

# 基于 HHT 能量和最大 Lyapunov 指数的蛇行分类方法

王敏, 宁静, 赵飞, 李艳萍, 陈春俊

(西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

**摘要:** 现有蛇行监测标准仅考虑构架横向加速度信号的时域幅值信息, 通过单一的固定值去评判列车是否蛇行, 没有定量反映蛇行失稳对列车的影响程度; 针对以上问题, 提出基于 HHT 的能量法, 该方法从信号频域主频的大小, 频谱的集中性以及频率值等方面来判断高速列车是否发生蛇行运动; 在此基础上, 提出了快速蛇行收敛的概念, 此类情况对车辆系统运行安全影响较小, 因此是不影响车辆系统安全的信号; 最后, 利用最大 Lyapunov 指数表征信号的周期性, 从而区分快速蛇行收敛和蛇行运动(小幅蛇行和大幅蛇行); 结果表明, 通过 HHT 能量法与最大 Lyapunov 指数相结合可以对高速列车正常运行、快速蛇行收敛、小幅蛇行和大幅蛇行的 4 种运行状态进行定性识别, 且 HHT 能量值能定量反映蛇行程度的大小, 并通过实测线路数据验证了方法的可行性。

**关键词:** 高速列车; 蛇行监测; HHT 能量法; 快速蛇行收敛; 最大 Lyapunov 指数

## Hunting Classification Method Based on HHT Energy and Largest Lyapunov Exponent

WANG Min, NING Jing, ZHAO Fei, LI Yanping, CHEN Chunjun

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** existing hunting monitoring standard only considers the time domain amplitude information of frame lateral acceleration signal, single fixed value is used to judge whether train hunts, which does not reflect the influence of hunting instability on train quantitatively. Aimed at above problem, a energy method based on Hilbert-Huang transform (HHT) is firstly proposed to judge whether the high-speed train hunts from the main frequency size, spectrum concentration and frequency value of signal frequency domain. On this basis, the concept of fast hunting convergence is proposed, which has little influence on the safety of vehicle system operation, so the signal does not affect the safety of the vehicle system. Finally, the largest Lyapunov exponent is used to characterize the periodicity of the signal, the fast hunting convergence and hunting instability (small amplitude hunting and large amplitude hunting) are distinguished. The results show that, the four operating states of normal operation, fast hunting convergence, small amplitude hunting and large amplitude hunting of the vehicle system are identified qualitatively by combining the HHT energy with the largest Lyapunov exponent. The HHT energy values can reflect the intensity of hunting movement quantitatively. And the feasibility of the method is verified by the measured data of the line.

**Keywords:** high speed train; hunting monitoring; HHT energy; fast hunting convergence; largest Lyapunov exponent

## 0 引言

蛇行运动是车辆动力学系统的核心问题之一, 车辆在运行过程中发生收敛较慢的小幅蛇行或者剧烈的大幅蛇行都会严重地影响车辆运行安全, 因此对车辆小幅蛇行和大幅蛇行的在线监测都至关重要。学者们通过大量的理论研究总结出轮轨参数和悬挂系统参数对车辆系统蛇行运动的影响规律<sup>[1-5]</sup>。在这些理论研究的成果上, 更多的学者致力

于探索如何将 these 成果应用到高速列车蛇行监测领域。宋兴武<sup>[6]</sup>提出横向位移峰值方法 (LMP), 通过计算轮对和构架的横向加速度确定轮对横移量的峰值来识别车辆的蛇行运动。朴明伟等<sup>[7]</sup>发现当车辆系统服从超临界分岔时, 随着运行速度的增加, 转向架会发生小幅蛇行, 且随着速度的增加, 转向架的蛇行幅值变大, 最终会出现大幅蛇行失稳。蔡里军<sup>[8]</sup>总结了大量的实测数据认为当构架横向加速度峰值连续 6 次达到或超过  $2 \text{ m/s}^2$ , 车辆发生了蛇行运

收稿日期: 2022-11-15; 修回日期: 2022-12-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975486); 国家自然科学基金项目(51975487); 四川省科技计划资助项目(2020JDTD0012)。

作者简介: 王敏(1998-), 男, 山西大同市人, 硕士研究生, 主要从事智能化状态监测与故障诊断方向的研究。

通讯作者: 宁静(1976-), 女, 四川成都人, 博士, 副教授, 主要从事智能化状态监测与故障诊断、精密测控技术及系统大数据挖掘在高速列车中的应用等方向的研究。

引用格式: 王敏, 宁静, 赵飞, 等. 基于 HHT 能量和最大 Lyapunov 指数的蛇行分类方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(8): 169-175.

