

电动汽车振动信号混沌特性

牛治东¹, 吴光强^{1, 2}

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 东京大学生产技术研究所, 东京 153-8505)

摘要: 为研究电动汽车的混沌动力学特性, 对某款电动汽车进行了实车试验, 并对试验数据进行了混沌动力学特性分析. 首先, 在铺路面上对电动汽车进行实车试验, 测得轮心垂向、减振器上安装点垂向和电池底部中心垂向的振动加速度信号. 其次, 利用小波分析对信号进行降噪处理, 比较了全局阈值降噪和分层阈值降噪的去噪效果, 发现分层阈值降噪对信号的处理效果较好. 利用降噪后的信号计算得到左前轮心垂向、左前减振器上安装点垂向和电池底部中心垂向信号的庞加莱截面和相图, 并利用互信息法计算时间延迟、Cao 法计算最小嵌入维, 最后利用小数据量法得到最大李雅普诺夫指数. 分析结果表明, 汽车在铺路面上行驶时存在混沌运动. 研究结果的应用, 可使电动汽车在设计和分析时, 能尽可能地避免系统混沌运动的发生.

关键词: 电动汽车; 混沌运动; 试验

中图分类号: U461.1

文献标志码: A

Experimental Research on Chaotic Analysis of Electric Vehicle Vibration Signal

NIU Zhidong¹, WU Guangqiang^{1, 2}

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan)

Abstract: In order to research chaotic dynamics of electric vehicles, the vehicle experiment was carried out, and the experimental data were analysed. First, the vehicle experiment in the paving road was carried out, the vertical acceleration signals of wheel center, shock absorber top mount and battery bottom center were measured. Secondly, the noise of signals were reduced by using the wavelet analysis, and compare the effect between global threshold noise reduction and layered threshold noise reduction, then found that the effect of the layered threshold was better. With the de-noised signals, the Poincaré sections and phase diagrams of the vertical of left front wheel center, the front

left shock absorber top mount and battery bottom center were calculated, and time delay was calculated by using the mutual information method, and also minimum embedding dimension was calculated through the Cao method, the largest Lyapunov exponent was obtained by using the small data sets method. The results show that the presence of chaotic motions in the electric vehicle when traveling on paving road. The results of the study can avoid the generation of chaotic motion in the design and analysis of electric vehicle as much as possible.

Key words: electric vehicles; chaotic motions; experimental research

混沌理论作为非线性科学的重要分支, 具有丰富的内涵和广博的外延空间^[1]. 混沌现象的产生并不是由外界随机因素的影响引起的, 而是由于系统本身的非线性特性相互作用的结果. 电动汽车作为一个强非线性系统, 其非线性动力学行为一直受到学者的研究和关注. 但是, 对电动汽车混沌动力学特性的研究偏少, 而试验方面的研究则更少.

文献[2]以电动汽车转向系统为研究对象, 发现在不同的车速下周期、倍周期和混沌运动的存在, 并提出了一个自适应时延反馈控制策略, 以提高转向系统的稳定性, 最后利用数值仿真验证了模型和控制策略的有效性. 文献[3]在考虑电动汽车电机转矩波动的影响下建立了八自由度非线性模型, 并用分岔图、庞加莱(Poincaré)截面和最大李雅普诺夫(Lyapunov)指数等数值方法分析了系统存在混沌运动. 文献[4]研究了同步磁阻电机驱动系统的 Hopf 分岔和混沌现象, 根据所导出的非线性系统方程, 对分岔图进行分析得知, 当 d 轴部件的三相电机电压失去控制时, 系统通过 Hopf 分岔进入失稳状态, 并计算了响应的李雅普诺夫指数, 证明了系统混沌运

收稿日期: 2015-09-11

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20120072110013)

第一作者: 牛治东(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为汽车随机非线性动力学以及混沌分岔等. E-mail: niu99niu122390981@163.com

通讯作者: 吴光强(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为车辆动力学与控制. E-mail: wuguangqiang@tongji.edu.cn

动的存在.但是,总体来说,目前的研究多以仿真分析为主,对电动汽车混沌动力学特性方面的试验研究较少.

