

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.04.024

# 一种高速列车蛇行分岔图和频率的快速算法

姜成英,罗仁

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

**摘要:**提出一种快速计算高速列车蛇行运动分岔图和蛇行频率的方法。运用降速法通过动力学仿真计算车辆横向位移,采用滑移窗口取极值点的方法计算位移包络线,得到蛇行运动分岔图;根据过零点搜索计算蛇行频率。在 Simpack 软件中建立某高速拖车非线性动力学模型,通过降速法计算车辆在典型工况下的蛇行运动分岔图和蛇行频率。结果表明:所提算法能够有效剔除异常值,快速得到的蛇行运动分岔图和频率曲线光滑,满足高速列车优化设计和性能预测的需求。

**关键词:**高速列车;蛇行运动;分岔图;蛇行频率

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)04-00092-04

## Fast Algorithm for Hunting Bifurcation Diagram and Frequency of High-speed Trains

JIANG Chengying, LUO Ren

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** An algorithm for fast calculating the hunting bifurcation diagram and hunting frequency of high-speed trains is proposed. The deceleration-speed algorithm is adopted to work out the lateral displacement of the vehicle by dynamic simulation, and sliding-window is applied to calculate displacement envelope by extreme point extraction method obtaining the hunting bifurcation diagram. The hunting frequency is determined by the zero-crossing search. The nonlinear dynamic model of a high-speed trailer car is established in Simpack, and the vehicle's hunting bifurcation diagram and hunting frequencies under typical operating conditions are calculated by deceleration-speed simulation. The results show that the proposed algorithm can effectively eliminate the outliers, quickly work out the hunting bifurcation diagram and smooth frequency curve, which meets the requirements of optimal design and performance prediction for high-speed trains.

**Keywords:** high-speed train; hunting motion; bifurcation diagram; hunting frequency

## 0 引言

蛇行运动的稳定性是铁道车辆系统动力学中最为重要的研究内容之一,围绕该课题,学者们多从蛇行运动的发生原因和抑制等方面展开研究。李晓峰等针对动车组在运营期间存在主频 1~3 Hz 的晃车问题,从车轮踏面外形状、车轮镟修质量、钢轨廓形打磨精度等方面进行了调查分析,给出了经济性镟修、线路适应性的改进方案<sup>[1]</sup>。李凡松等基于实测车轮外形和钢轨廓形,建立刚柔耦合动力学模型,再现了动车组车体异常弹性振动现象。分析表明:异常的轮轨匹配关系导致转向架的蛇行运动频率与车体一阶菱形模态频率接近,进而引发了车体的异常振动;前后转向架的反相位蛇行运动则不会激发车体的一阶菱形模态<sup>[2]</sup>。山长雄亮等通过滚动试验台研究了轮对不同初始激励下的蛇行运动发生条件。研究表明:当车速介于非线性临界速度和线性临界速度之间时,亚临界 Hopf 分岔的发生与否取决于轮对初始激励幅值,车速越高,发生蛇行运动所需的激励幅值越小<sup>[3-4]</sup>。刘宏友等基

于根轨迹法、极限环法、多种标准等 12 种方法,计算了某型高速货车转向架在空载工况下的蛇行失稳临界速度。结果表明:降速法、UIC 518 法、TSI L84 法的计算结果最为保守<sup>[5]</sup>。郭平波等以时间为慢变参数,给车辆系统施加小扰动并缓慢提高车速,可以计算得到车辆系统的线性临界速度;让车辆系统在足够高的速度下发生周期蛇行运动,然后缓慢降低车速并让车辆在光滑轨道上运行,可以计算得到非线性临界速度<sup>[6]</sup>,后者也被称为降速法。

综上所述,蛇行运动临界速度、分岔图幅值、蛇行频率均是高速列车的重要参数,快速精确地计算这些参数对高速列车优化设计具有重要意义。本文针对降速法计算得到的轮对横向位移时间历程曲线存在毛刺、一个周期多个峰值、整体偏移等结果,提出了采用滑移窗口取峰谷值点的方法计算位移的包络线,从而得到蛇行运动分岔图;并根据同相位零点迭代搜索计算蛇行频率。