动。方明宽<sup>[9]</sup>等考虑到构架横向加速度数据的非平稳性,提出 NKJADE 方法对多传感器横向加速度数据进行特征融合,从而对车辆的正常运行,小幅蛇行,大幅蛇行状态进行识别。Sun<sup>[10]</sup>发现当车辆出现蛇行运动时,构架与车体的加速度信号存在相位延迟,通过对车体和构架的横向加速度信号进行互相关分析,将互相关指标作为判别车辆蛇行失稳的阈值。曾元辰、赵飞<sup>[11-12]</sup>等发现车辆出现蛇行运动时,轮对、构架和车体的横向加速度都具有较强的周期性,提出利用信号周期性特点来识别车辆的蛇行运动。崔万里<sup>[13]</sup>通过样本熵理论以及等距映射算法 (ISOMAP) 对高速列车构架横向加速度信号进行特征提取,然后通过 LS-SVM 进行车辆小幅蛇行异常识别,达到了较好的识别效果。叶运广<sup>[14]</sup>通过 MEEMD 进行特征提取与使用 LS-SVM 对车辆的运行状态进行特征识别亦取得很好的效果。冉伟<sup>[15]</sup>因而提出了一种基于 EEMD-SVD-LTSA 的特征提取框架,用于识别高速列车小幅蛇行运动的演变趋势。陈杨<sup>[15]</sup>通过建立道岔模型,研究高速列车在小幅蛇行的状态下通过道岔的演变规律。宁云志<sup>[15]</sup>提出基于 1D-CNN 和 CGAN 的预测方法对小幅蛇行进行预警,实现了蛇行失稳的提前预警。王晓东<sup>[18]</sup>利用 1D CNN 自适应地对构架横向加速度数据进行特征提取,使用 LSTM 对车辆的正常、小幅蛇行和大幅蛇行状态进行分类,取得了很好的分类效果。但是目前,列车实际运行过程中对蛇行运动的监测还存在以下不足:

问题一:现有的蛇行监测标准将构架横向加速度信号峰值连续 6 次达到  $8 \text{ m/s}^2$  时视为大幅蛇行,但实际过程中即使构架横向加速度没有达到现有的监测标准也会出现大幅的振动。此外,现有标准没有定量反映蛇行失稳对车辆的影响程度,仅用一个固定值来评判是否产生蛇行,具有一定的局限性。

问题二:某些车辆受到部分轨道不平顺周期性的干扰,虽然发生了明显的谐波振动,但只是运行中的极少时刻,且会快速收敛,不会形成稳定的周期蛇行运动,对运行安全性没有较大的影响<sup>[19]</sup>,将此类状态认为快速蛇行收敛。

本文针对以上问题,提出 HHT (Hilbert-Huang transform) 能量法从信号频域主频的大小与频谱的集中性以及频率值等方面来判断高速列车是否存在蛇行运动,对两个蛇行运动状态 (小幅蛇行和大幅蛇行) 的蛇行程度的大小进行定量的评估。利用最大 Lyapunov 指数进一步表征信号的周期性从而将快速蛇行收敛和蛇行运动 (小幅蛇行和大幅蛇行) 区分开来。最后通过 HHT 能量法与最大 Lyapunov 指数相结合,从高速列车实际运行的需求出发,对车辆系统进行正常运行、小幅蛇行、快速蛇行收敛、大幅蛇行的定性识别和蛇行程度大小的定量分析,以实现蛇行运动的具体监测。

## 1 仿真模型建立

### 1.1 高速列车动力学模型

本文使用 SIMPACK 软件建立国内某型号高速列车的整车动力学模型,该车辆的基本参数如表 1 所示。该车辆

包括 1 个车体、2 个构架、4 个轮对、8 个轴箱、一系悬挂系统 (一系钢簧、一系垂向减振器、转臂式轴箱定位装置) 和二系悬挂系统 (空气弹簧、二系垂向减振器、二系横向减振器、抗蛇行减振器、抗侧滚扭杆、牵引拉杆、横向止挡)。在建立仿真模型时,忽略了车辆系统各部件的弹性变形,将车体、构架、轮对、轴箱等部件假定为刚体。车体、构架和轮对有 6 个自由度 (纵向、横向、垂向、侧滚、点头、摇头),轴箱只有 1 个点头自由度。因此,该车辆动力学模型共有 50 个自由度。

表 1 高速列车动力学参数表

参数	数值
转向架中心距	17.375 m
轴距	2.5 m
车轮滚动圆横向跨距	1.493 m
车轮滚动圆直径	0.92 m
轮对内侧距	1.353 m
车轮外形	S1002G
钢轨外形	CHN60
车体质量	38.884 t
车体侧滚转动惯量	$125.9 \text{ t} \cdot \text{m}^2$
车体点头转动惯量	$1905.3 \text{ t} \cdot \text{m}^2$
车体摇头转动惯量	$1797.9 \text{ t} \cdot \text{m}^2$
构架质量	2.2 t
构架侧滚转动惯量	$1.236 \text{ t} \cdot \text{m}^2$
构架点头转动惯量	$1.233 \text{ t} \cdot \text{m}^2$
构架摇头转动惯量	$2.336 \text{ t} \cdot \text{m}^2$
轮对质量	1.517 t
轮对侧滚转动惯量	$0.693 \text{ t} \cdot \text{m}^2$
轮对点头转动惯量	$0.118 \text{ t} \cdot \text{m}^2$
轮对摇头转动惯量	$0.693 \text{ t} \cdot \text{m}^2$
车体重心距轨面高	1.656 m
构架重心距轨面高	0.574 m

### 1.2 建立仿真工况类型

关于轮对踏面的选择,踏面类型对高速列车系统极限环分岔影响显著,为了模拟高速列车的不同运行状态,同时使高速列车的运行状态更符合实际,本文分别选用了在一个旋修周期 ( $2.5 \times 10^5 \text{ km}$ ) 内 3 种不同行驶里程的 S1002G 实测踏面。