本文通过在铺路面上对某款电动汽车进行实车试验,对测得的左前轮心垂向、左前减振器上安装点垂向和电池底部中心垂向的振动加速度信号进行混沌动力学分析,利用全局阈值降噪和分层阈值降噪分别对信号进行了降噪处理,得出效果较好的阈值降噪方式.并计算信号降噪后的相图和庞加莱截面,利用互信息法计算时间延迟,Cao 法计算最小嵌入维数,最后利用小数据量法计算最大李雅普诺夫指数.

1 电动汽车混沌动力学特性分析基础

混沌是指在确定性的非线性系统中出现的一种貌似无规则的类似随机的现象^[5].

1.1 混沌动力学特性的特征量

混沌吸引子的特征量是刻画吸引子某个方面特征的量,主要包括 Lyapunov 指数、维数和熵等.

混沌吸引子的一个基本特点是运动对初值的敏感性,相空间中初始距离很近的 2 个轨道,随着时间的推移以指数速率发散,而定量描述这一现象的量就是 Lyapunov 指数.

混沌吸引子是轨道在相空间中经过不断靠近和分离而形成的几何图形,因混沌吸引子在相空间内收缩使它的维数小于相空间的维数,所以可以通过研究它的相空间维数来确定相空间中吸引子的性质.当相空间中的维数不是整数时,此时系统的运动为混沌运动.

1.2 混沌动力学特性的判别方法

可以通过以下几个方面来判别时间序列是否具有混沌特性^[6-9].

(1)功率谱.如果系统的功率谱是连续的,则系统可能是混沌的.

(2)庞加莱截面.当庞加莱截面是一些成片的密集的点集且具有一定的分形结构,则运动便是混沌的.

(3)李雅普诺夫指数.对于混沌系统,至少有一个 Lyapunov 指数大于零,这是区别奇异吸引子与其他吸引子的重要特征.

(4)Kolmogorov 熵和拓扑熵. Kolmogorov 熵定义为信息的平均损失率.若系统表现为确定性混沌,则 Kolmogorov 熵是大于零的常数, Kolmogorov 熵

越大,那么信息的损失速率越大,系统的混沌程度越大.拓扑熵是数学地刻画不同共轭类的拓扑动力系统.

(5)关联维数.可以根据关联维数是否具有饱和现象来区别混沌序列和随机序列.

(6)分形和分维.观察吸引子是否具有分形特征来判断系统的混沌运动.维数是空间和客体(集合)的重要几何特征量.

2 电动汽车试验

以某款电动汽车为研究对象,在铺路面上进行实车试验,采集振动信号.试验场铺路面如图 1.

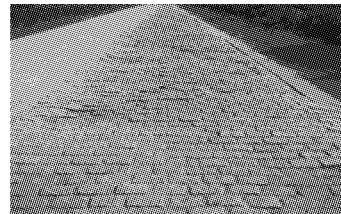
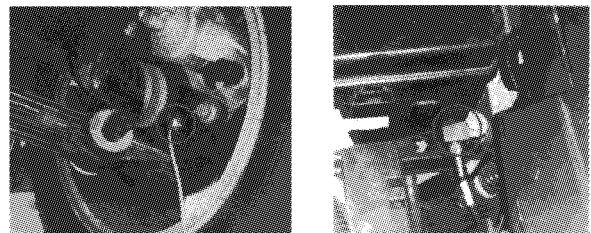


图 1 试验场铺路面

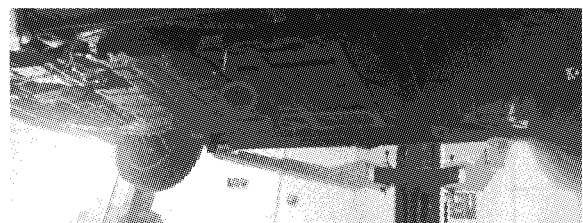
Fig.1 Proving ground pavement

测量信号:4 个轮心垂向振动加速度信号、左前减振器上安装点振动加速度信号、电池底部中心振动加速度信号.部分通道传感器的安装位置如图 2 所示.



a 左前轮传感器

b 左前减振器传感器



c 电池底部传感器

图 2 部分通道传感器安装位置

Fig.2 Part channel of the sensor mounting position

为采集混沌振动信号,在实车试验时,保持车速为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,采样频率为 512 Hz .

3 电动汽车试验数据处理

因数据量大,对试验数据进行分析时,选取左前轮心垂向加速度、电池底部中心垂向加速度和左前减振器上安装点垂向加速度共 3 个通道的信号进行

分析.