## 1 降速法数据处理

在车辆高速运行时,蛇行运动具有复杂的非线性,在

**基金项目:**国家自然科学基金项目(U2034210;11790282);牵引动力国家重点实验室自主研究课题(2019TPL-T15)

**第一作者简介:**姜成英(1996—),男,山东威海人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学。

不同速度下的蛇行运动可能是单一周期运动、拟周期运动或者混沌运动。大量仿真分析得到的轮对横移曲线亦存在多种形态:部分工况在高速下出现不等幅的拟周期振荡;部分工况出现幅值调制现象;部分工况存在毛刺和局部凸起。这些曲线加大了幅值包络处理的难度。

常规的包络算法会将所有的极值点筛选出来,时域信号局部微小的突起或凹陷容易导致上下包络线的异常抖动,局部毛刺也会被判断为包络线,从而得不到正确的蛇行分岔图和蛇行频率。图 1(a)为 Simpack 后处理中通过 93 号滤波器的极值算法对某工况轮对横移曲线的处理结果。图中可见,该算法将局部突起处的极值误判为上下包络点,导致蛇行分岔图和蛇行频率异常波动。图 1(b)为另一工况经包络处理得到的蛇行运动分岔图和频率,可见,曲线存在严重的异常波动,蛇行特征并不明显。

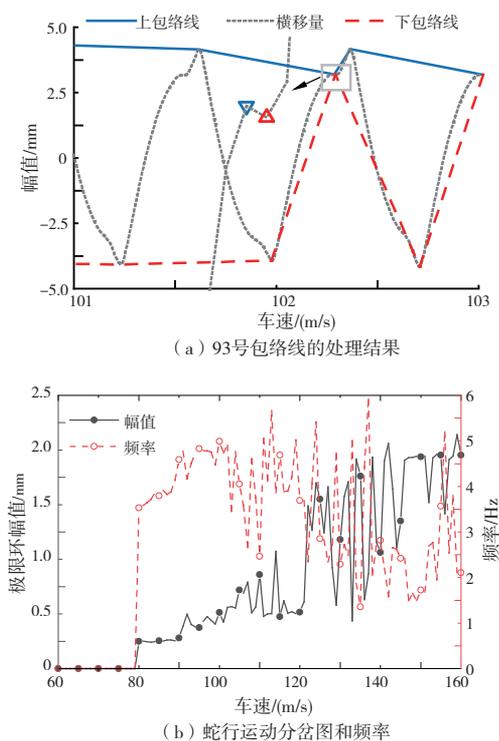


图 1 常规包络算法异常计算结果

## 2 蛇行运动幅值的处理

降速法的初始激扰会导致初始时段的轮对横移极限幅值较大或存在剧烈波动。为了消除初始激扰的影响,将初始车速设置为高于需要分析的车速范围,然后以所研究车速范围内的稳定蛇行运动量为研究对象。由于采样和计算的误差,少数工况的车速中可能存在重复值,因而,在加载数据之后需检验车速的单调性。部分工况的轮对平衡位置偏离了轨道中心线,需要去掉轮对横移的趋势项。

本文采用 Matlab 中的 findpeaks 函数计算包络线,通过指定合理的参数阈值,有效地剔除了包络线中的异常点。设置 3 个参数:MinPeakDistance、MinPeakProminence 和 MinPeakHeight,前两者用于确定包络线,后者用于确定

最小的包络线幅值(低于此幅值认为包络线=0)。MinPeakDistance 定义了峰值点间的最小间隔  $n$ 。从最高的峰值点开始计算,并在该峰值点前后各  $n$  个点之外寻找次高峰点,以此类推;通过指定 MinPeakDistance 可剔除相邻且峰值较小的点,减小分岔图中幅值的波动,本文将该参数设置为 128(与 Simpack 软件中的采样频率相同),即大约每隔 2 s 确定 1 个峰值点。MinPeakProminence 和 MinPeakHeight 则是根据峰的凸出量、峰点相对零点的高度来筛选峰点。峰的凸出量、高度如图 2 中的实线所示。可见,通过指定 MinPeakProminence 便可以剔除图 1(a)上包络线中的小突起。本文将该参数设置为 0.4 mm。通过 findpeaks 函数得到包络线的峰值值之后,再选择峰值  $> 0$ 、谷值  $< 0$  的点,进行下述去毛刺处理。