踏面 1 至踏面 3 对应行驶的里程依次增大,踏面的磨损程度依次增加。其中,踏面 1 为列车行驶  $5 \times 10^4 \text{ km}$  的行驶里程左右时,测量轮对外形轮廓获得的实测磨损踏面;踏面 2 为列车行驶  $10 \times 10^4 \text{ km}$  的行驶里程左右时,测量轮对外形轮廓获得的实测磨损踏面;踏面 3 为列车行驶  $15 \times 10^4 \text{ km}$  的行驶里程左右时,测量轮对外形轮廓获得的实测磨损踏面。

关于抗蛇行减振器的参数设定,抗蛇行减振器的参数对高速列车系统的临界速度和分岔类型也有很大影响。本文为充分模拟高速列车的不同运行状态,使用 3 种不同阻尼特性的抗蛇行减振器。抗蛇行减振器的阻尼特性曲线如图 1 所示,从抗蛇行减振器 1 到抗蛇行减振器 3 对应的卸荷

力和卸荷速度依次增加。使用不同行驶里程的 S1002G 实测踏面 and 不同阻尼特性的抗蛇行减振器模拟高速列车 (速度: 300~400 km/h) 3 种工况:

- 1) 工况 1: 使用踏面 1 和抗蛇行减振器 1 仿真, 模拟正常运行;
- 2) 工况 2: 使用踏面 2 和抗蛇行减振器 2 仿真, 模拟小幅蛇行;
- 3) 工况 3: 使用踏面 3 和抗蛇行减振器 3 仿真, 模拟大幅蛇行和快速蛇行收敛。

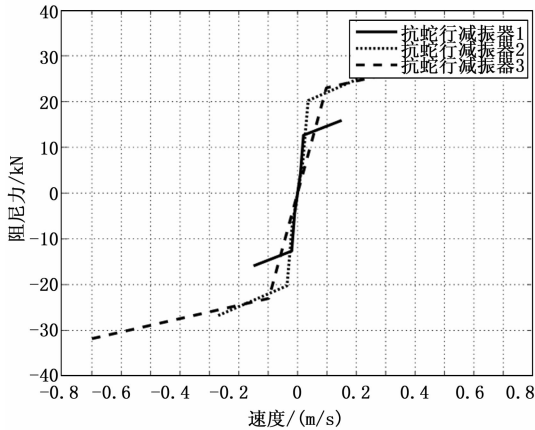


图 1 抗蛇行减振器阻尼系数图

根据以上工况, 计算得到各工况下的极限环分岔图, 如图 2 所示。工况 1 的高速列车动力学模型分岔类型为超临界分岔, 在此工况下车辆模型在 300~400 km/h 区间运行时, 车辆处于正常运行状态, 如图 3 所示。工况 2 的高速列车动力学模型分岔类型同样为超临界分岔, 在此工况下车辆模型在 300~400 km/h 区间运行时, 车辆的轮对处于小幅振动状态, 此时车辆处于小幅周期蛇行状态, 随着速度增加, 横向振动幅值也逐渐增大, 如图 4 所示。工况 3 下高速列车动力学模型分岔类型为亚临界分岔, 在此工况下, 车辆模型在 300~400 km/h 区间运行时, 车辆系统极限环处于不稳定区域, 受轨道不平顺的影响, 轨道不平顺激励大时, 车辆系统平衡点收敛为稳定极限环值产生大幅蛇行运动, 如图 5 所示。当轨道不平顺激励不足以让车辆系统产生稳定的极限环时, 车辆系统可能会出现短暂的蛇行运动随后车辆系统平衡点收敛为 0, 无法形成稳定的周期运动, 即快速蛇行收敛, 如图 6 所示。