3.1 电动汽车部分通道的振动信号

测得 3 个通道的振动加速度,左前轮心垂向、左前减振器上安装点垂向和电池底部中心垂向的加速度时间历程及功率谱密度如图 3 所示.

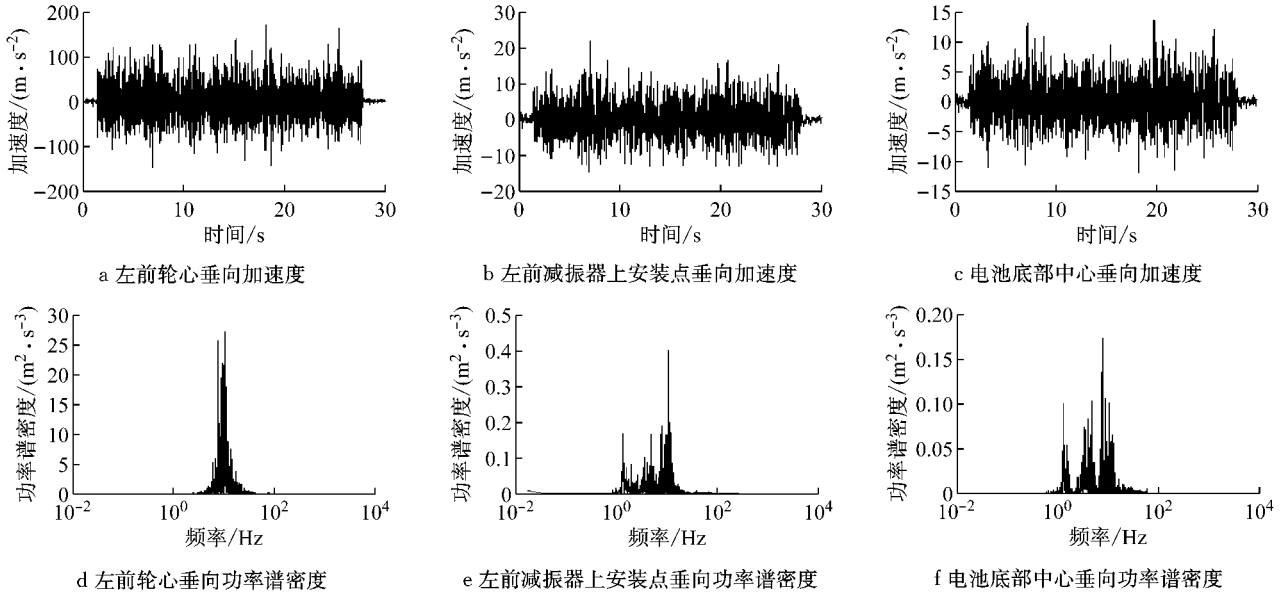


图 3 加速度和功率谱密度

Fig.3 Acceleration and power spectral density

从图 3 可以看出,功率谱的能量主要分布在 10 Hz 附近.

3.2 小波分析去噪

因试验时测得的信号中存在噪声,需对振动信号进行降噪处理.采用小波分析理论对信号进行降噪处理.目前小波分析去噪主要采用 3 种方法:小波变换模极大值法、小波系数尺度相关法和阈值法.采用阈值法对信号进行降噪^[10],过程如下.

(1)选择小波基.根据采集得到的信号确定合适的小波基.根据振动加速度信号的时域波形,选用在时域上紧支撑正交的 dbN 小波.

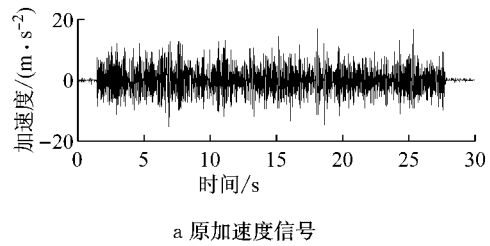
(2)确定分解层数.尝试不同的分解层数下的信号分解方法,观察信号的主要特征是否得到有效保留.经过多次尝试,确定对信号进行 4 层分解.

(3)阈值处理.对信号分解后得到的每层系数确定阈值,并对其中的细节系数进行处理.分别对信号进行全局阈值(固定阈值)和分层阈值(软阈值)处理,并对比 2 种方法的去噪效果.

