

轨道车辆一系悬挂定位刚度对一次蛇行的影响

高程程,王勇,黄立,魏博文

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要: 车辆一次蛇行稳定性对车辆运行平稳性及乘坐舒适性等有重要影响。在分析轨道车辆一次蛇行运动失稳机理的基础上,利用 SIMPACK 建立 CRH3 型高速列车多刚体整车系统仿真模型,仿真计算不同等效锥度下不同一系横向定位刚度 K_{py} 和一系纵向定位刚度 K_{px} 转向架蛇行运动频率,得到不同等效锥度下提高车辆一次蛇行运动稳定性的一系定位刚度范围。

关键词: 轨道车辆;一次蛇行运动;动力学仿真;一系悬挂定位刚度

中图分类号: U273.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2022)03-0100-04

Influence of Primary Suspension Positioning Stiffness on Primary Hunting of Rail Vehicles

GAO Chengcheng, WANG Yong, HUANG Li, WEI Bowen

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

Abstract: The stability of primary hunting motion of the vehicle has an important influence on the running stability and riding comfort of the vehicle. Based on the analysis of the mechanism of the instability of primary hunting of rail vehicles, SIMPACK is used to establish a simulation model of the multi-rigid body system of the CRH3 high-speed train, the frequency of bogie with different lateral primary suspension positioning stiffness K_{py} and longitudinal primary suspension positioning stiffness K_{px} under different equivalent tapers are simulated and calculated to obtain a series of primary suspension positioning stiffness that can improve the stability of primary hunting under different equivalent tapers.

Keywords: rail vehicles; primary hunting; dynamic simulation; primary suspension positioning stiffness

0 引言

由轨道水平不平顺引起的机车车辆横向滚摆耦合振动^[1]对车辆运行的平稳性有重要影响,而一系定位刚度在车辆横向滚摆耦合振动激励的传递上起到至关重要的作用^[2]。因此有必要从一系定位刚度的角度研究一次蛇行特性。

国内学者对一次蛇行进行了大量的研究。张洪从模态参数识别角度,探究车辆系统出现低频振动的原因^[3]。池茂儒等研究了转向架蛇行运动对轨道车辆平稳性的影响,探究了车辆晃动的原因^[4]。

本文在前人研究的基础上,通过 SIMPACK 建立 CRH3 型车动力学模型,对不同一系定位刚度下车辆的转向架蛇行运动频率进行仿真计算,同时仿真不同一系定位刚度下轨道车辆平稳性、车体横向振动加速度及车辆振动主频,探讨在保证转向架不失稳的前提下,通过调节一系定位刚度来实现对车体一次蛇行运动失稳的抑制。

1 整车非线性动力学模型

利用 SIMPACK 仿真软件对车辆系统进行建模和求解。由于本文主要研究一次蛇行问题,因此忽略弹性变形,将轮对、构架和车体考虑为刚体。整车模型自由度如表 1 所示,其中轮对垂向和侧滚运动是非独立运动。

表 1 模型各部件及其自由度

部件	自由度
轮对	纵向、横向、垂向、摇头、点头、侧滚
构架	纵向、横向、垂向、摇头、点头、侧滚
车体	纵向、横向、垂向、摇头、点头、侧滚
转臂定位	点头

构架和轮对通过一系悬挂连接,主要部件有一系转臂节点定位装置、一系垂向减振器、一系钢弹簧等。车体和构架通过二系悬挂连接,主要部件有抗蛇行减振器、二系横向减振器、横向止挡、空气弹簧等。模型坐标采取铁道坐标系,轨道激励采用实测武广谱。

为准确复现实际车辆的运行状况,整车动力学模型考虑了轮轨接触非线性特性和悬挂元件非线性特性,如轮轨接触非线性和蠕滑非线性、抗蛇行减振器非线性和横向止挡非线性等。建立 CRH3 型高速列车多刚体整车系统仿真模型,如图 1 所示。

2 一次蛇行运动失稳机理

一次蛇行运动失稳就是铁道车辆系统中存在的典型的频率俘获现象^[5],本节依据线路试验分析相关数据,分析车体固有频率和转向架蛇行频率的相互俘获关系。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11790282)