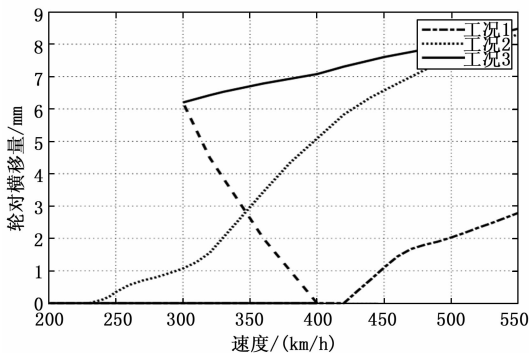


图 2 车辆系统极限环分岔图

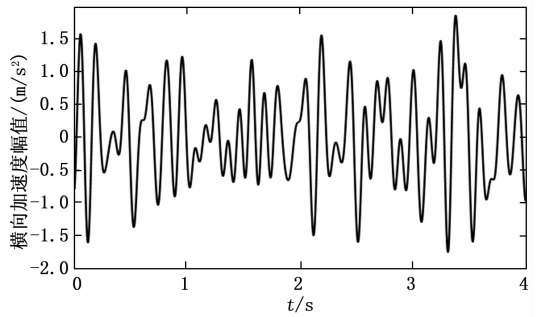


图 3 正常运行

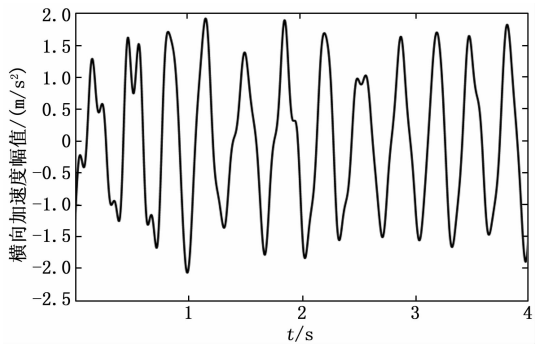


图 4 小幅蛇行

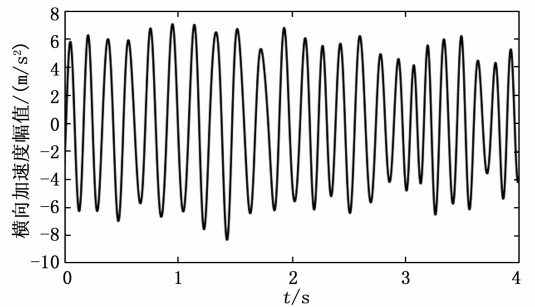


图 5 大幅蛇行

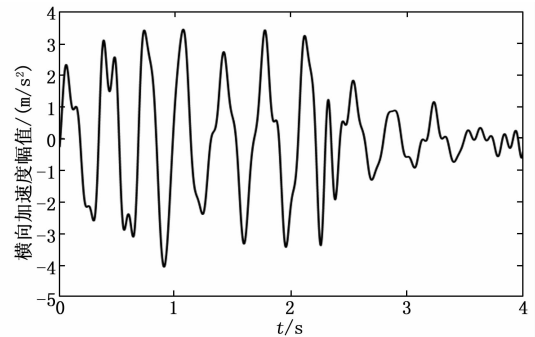


图 6 快速蛇行收敛

通过建立上述工况, 确定了高速列车动力学模型 4 种运行状态的仿真条件。为构建大量的仿真数据集, 将车辆运行速度分为 (300 km/h、320 km/h、340 km/h、360 km/h、380 km/h、400 km/h) 6 个速度级, 对上文用到的轨道不平顺分别设置了 0.5、1.0、2.0 三种幅值比例系数, 扩充轨道不平顺数据集。每种运行状态对应 6 个速度

级, 3 种幅值比例轨道不平顺, 共 18 组仿真条件, 4 种运行状态共对应 72 组仿真数据。对每组仿真得到的构架横向加速度信号随机取 20 个样本, 每个样本段取样时长为 4 s, 采样频率为 250 Hz, 总计 1 440 个样本段的仿真数据集, 供后续实验使用。

## 2 理论方法

### 2.1 HHT 能量理论

大量的研究表明蛇行信号和正常信号的主频不同, 基于这一特点, 通过研究信号所有频率成分在频域段内的变化, 可以更加准确地找到正常信号和蛇行信号在频域内的不同特征。再结合信号的时域特征进行分析, 可以准确地得知信号的时频信息, 从而更加全面地分析信号特征。孙新建<sup>[20]</sup>通过 HHT 能量方法对非平稳的爆炸震动信号进行分析, 对希尔伯特边际谱进行频域积分计算 HHT 能量, 研究结构体的爆炸震动损伤。HHT 能量法结合了信号频域主频的大小与频谱的集中性以及频率值和时域幅值的相关信息, 因此本文采用此方法研究蛇行运动,

首先对蛇行信号和正常信号的主频及频域范围进行分析, 确定蛇行频域主要范围。然后通过 HHT 边际谱统计正常信号和蛇行信号在特定频率段范围内的频域信息, 最后结合信号的时域幅值和频域信息, 通过 HHT 能量法全面反映蛇行信号和正常信号不同的时频特征, 从而对车辆运行状态准确的识别。

HHT 具体变换原理如下: 对原始信号  $x(t)$  进行经验模式分解得到  $n$  个 IMF (intrinsic mode function) 信号分量:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (1)$$

式中,  $c_i$  为信号的基本模式分量,  $r_n$  称为残余函数。对  $c_i$  进行 Hilbert 变换得到:

$$G_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2)$$

式中,  $\tau$  为时间延长间隔。构造解析信号  $z_i(t)$ :

$$z_i(t) = c_i(t) + jG_i(t) = a_i(t)e^{j\Phi_i(t)} \quad (3)$$

式中, 幅值函数为  $a_i(t)$ , 相位函数为  $\Phi_i(t)$ ,  $c_i$  分量信号的 Hilbert 谱为  $H_i(\omega, t)$ :

$$H_i(\omega, t) = RP[a_i(t)e^{j\Phi_i(t)}] \quad (4)$$

式中,  $RP$  表示取实部。对  $H_i(\omega, t)$  进行时域上的积分得到边际谱  $h_i(\omega)$ :

$$h_i(\omega) = \int_0^T H_i(\omega, t) dt \quad (5)$$

式中,  $T$  为信号时间长度。对  $h_i(\omega)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 边际谱分析, 对主频在 2 Hz 以上的边际谱进行叠加求得最终的边际谱  $h(\omega)$ :

$$h(\omega) = \sum_{k=1}^j h_k(\omega) \quad (6)$$

式中,  $h_k(\omega)$  ( $k=1, 2, \dots, j$ ) 为主频在 2 Hz 以上的边际谱, 在频域内对  $h(\omega)$  进行积分得到最终的 HHT 能量值。

$$E = \int_0^{\omega} h(\omega) d\omega \quad (7)$$

### 2.2 最大李雅普诺夫指数理论

蛇行信号和正常信号除了时频上的差异, 其周期性特征也有着明显的区别, 所以有必要对信号的周期性特征进行分析。李雅普诺夫方法是研究运动稳定性的重要方法, 对于非线性动力学系统, 李雅普诺夫指数可以从状态变量的时间序列中计算出来。最大李雅普诺夫指数为相空间相邻轨迹的平均指数发散率的数值特征, 常用来判定系统的混沌特性, 因此其可以用来量化信号的周期性。最大李雅普诺夫指数计算步骤如下。