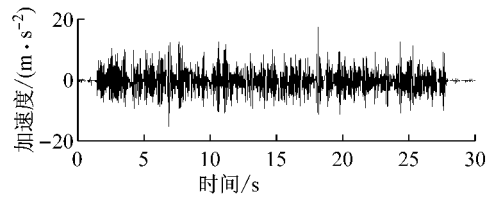
(4)小波重建.对阈值处理后的信号进行重建,得到降噪后的振动信号.

使用小波全局阈值降噪和分层阈值降噪方法对振动信号进行降噪处理,以左前减振器上安装点垂

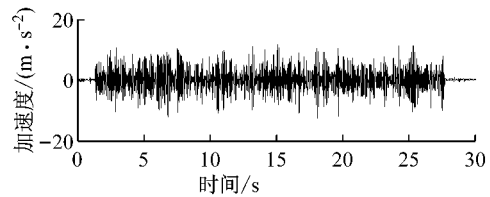
向加速度信号为例说明 2 种降噪方法的效果,如图 4 所示.为说明降噪效果,对信号 5~15 s 进行放大,如



a 原加速度信号



b 使用全局阈值降噪后的加速度信号



c 使用分层阈值降噪后的加速度信号

图 4 小波分析 2 种降噪方法结果

Fig.4 Results of two de-noising methods

图 5 所示. 并计算 2 种方法降噪后与原信号的相干系数 γ_1 与 γ_2 , 如图 6 所示.