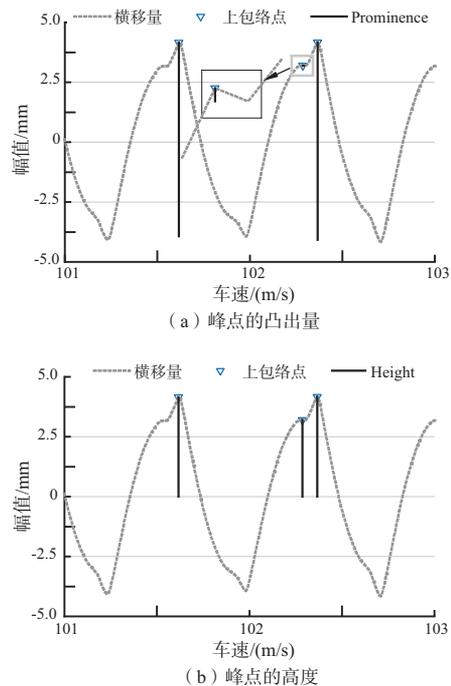


图 2 峰值计算方法示意图

如果轮对横移曲线中存在毛刺,即使通过设置最小峰谷间隔处理得到的峰值值中也必会包含这些毛刺。本文通过滑移窗并根据第一四分位数  $Q_1$ 、第三四分位数  $Q_3$  以及四分位距  $I_{QR}$  来进行剔除:窗长设置为 16 个点(即在 128 Hz 采样频率下的时窗长为 0.125 s),滑移的步长与窗长相同;将幅值  $< Q_1 - I_{QR}$  或者  $> Q_3 + I_{QR}$  的点认定为是离群点,予以剔除。通常最后一帧的长度会小于窗长,本文是将其自后向前补齐至窗长后再行判断。此外,还应去除与上一帧重复的点。

如果不存在峰谷值以及峰谷值长度不足 1 帧,该工况未发生蛇行运动,将最大车速作为临界速度。否则,根据蛇行运动幅值  $= 0.2$  mm 来确定临界速度。

由于上下包络线中峰谷值点对应的速度不一致,本文将去除毛刺后的峰谷值点均以 1 m/s 为间隔,从 6 m/s 线性插值到 166 m/s,取上下包络的均值得到轮对蛇行运动分岔图,并将小于临界速度的极限环幅值设为 0。蛇行运动幅值处理流程如图 3 所示。

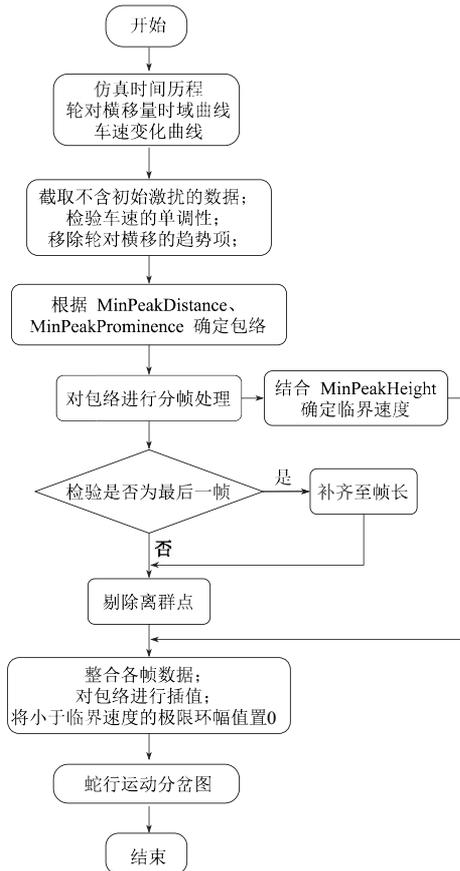


图3 蛇行运动幅值处理的流程图

### 3 蛇行运动频率的处理

在较短的时间间隔下,可以将轮对的蛇行运动看做是周期信号,将相距  $n$  个周期同相位点的时间差记为  $\Delta t$ 、速度差记为  $\Delta v$ ,降速法中的车辆减速度为  $a$ ,则蛇行运动频率  $f$  为