对于时间序列  $\{x(t)\}$  构造  $n$  维空间  $R^n$ ,  $T$  为延迟时间,  $T=k\Delta t$  ( $k=1, 2, \dots$ ),  $\Delta t$  为时间间隔即:

$$X(t) = [x(t), x(t+T), \dots, x(t+(n-1)T)]^T \quad (8)$$

$N$  维相空间中的某一时刻, 两条邻近轨迹之间的距离可以分解在  $n$  个不同的方向, 这个  $n$  个不同方向上的距离增长率是不同的, 每一个增长率就是一个李雅普诺夫指数。系统可以写成  $n$  个自治一阶微分方程组的形式即:

$$\dot{\bar{x}} = f(x)x \in R^n \quad (9)$$

取两条邻近轨迹  $L_1$  和  $L_2$ , 起始点分别为  $x_0$  和  $y_0$  两起始点的距离为  $d_0 = y_0 - x_0$ , 经过  $\Delta t$  时间后分别运动到  $x_1$  和  $y_1$ , 此时距离为  $d_1 = y_1 - x_1$ , 如此循环下去经过  $m\Delta t$  后得到  $m$  个  $d_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ),  $d_i = y_i - x_i$ , 最大李雅普诺夫指数  $\lambda_1$  即:

$$\lambda_1 = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m\Delta t} \sum_{i=1}^m \ln \frac{d_i}{d_0} \quad (10)$$

## 3 基于仿真数据的蛇行状态研究

### 3.1 研究步骤

由于实测数据较少, 本文利用仿真数据进行分析, 再通过实测数据进行验证, 通过 HHT 能量法和最大 Lyapunov 指数法对蛇行状态进行分类且定量反映蛇行程度的大小, 其具体操作如下:

1) 仿真得到不同运行状态下的构架横向加速度信号数据, 采用 0.5~10 Hz 对构架横向加速度进行滤波, 提取时间长度为 4 s 的信号进行分析。

2) 通过对大量的仿真数据进行 EMD (empirical mode decomposition) 分析, 得出蛇行信号主频和能量频带基本在 2 Hz 以上。

3) 对主频在 2 Hz 以上 IMF (intrinsic mode function) 分量信号的 Hilbert 边际谱进行叠加求和。

4) 在频域内对最终得到的 Hilbert 边际谱进行积分得到最终的 HHT 能量值。

5) 利用 SVM (support vector machines) 分类得到 HHT 能量阈值, 根据 HHT 能量值将正常运行、小幅蛇行、大幅蛇行区分开, 且通过 HHT 能量值的大小反映蛇行程度的大小。

6) 利用最大 Lyapunov 指数对高速列车不同运行状态信号的周期性进行分析。

7) 利用 SVM 分类得到最大李雅普诺夫指数阈值, 根据最大 Lyapunov 指数值将快速蛇行收敛与蛇行运动 (小幅

蛇行和大幅蛇行) 区分开来。

### 3.2 HHT 能量分析

对图 3、4、5、6 的构架横向加速度信号进行示例分析。如表 2 所示, 正常运行信号的主频和能量频带分布比较均匀, 主频 2 Hz 以上 IMF 信号分量能量占比 62%, 2 Hz 以下 IMF 信号分量能量占比 38%。如表 3 和表 4 所示, 蛇行信号(小幅蛇行、大幅蛇行)主频高的 IMF 分量能量占比高, 蛇行频率主频和能量频带基本在 2 Hz 以上, 信号分量能量占比均占比达到 90% 以上。如表 5 所示, 快速蛇行收敛信号因为包含蛇行特征, IMF 分量主频在 2 Hz 以上的占比也高达 80%。对主频在 2 Hz 以上 IMF 分量信号边际谱进行叠加, 得到最终的 Hilbert 边际谱, 最后在频域内对 Hilbert 边际谱进行积分得到最终的 HHT 能量值。

表 2 正常运行(2 Hz 以上 HHT 能量所占百分比为 62.1%)

信号分量	边际谱主频	频带	HHT 能量	百分比%
Imf1	8.12	7-10	0.125	36.0
Imf2	4.75	2-5	0.09	26.1
Imf3	1.65	1-2	0.085	24.6
Imf4	0.87	0-2	0.03	8.8
Imf5	0.42	0-2	0.015	4.4

表 3 小幅蛇行(2 Hz 以上 HHT 能量所占百分比为 95.87%)

信号分量	边际谱主频	频带	HHT 能量	百分比%
Imf1	3.38	2-10	0.6	46.1
Imf2	3.25	2-4	0.55	43.0
Imf3	2.37	1-2	0.085	6.77
Imf4	0.87	0-1	0.015	1.2
Imf5	0.62	0-1	0.025	2.1

表 4 大幅蛇行(2 Hz 以上 HHT 能量所占百分比为 99.5%)

信号分量	边际谱主频	频带	HHT 能量	百分比%
Imf1	6.45	3-8	2.65	93.3
Imf2	2.51	2-4	0.175	6.2
Imf3	0.87	0-2	0.01	0.33
Imf4	0.62	0-1	0.005	0.17

表 5 快速蛇行收敛(2 Hz 以上 HHT 能量所占百分比为 82.9%)