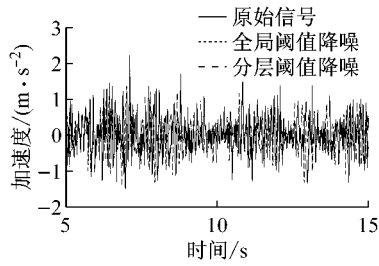


图 5 降噪后信号的局部放大图

Fig. 5 Local magnification of the signal after de-noising

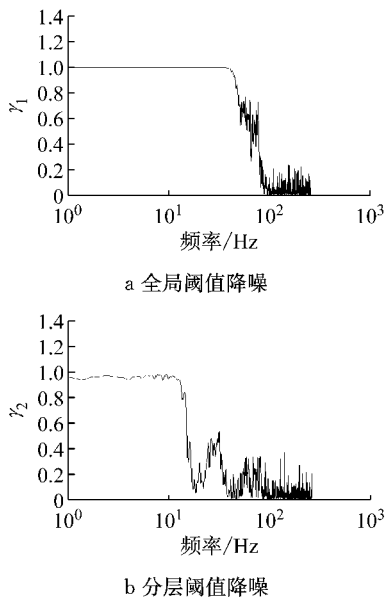


图 6 降噪后与原信号的相干系数

Fig. 6 Coherence coefficient of original signal after de-noising

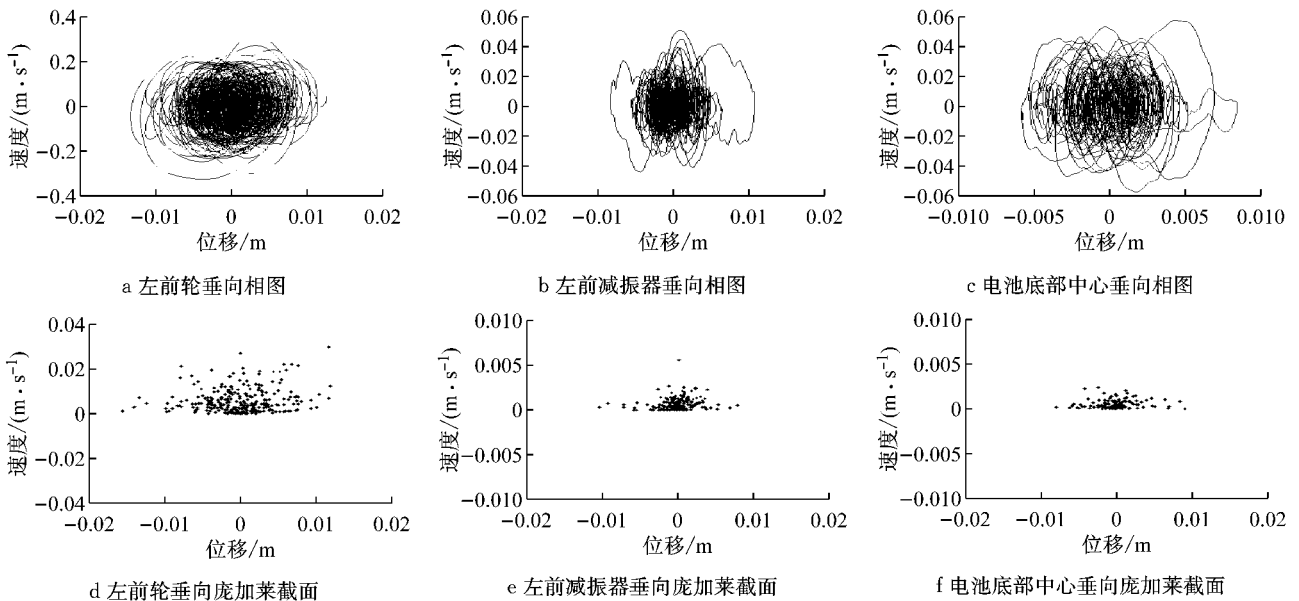


图 7 相图与庞加莱截面

Fig. 7 Phase diagram and Poincare cross section

图 5 中,全局阈值降噪和分层阈值降噪相比,分层阈值降噪虽然损失了信号的部分性能(与原信号的相似性),但信号比全局阈值降噪的结果光滑得多,而且信号发展初期的高频系数几乎不受影响,最大限度地反映了原信号本身的性质.

图 6 中,全局阈值降噪信号与原信号的相干性较分层阈值降噪的结果好,但左前悬架上安装点垂向的振动能量主要集中在 10 Hz 左右,而该频率处分层阈值降噪信号与原信号相干系数也比较高,基本保留了信号的基本特征.

综上所述,分层阈值降噪的效果比全局阈值降噪的效果好,所以采用分层阈值降噪方法对振动信号进行降噪处理.

4 电动汽车混沌问题研究

对采集的加速度信号进行降噪处理. 计算信号的相图和庞加莱截面,以观察时间序列的动力学特性,并利用互信息法计算时间延迟^[11]、Cao 法计算最小嵌入维^[12],最后利用小数据量法得到最大李雅普诺夫指数.

4.1 相图与庞加莱截面

计算左前轮心垂向、左前减振器上安装点垂向和电池底部中心垂向振动信号的相图与庞加莱截面,如图 7 所示.

从图 7 中可以看出,3 个振动信号的庞加莱截面为一些成片的密集的点集,不具有明显的分形特征,通过这 3 幅图的庞加莱截面不能判断系统是否

为混沌运动状态.

4.2 小数据量计算最大 Lyapunov 指数

最大 Lyapunov 指数的几何意义是量化初始闭轨道的指数发散和估计系统的总体混沌水平的量. 利用小数据量法计算最大 Lyapunov 指数时, 对嵌入维、时间延迟和平均周期的选择都具有较好的鲁棒性. 所以选用小数据量法计算时间序列的最大 Lyapunov 指数^[13].

小数据量法计算最大 Lyapunov 指数的一般流程如图 8 所示.

利用互信息量法计算延迟时间如图 9 所示, 其中 τ 为选择的延迟时间.

利用 Cao 法计算嵌入维如图 10 所示, 其中 E 为重构相空间中初始靠近的 2 个点随时间的推移空间距离的变化比值. E_1 为利用二范数得到的比值, E_2 为利用均值得到的比值, 当 E_1, E_2 不再变化时, 此时 m 为选择的最小嵌入维数.