$$f = n \frac{1}{\Delta t} = n \frac{a}{\Delta v} \quad (1)$$

在轮对横移幅值随时间变化的曲线中,比较易得的同相位点有极值点和零点。由于部分工况极值点附近的幅值波动较大(尤其是发生拟周期和混沌等复杂的蛇行运动时),相邻的极值点间会存在相位差,从而导致计算的蛇行频率不准确。因而,本文采用零点来计算蛇行频率。限于离散采样,很难在数据点中找到幅值为 0 的点,根据零点定理,对样本点进行迭代搜索,找到相邻异号的两个点,并将两点连线与  $x$  轴的交点定为零点;再根据式(1)计算近似蛇行频率,并将该频率记做  $\Delta v/2$  处的频率。为了减弱毛刺的干扰,采用和幅值异常检测相同的策略来剔除频率中的毛刺;采用幅值处理中的方法对车速进行插值,进而得到蛇行运动频率随车速的变化曲线。也可以采用短时傅里叶变换对这种周期信号进行处理,但要想得到更精确的频率信息(即足够的频域分辨率),时窗就要足够宽,从而导致时域内的分辨率降低。采用极值法、傅里叶变换、零点法计算得到的蛇行运动频率对比如图 4 所

示。图 1(a)中的突起会导致极值法计算的频率曲线剧烈波动;傅里叶变换受限于时窗宽,频域的分辨率较低,故曲线呈阶梯状变化;而零点法计算的频率曲线最为光滑,频率信息也更为完整。

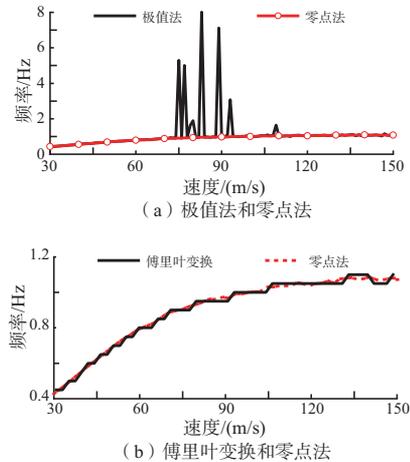


图4 不同计算方法下的蛇行运动频率对比

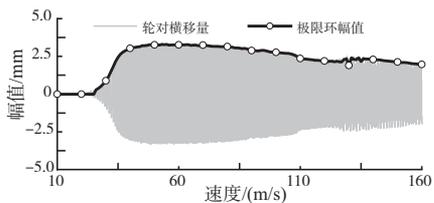
### 4 典型工况的计算结果

建立某时速 350 km 高速列车拖车非线性动力学模型,考虑一二系悬挂中的弹簧、阻尼和止挡非线性,轮轨接触采用 Hertz 弹簧,轮轨蠕滑力采用 Fastsim 计算。根据实际测量的钢轨型面和车轮型面,组合得到比较恶劣的轮轨匹配状态,采用降速法计算车辆系统从 170 m/s 降速到 0 m/s 过程中的蛇行运动响应,对一位轮对横向位移数据进行处理来计算蛇行运动分岔图和蛇行频率。由于采用了较恶劣的轮轨匹配关系,车辆的 8 个车轮采用相同的廓形,左右钢轨廓形也恒定,某些工况计算的临界速度很低,这与实际运营状态不符,这样设置主要是为了研究高速列车的蛇行运动规律,而不是模拟线路运营状态。

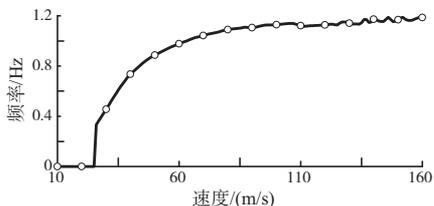
经过大量动力学仿真发现,该车固有的蛇行运动主要包括两类:一类是车辆在较低的速度下就开始发生蛇行运动,轮对横移幅值相对较大,蛇行频率较低;另一类是车辆在较高的速度下才开始蛇行运动,轮对横移幅值较小,蛇行频率较高。前者主要是由于轮轨匹配等效锥度低于正常运用范围所导致,后者主要是由于车轮磨损导致轮轨等效锥度过大引起的。前者当等效锥度接近 0 时容易出现轮对横移具有趋势项的现象;后者的轮对横移曲线容易在毛刺、峰值点附近出现局部凹凸现象以及在高速下发生拟周期和混沌等复杂蛇行运动。

采用本文方法对大量动力学仿真结果进行处理,均能得到比较光滑和准确的蛇行运动近似分岔图和蛇行运动频率曲线,下面给出 3 个典型结果。

对于低频大幅晃车的蛇行运动处理结果如图 5 所示。由图可见,本文算法能够较好地提取不同车速下的极限环幅值,得到比较光滑的蛇行运动分岔图(即图中的极限环幅值曲线)和蛇行频率图。某些工况会发生轮对横移幅值在不同车速下的不等幅振荡,缩小滑动窗口也可以得到更加细微的蛇行分岔图。