信号分量	边际谱主频	频带	HHT 能量	百分比%
Imf1	3.38	2-10	0.232	23.8
Imf2	2.8	2-10	0.176	18.0
Imf3	2.6	1-4	0.40	41.1
Imf4	1.5	1-3	0.12	12.2
Imf5	0.85	0-1	0.048	4.9

对仿真数据集(1 440 个样本)的正常运行、小幅蛇行和大幅蛇行 3 类数据的 HHT 能量值进行分析, 利用 SVM 方法计算得出其分类阈值, 分别为 0.82 和 2.34, 如图 7 所示。当信号 HHT 能量值小于 0.82 时, 将其视为正常运行, 当信号 HHT 能量值大于 0.82 小于 2.34 时视为小幅蛇行, 当信号 HHT 能量值大于 2.34 时视为大幅蛇行。HHT 能

量值的大小反映了蛇行程度的大小, 即 HHT 能量值越大蛇行程度越剧烈, HHT 能量值越小蛇行程度越小。如图 8 所示, 在此 3 类数据上加入快速蛇行收敛数据, 发现快速蛇行收敛 HHT 能量值和小幅蛇行、大幅蛇行 HHT 能量值重叠, 表明 HHT 能量值指标无法区分这 3 种运行状态, 因此需要补充新的指标将其区分。

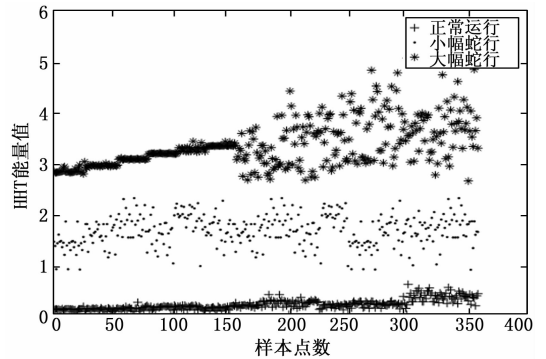


图 7 三类仿真数据 HHT 能量统计图

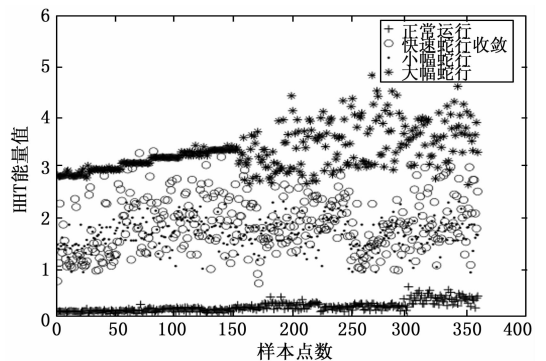


图 8 四类仿真数据 HHT 能量统计图

大幅蛇行和小幅蛇行的最大 Lyapunov 指数值信号周期性较强, 正常运行和快速蛇行收敛的信号周期性较弱。因此可通过最大 Lyapunov 指数值将快速蛇行收敛和正常运行归为周期性较弱的一类, 将小幅蛇行和大幅蛇行归为周期性较强的一类。

对仿真数据集(1 440 个样本)的正常运行、小幅蛇行、大幅蛇行、快速蛇行收敛数据的最大 Lyapunov 指数值进行分析, 如图 9 所示。利用 SVM 方法计算得出其分类阈值 10.26, 李雅普诺夫指数值低于 10.26 时, 将其认为属于正常运行和快速蛇行收敛一类, 最大 Lyapunov 指数值大于 10.26 时将其认为小幅蛇行和大幅蛇行一类。

通过最大 Lyapunov 指数法和 HHT 能量法结合, 将正常运行、小幅蛇行、大幅蛇行、快速蛇行收敛区分开来。当信号 HHT 能量值小于 0.82 时, 将其视为正常运行, 当信号 HHT 能量值大于 0.82 小于 2.34 且最大 Lyapunov 指数值小于 10.26 时视为小幅蛇行, 当信号 HHT 能量值大于 2.34 且最大 Lyapunov 指数值小于 10.26 时视为大幅蛇行, 当信号 HHT 能量值大于 0.82 且最大 Lyapunov 指数值大于 10.26 时视为快速蛇行收敛。此方法既考虑了蛇行的周期性特点, 也考虑了蛇行信号的频域特性包括频率主频的大小、

频谱的集中性以及频率值等特点，从而可以定性识别车辆系统不同的运行状态，且能够定量表示蛇行信号的能量值从而反映蛇行程度的大小。

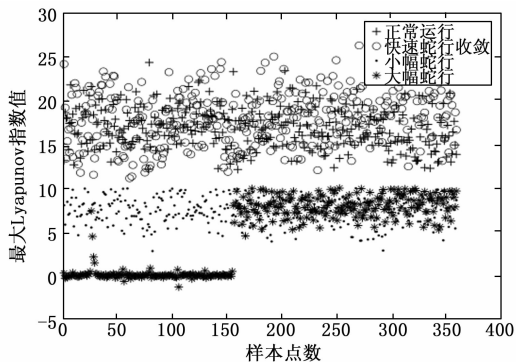


图 9 仿真数据最大 Lyapunov 指数统计图

### 4 实测数据验证

为验证本文所提方法的正确性，采用实测数据对其进行验证。图 10 为某高速列车速度在 300~400 km/h 区间的部分实测构架横向加速度数据，时长为 1 220 s，单个样本数据长度为 4 s，样本总数为 305。