根据选择的延迟时间和最小嵌入维数, 利用小

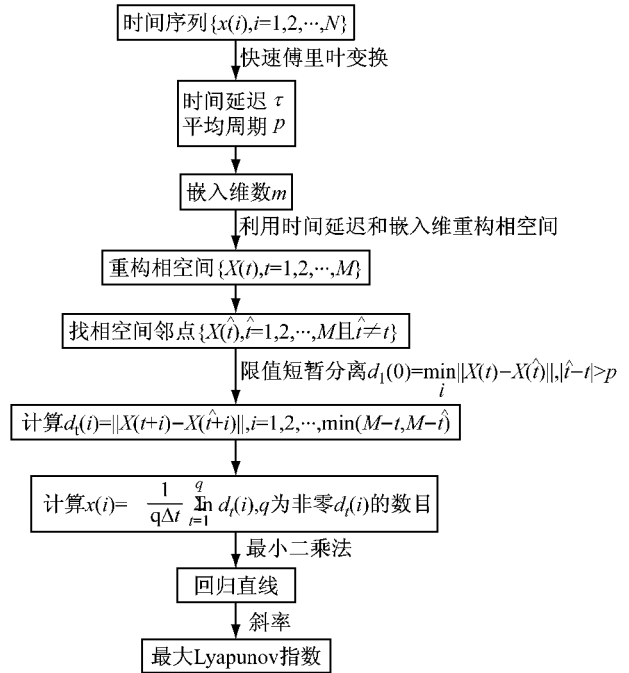


图 8 小数据量法的一般流程

Fig. 8 The general process of the small data sets method

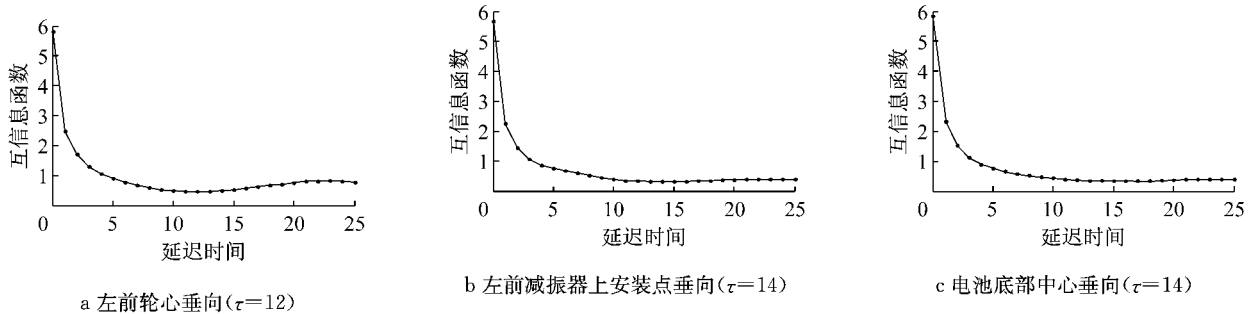


图 9 延迟时间

Fig. 9 Delay time

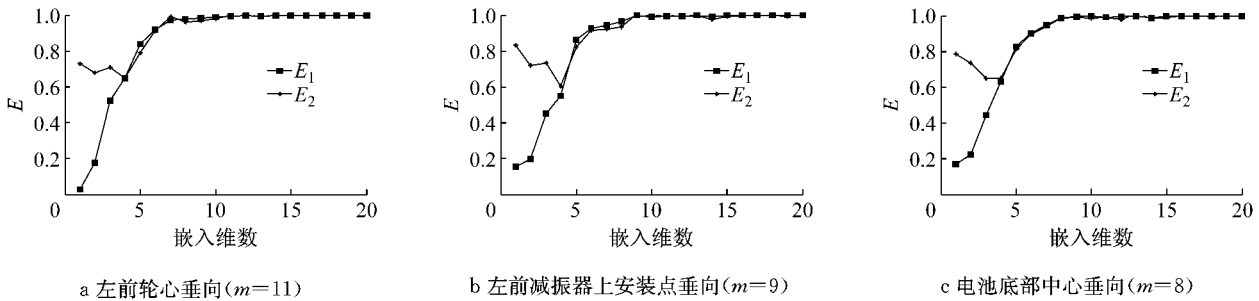


图 10 嵌入维数

Fig. 10 Embedding dimension

数据量法计算最大李雅普诺夫指数, 计算结果如图 11 所示, 其中 λ 为最大 Lyapunov 指数

从图 11 可以看出, 可以发现左前轮心垂向的最大 Lyapunov 指数大于零, 结合庞加莱截面图可知,

左前轮心垂向的时间序列具有混沌特性. 所以, 电动汽车在铺路面上行驶时, 采集到的时间序列信号具有混沌特性.