第一作者简介: 高程程(1996—),女,山东东营人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学。

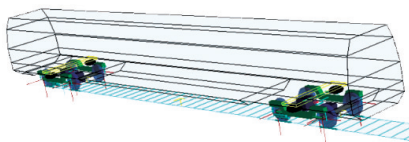


图1 CRH3型高速列车多刚体整车系统仿真模型

某高速客运专线个别区段发生的车体短时间的晃动现象具有明显的一次蛇行特征,依据 GB/T 5599—2019 机车车辆动力学性能评定及实验鉴定规范^[6],在轴箱上方构架端部布置测点,车体垂向、横向振动加速度测点对角布置在1位、2位转向架中心偏向车体一侧1000 mm的车内地板上,列车运行速度为300 km/h。

对失稳较严重的2位平稳性测点的横向振动加速度信号做短时傅里叶变换(STFT),得到列车在运行全程时的时频图,如图2所示。显然,车体的横向振动能量集中在1.5 Hz附近,车体振型主要为1.5 Hz附近的摇头和上心摆,这是影响平稳指标的最主要原因。

图2和图3分别给出了线路上一次蛇行时1位、2位转向架横向振动加速度信号的FFT。由图可得,前后两个转向架的蛇行频率均为1.5 Hz,可知线路上发生一次蛇行时转向架的蛇行频率和车体的振动主频一致,车体和转向架之间出现了振动同步。

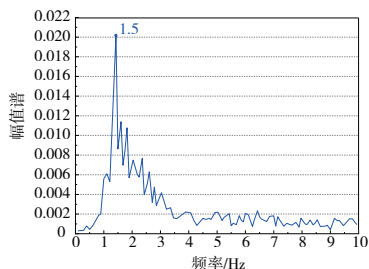


图2 1位转向架横向振动频谱图

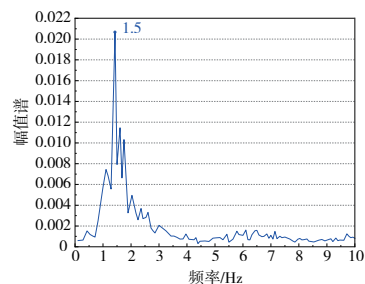


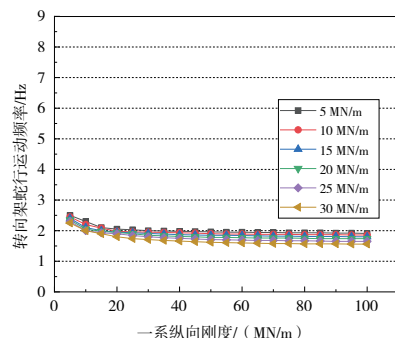
图3 2位转向架振动频谱图

通过对试验数据的分析可知,一次蛇行是由于转向架蛇行频率被车体悬挂模态频率(主要是上心摆频率,为1.5 Hz)所俘获造成的。

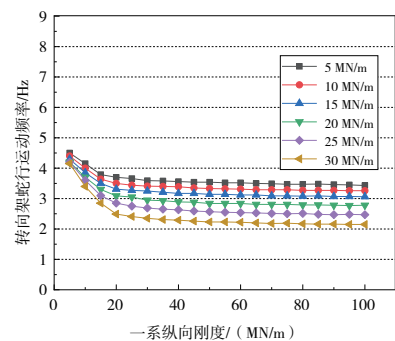
3 一系定位刚度对蛇行运动频率的影响

转向架蛇行运动频率受到诸多因素的影响,为了直观

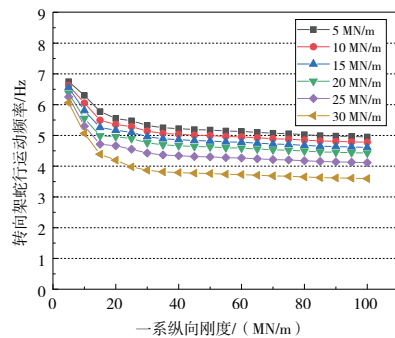
地展现一系定位刚度对转向架蛇行运动频率的影响,在SIMPACK中将抗蛇行减振器失效,排除抗蛇行减振器的影响,然后通过SIMPACK中更换不同类型和里程的踏面文件,实现了轮轨接触等效锥度0.04~0.40的变化,改变模型中车辆系统的一系定位纵向定位刚度 K_{px} 和一系横向定位刚度 K_{py} ,速度取300 km/h。一系定位刚度对转向架蛇行频率的影响如图4所示。