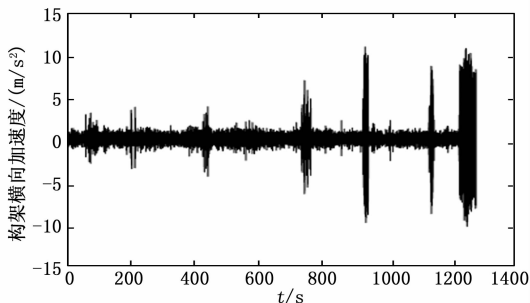


图 10 实测构架横向加速度信号

用 HHT-最大 Lyapunov 指数方法对实测数据进行分析，图 11 为实测数据的 HHT 能量值，图 12 为实测数据的最大 Lyapunov 指数图。图 13~15 为局部信号监测放大图。

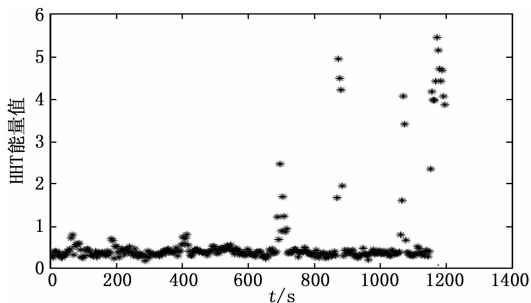


图 11 实测数据 HHT 能量图

从图 13 的识别结果中可以观察到，704~708 s 这一段信号，传统的方法会将其识别为正常运行，但这段信号出现了明显的周期性特征，本文所提方法将其识别为小幅蛇行状态，这段小幅蛇行识别可以起到预警作用。708~712 s 这一段信号，其加速度峰值未达到目前所使用的蛇行报警标准（连续 6 个周期加速度峰值达到 8 m/s<sup>2</sup>），传统的方法

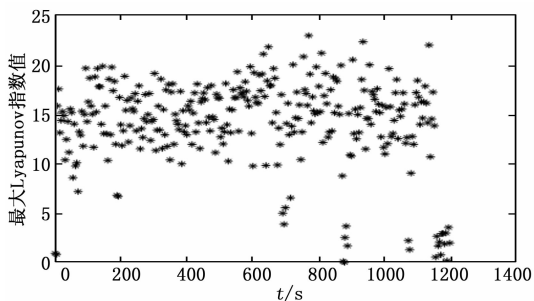


图 12 实测数据 Lyapunov 指数图

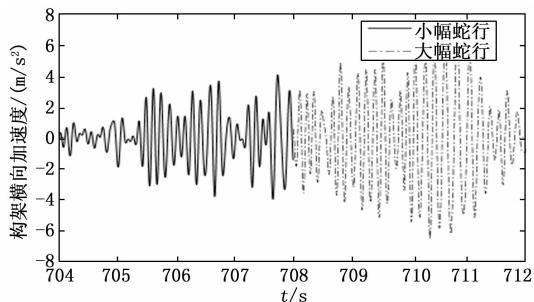


图 13 小幅—大幅监测图

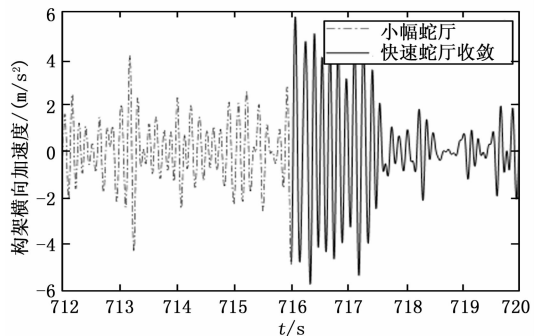


图 14 小幅—快速蛇行收敛监测图

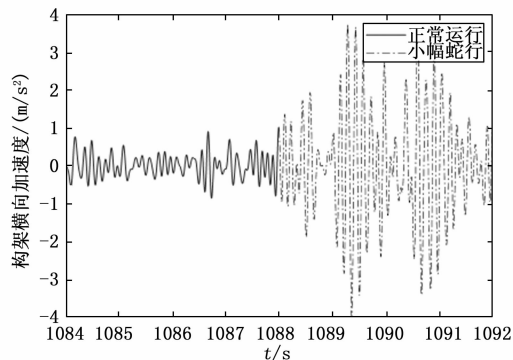


图 15 正常—小幅监测图

会将其识别为正常运行，但通过观察可以看出，该信号峰值（6~8 m/s<sup>2</sup> 之间）接近目前所使用的蛇行报警标准，且出现了明显的周期性，本文所提方法将其识别为大幅蛇行状态，故本文认为其识别结果合理。

从图 14 的识别结果可以看到 712~716 s 这一段信号，传统的方法无法识别其小幅蛇行状态，但其具有明显的周期性特征，716~720 s 这一段信号本方法识别为快速蛇行

收敛, 从图中可以看出其周期性特征逐渐消失, 证明了本方法的合理性。

从图 15 的识别结果看到, 1 084~1 092 s 这一段信号从正常运行变为小幅蛇行的状态。其信号周期性特征逐渐变强, 幅值不断上升, 车辆系统出现小幅蛇行。传统的方法会将这一段信号整体识别为正常运行, 本方法可以准确地监测这一变化过程。