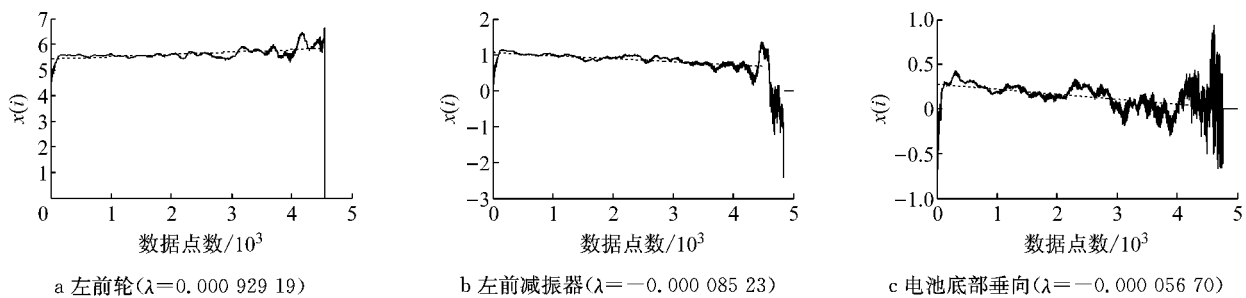


图 11 最大 Lyapunov 指数

Fig.11 The largest Lyapunov exponent

5 结论

通过试验验证了电动汽车在实际行驶过程中存在混沌运动现象,主要做了以下几个方面的研究:

(1)在铺路面上对某款电动汽车进行了实车试验,测得左前轮心垂向、左前减振器上安装点垂向和电池底部中心垂向的振动加速度信号。

(2)利用全局阈值降噪和分层阈值降噪的方法分别对信号进行了降噪处理,发现分层阈值降噪的效果较好。

(3)计算振动信号的相图和庞加莱截面,并利用互信息法计算时间延迟、Cao 法计算最小嵌入维,最后利用小数据量法得到最大李雅普诺夫指数。数值分析结果表明,汽车在铺路面上行驶时具有混沌运动特性。

参考文献:

- [1] 李月, 杨宝俊. 混沌振子检测引论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- LI Yue, YANG Baojun. Introduction of chaotic oscillator detection [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [2] Zhang Z, Chau K T, Wang Z. Analysis and stabilization of chaos in the electric vehicle steering system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 62(1):118.
- [3] 牛治东, 吴光强. 电动汽车非线性悬架系统混沌特性[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(3):442.
- NIU Zhidong, WU Guangqiang. Chaos in nonlinear suspension system of electric vehicle [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(3):442.
- [4] Gao Y. Hopf bifurcation and chaos in synchronous reluctance motor drives[J]//IEEE Transactions on Energy Conversion,

2004, 19(2):296.

- [5] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- LV Jinhu, LU Jun'an, CHEN Shihua. Chaotic time series analysis and its application [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.
- [6] Barrett M D. Continuous control of chaos[J]. Physics D, 1996, 91(4):310.
- [7] Hao Bailin. Elementary symbolic dynamics and chaos in dissipative systems[M]. Singapore: World Scientific, 1989.
- [8] Wolf A, Swift J B, Swinney H L, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series [J]. Physics D, 1985, 16(3): 285.
- [9] 韩敏. 混沌时间序列预测理论与方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- HAN Min. Chaotic time series prediction theory and method [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [10] 林小龙, 张晓龙, 孙仁云. 基于小波分析的车轮六分力信号的去噪研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2014, 28(2):51.
- LIN Xiaolong, ZHANG Xiaolong, SUN Renyun. Study on denoising of six axis wheel force signal based on wavelet analysis [J]. Journal of Hubei University of Automotive Technology, 2014, 28(2):51.
- [11] 张菁, 樊养余, 李慧敏, 等. 相空间重构中延迟时间选取的新算法[J]. 计算物理, 2011, 28(3): 469.
- ZHANG Jing, FAN Yangyu, LI Huimin, et al. An improved algorithm for choosing delay time in phase space reconstruction [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2011, 28(3): 469.
- [12] Cao L. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series [J]. Physics D, 1997, 110(1/2):43.
- [13] 杨永锋, 仵敏娟, 高喆, 等. 小数据量法计算最大 Lyapunov 指数的参数选择[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(3):371.
- YANG Yongfeng, WU Minjuan, GAO Zhe, et al. Parameters selection for calculating largest Lyapunov exponent from small data sets [J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2012, 32(3):371.