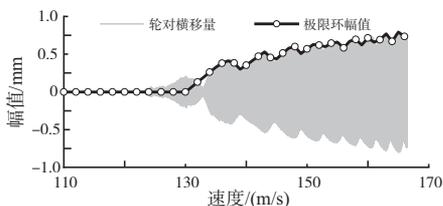
(a) 轮对横移时间历程和蛇行分岔图



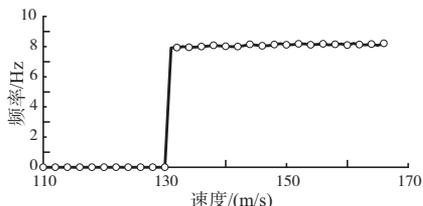
(b) 蛇行运动频率

图5 低频大幅晃车的蛇行运动计算结果

对高频小幅抖车工况的蛇行运动处理结果如图6所示。由图可见,极限环幅值曲线很好地贴合了轮对横移包络线,临界速度的取值也能满足工程精度要求,蛇行运动频率曲线比较光滑。



(a) 轮对横移时间历程和蛇行分岔图

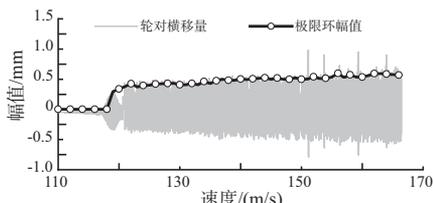


(b) 蛇行运动频率

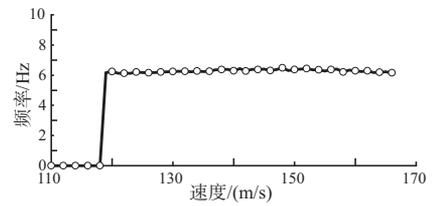
图6 高频小幅抖车工况的蛇行运动计算结果

轮对横移幅值曲线中存在毛刺的工况处理结果如图7所示。由图可见,极限环幅值曲线和蛇行频率曲线比较光滑,基本不受局部毛刺的影响,说明本文的算法可以有效地消除毛刺的影响。

由于在车辆优化设计和性能预测时,主要关注蛇行运动临界速度、蛇行幅值范围和频率范围,故图5-图7的计算结果已经足够满足工程应用需要。



(a) 轮对横移时间历程和蛇行分岔图



(b) 蛇行运动频率

图7 对横移曲线具有毛刺工况的处理结果

### 5 结语

1) 在计算峰谷值的滑移窗函数中设置合适的极值最小横向间隔和极值最小高度间隔,并采用离群点剔除方法,可以有效消除时间历程曲线中的局部凹凸和毛刺的影响,得到比较光滑的蛇行运动分岔图。

2) 极值法、短时傅里叶变换计算的频率曲线容易出现剧烈波动、分辨率较低等问题,而零点法计算的频率曲线较为光滑且更加准确。

3) 在车辆优化设计和性能预测的仿真分析中,主要关注蛇行运动临界速度、幅值和频率范围,本文方法的计算结果能够满足工程应用需要。

#### 参考文献:

[1] 李晓峰,李国栋,宋春元,等. 动车组车辆低频横向晃动分析及改进措施[J]. 城市轨道交通研究,2019,22(2):66-69,73.  
 [2] 李凡松,王建斌,石怀龙,等. 动车组车体异常弹性振动原因及抑制措施研究[J]. 机械工程学报,2019,55(12):178-188.  
 [3] YAMANAGA YUSUKE,雷阳. 激励条件对评定蛇行运动临界速度的影响[J]. 国外铁道车辆,2020,57(5):24-29.  
 [4] 山长雄亮,彭惠民. 车辆转向架蛇行运动的发生条件[J]. 国外铁道车辆,2020,57(5):35-38.  
 [5] 刘宏友,高常君,王云鹏,等. 160 km/h 快捷货车转向架蛇行失稳临界速度的确定方法[J]. 铁道车辆,2017,55(6):1-5,18.  
 [6] 郭平波,曾京. 确定车辆系统线性和非线性临界速度的新方法[J]. 铁道车辆,2000,38(5):1-4.

收稿日期:2021-03-09