本文所提方法准确地识别了车辆蛇行运动的不同状态, 能够及时采取措施预防列车发生严重的蛇行运动, 保证列车运行安全。综上, 本文利用实际数据验证了方法具有可行性, 能够在车辆运行过程中实现更为准确的在线监测。

## 5 结束语

现有的高速列车蛇行失稳标准仅针对大幅蛇行且单一的从信号时域的角度分析。本文将 HHT 能量值和最大 Lyapunov 指数值两个指标进行了结合, 综合考虑了信号的时域、频域和周期性特点, 以此作为区分高速列车不同蛇行状态的参考指标。本方法重点并非确定不同蛇行运行状态的准确阈值, 由于仿真数据的局限性, 本文通过仿真数据所确立的阈值标准存在一定的误差。阈值的准确性问题可通过台架试验或线路实测等方式对真实数据进行补充, 再结合迁移学习等机器学习算法, 提高实际监测中阈值的准确性。

## 参考文献:

- [1] 孙丽霞. 高速列车横向运动稳定性和动态脱轨理论分析及评价方法研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
- [2] POLACH O. Application of nonlinear stability analysis in railway vehicle industry [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2009: 15-27.
- [3] 曾 京. 车辆系统的蛇行运动分叉及极限环的数值计算 [J]. 铁道学报, 1996 (3): 13-19.
- [4] 董 浩. 铁道车辆运动稳定性及分岔类型研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [5] 晏 永. 车辆系统蛇行运动 Hopf 分岔行为研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [6] 宋欣武. 转向架蛇行失稳监测的横向位移识别方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [7] 朴明伟, 梁树林, 孔维刚, 等. 高速转向架非线性稳定性及安

(上接第 153 页)

- [12] 于占东, 王世笛, 付 莹, 等. 感应加热动态负载阻抗匹配及功率因数角控制 [J]. 电力电子技术, 2021, 55 (11): 59-63.
- [13] 傅 清. 并联谐振中频电源逆变角自动移相电路的应用 [J]. 电力电子技术, 2009, 43 (9): 35-37.
- [14] 陈彦桥, 郑亚锋, 刘吉臻, 等. 基于动态解耦的模糊多模型协调控制系统应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (12): 166-170.
- [15] STEIN G. Respect the unstable [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2003, 23 (4): 12-25.

- 全裕度对策 [J]. 振动与冲击, 2011, 30 (8): 161-168.
- [8] 蔡里军. 基于 FPGA 的高速列车转向架蛇行失稳检测装置 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [9] NING J, FANG M K, RAN W, et al. Rapid multi-sensor feature fusion based on non-stationary kernel jade for the small-amplitude hunting monitoring of high-speed trains [J]. Sensors, 2020, 20 (12): 3457.
- [10] SUN J F, MELI E, CAI W B, et al. A signal analysis based hunting instability detection methodology for high-speed railway vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 2020 (6): 1-23.
- [11] ZENG Y C, ZHANG W H, SONG D L. A new strategy for hunting alarm and stability evaluation for railway vehicles based on nonlinear dynamics analysis [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2020, 234 (1): 54-64.
- [12] 赵 飞, 宁 静, 李艳萍, 等. 基于 SIMPACK 仿真分析的高速列车蛇行失稳识别方法 [J]. 现代制造工程, 2022 (1): 98-103.
- [13] 崔万里, 宁 静, 种传杰, 等. 基于 EMD-ISOMAP 高速列车小幅蛇行异常特征提取 [J]. 中国测试, 2016, 42 (12): 105-110.
- [14] 叶运广, 宁 静, 种传杰, 等. 高速列车转向架蛇行失稳的 MEEMD-LSSVM 预测模型 [J]. 铁道学报, 2018 (1): 38-43.
- [15] 冉 伟, 宁 静, 陈 杨, 等. 基于 EEMD-SVD-LTSA 的高速列车蛇行演变特征提取框架 [J]. 电子测量技术, 2019, 42 (5): 1-5.
- [16] 陈 杨, 宁 静, 王靖铭, 等. 高速转向架小幅蛇行运动状态下过道岔研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (9): 174-178.
- [17] 宁云志, 宁 静, 李艳萍, 等. 基于数据不平衡下的高速列车小幅蛇行预测方法 [J]. 电子测量技术, 2022, 45 (6): 149-154.
- [18] 王晓东, 宁 静, 陈春俊. 1D CNN 和 LSTM 高速列车横向稳定性状态识别研究 [J]. 中国测试, 2020, 46 (11): 25-30.
- [19] 石怀龙, 罗 仁, 曾 京. 国内外高速列车动力学评价标准综述 [J]. 交通运输工程学报, 2021, 21 (1): 36-58.
- [20] 孙新建. 基于 Hilbert 能量分析的岩体爆破震动损伤研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [16] ZHOU K. Essentials of robust control [M]. Prentice Hall, 1999.
- [17] 王广雄, 何 朕. 工业伺服控制 [J]. 电机与控制学报, 2005, 10 (3): 329-332.
- [18] 吴 敏, 桂卫华, 何 勇. 现代鲁棒控制 (第二版) [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.
- [19] 姚 郁, 傅绍文, 贺风华, 等. 基于加权函数选择的伺服系统性能优化设计方法 [J]. 自动化学报, 2009, 35 (11): 1470-1475.
- [20] 姚方方, 张欣雨. 具有随机增益的电力系统弹性负荷频率 H<sub>∞</sub> 控制 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (11): 133-139.