器失效的小，且均匀，频域中这两种状态的区别更加明显。正常状态时，列车在20 Hz以下的频率振动幅值比较接近，而抗蛇行减振器失效的振动频率在16 Hz以下，且振动幅值变化较大。

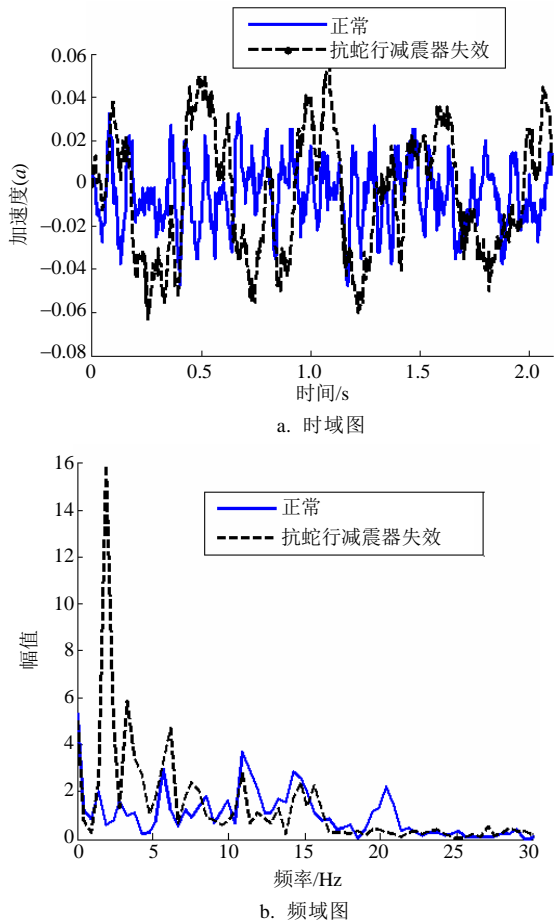


图5 列车正常与抗蛇行减震器失效时域与频域图

采用文献[9]中的奇异性指标对3种工况分析的结果如表3所示。从表3中可知, 抗蛇行减震器失效的Lipschitz指数与另外两种工况的区别明显, 并随速度增加而增加, 而速度为160 km/h和200 km/h, 正常和横向减震器失效两种工况的Lipschitz指数几乎相等。除了速度为220 km/h时抗蛇行减震器失效工况外, 其余工况的Lipschitz指数分散程度均比多重谱宽度 $\Delta\alpha$ 的大, 即采用多重分形分析更能揭示列车运行状态的本质特征。

表3 不同工况Lipschitz指数

工况	速度/km·h ⁻¹	Lipschitz 指数
正常	80	0.287±0.364
	160	0.217±0.145
	200	0.197±0.153
	250	0.193±0.179
横向减震器失效	80	0.154±0.118
	160	0.213±0.215
	200	0.196±0.119
抗蛇行减震器失效	250	0.379±0.138
	80	0.409±0.163
	160	0.550±0.173
	200	0.703±0.205
	220	0.837±0.102

4 结 论

针对高速列车运行状态的表征问题, 本文计算了某型车的正常状态、抗蛇行减震器失效、横向减震器失效的3种典型工况的监测数据多重分形谱, 提取了多重谱宽度 $\Delta\alpha$ 、分形维数差 Δf 和谱偏斜度 K 3个参数作为高速列车运行状态的特征。实验结果证明了多重分形谱的参数定量地表征了高速列车的运行状态, 其中 $\Delta\alpha$ 和 K 表征了列车振动的均匀性, Δf 反映列车振动信号的波动程度。

参 考 文 献

- [1] 张卫华, 王伯铭. 中国高速列车的创新发展[J]. 机车电传动, 2010(1): 8-12, 69.
ZHANG Wei-hua, WANG Bo-ming. Innovation and development of high-speed railway in China[J]. Electric Drive for Locomotives, 2010(1): 8-12, 69.
- [2] 张剑, 樊晓平, 黄采伦, 等. 列车轮对状态的融合监测系统[J]. 交通运输工程学报, 2008, 18(6): 13-19.
ZHANG Jian, FAN Xiao-ping, HUANG Cai-lun, et al. Fusion monitoring system of locomotive wheelset state[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 18(6): 13-19.
- [3] 黄采伦, 周华, 张剑, 等. 特征谱分析方法及其在列车轮对故障诊断中的应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2008, 23(1): 71-75.
HUANG Cai-lun, ZHOU Hua, ZHANG Jian, et al. An online fault diagnosis system design of passenger train wheelsets based on TCN[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2008, 23(1): 71-75.
- [4] ZHANG W, WU P, WU X, et al. An investigation into structural failures of Chinese high-speed trains[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(3): 427-441.
- [5] 金学松, 郭俊, 肖新标, 等. 高速列车安全运行研究的关键科学问题[J]. 工程力学, 2009, 26(S2): 8-22, 105.
JIN Xue-song, GUO Jun, XIAO Xin-biao, et al. Key scientific problems in the study on running safety of high speed trains[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S2): 8-22, 105.
- [6] 戴津, 刘峰, 董孝卿, 等. 基于同一转向架历史对比与同一列车横向对比的转向架状态监测[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(2): 26-29, 7.
DAI Jin, LIU Feng, DONG Xiao-qing, et al. Bogie condition monitoring based on comparing historical date of one bogie and date of all bogies in one train[J]. Railway Locomot Ive & Car, 2010, 30(2): 26-29, 37.
- [7] 史红梅, 余祖俊, 周佳亮. 不同线路条件及运行速度下高速列车振动性能分析[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(1): 112-116.
SHI Hong-mei, YU Zu-jun, ZHOU Jia-liang. Vibration analysis of high-speed vehicles under the conditions of

- various speed and lines[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(1): 112-116.
- [8] YANG W X, HULL J B, SEYMOUR M D. Detecting the singularities in engineering signals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 175(1): 439-445.
- [9] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [10] ROBERTSON A N, FARRAR C R, SOHN H. Singularity detection for structural health monitoring using holder exponents[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003, 17(6): 1163-1184.
- [11] PENG Z K, CHU F L, TSE P W. Singularity analysis of the vibration signals by means of wavelet modulus maximal method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(2): 780-794.
- [12] 李国宾, 段树林, 于洪亮, 等. 发动机振动信号特征参数的多重分形研究[J]. 内燃机学报, 2008, 26(1): 87-91.
- LI Guo-bin, DUAN Shu-lin, YU Hong-liang, et al. Study on characteristic parameters of engine vibration signal based on multi-fractal[J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(1): 87-91.
- [13] SAHOO P, BARMAN T, DAVIM J P. Fractal analysis in machining[M]. Berlin: Springer, 2011.
- [14] LEBYODKIN M A, LEBEDKINA T A. Multifractal analysis of evolving noise associated with unstable plastic flow [J]. Physical Review E, 2006, 73(3): 036114.
- [15] 孙霞, 吴自勤, 黄韵. 分形原理及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- SUN Xia, WU Zi-qin, HUANG Yun. The theory of fractal and its applications[M]. Hefei: Press of University of Science & Technology China, 2003.
- [16] 任尊松. 车辆动力学基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- REN Zun-song. Fundamentals of vehicle dynamics[M]. Beijing: China Railway Publishing house, 2009.

编辑 漆蓉