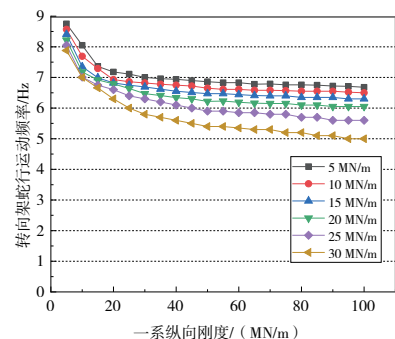
(a) 等效锥度为0.04



(b) 等效锥度为0.10



(c) 等效锥度为0.20



(d) 等效锥度为0.40

图4 一系定位刚度对转向架蛇行频率的影响

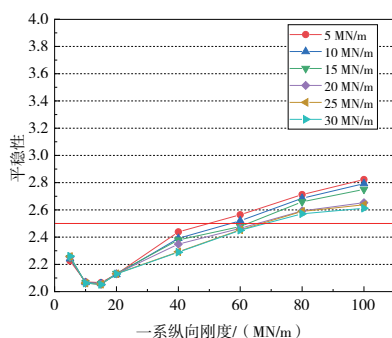
结合图 4 各图可以看出,在同一轮轨接触等效锥度和同一系横向定位刚度下,随着一系纵向刚度的增加,转向架蛇行频率逐渐减小,且减小的趋势逐渐平缓;同样,在同一轮轨接触等效锥度和同一系纵向定位刚度下,随着一系横向刚度的增加,转向架蛇行频率也逐渐减小;并且等效锥度从 0.04~0.40,相同一系定位刚度及运行速度下的转向架蛇行运动频率明显变大,当一系纵向刚度较小时,这种增加趋势更明显。

4 定位刚度对一次蛇行的抑制作用分析

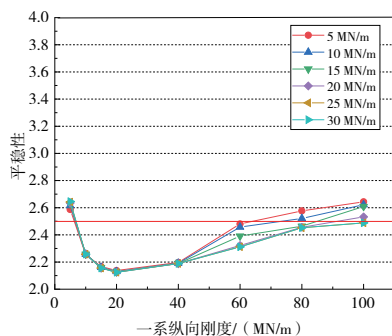
由第 3 节分析可知,车辆系统的一系悬挂定位刚度参数设置对转向架的蛇行运动频率有较大的影响,结合第 2 节中的分析,车体一次蛇行运动失稳是由于转向架的蛇行运动频率被车体的悬挂模态频率俘获所引起的同步振动所导致的^[5]。因此,可以初步判断,通过改变一系悬挂定位刚度参数,改变转向架蛇行运动频率,可以实现抑制车体一次蛇行失稳。

衡量车体是否发生一次蛇行失稳现象,需要从多个维度来看。车体横向平稳性指标是一个关键且可以量化的指标参数,再结合车体横向振动加速度的谐波阵型和振动频率即可以判断车体是否发生一次蛇行失稳。因此本节主要分析在不同等效锥度的工况下,车体横向平稳性指标与一系悬挂定位刚度参数的关系,并结合车体横向振动的波形来确认定位刚度对车体一次蛇行运动失稳的影响。

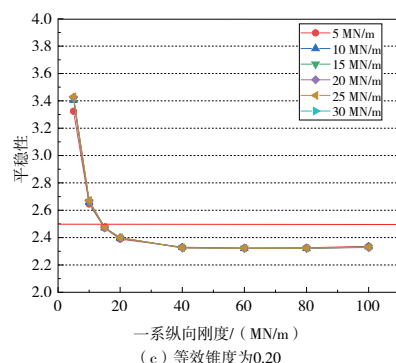
图 5 为不同等效锥度下的车体 1 位平稳性测点横向运行平稳性与一系定位刚度之间的关系。



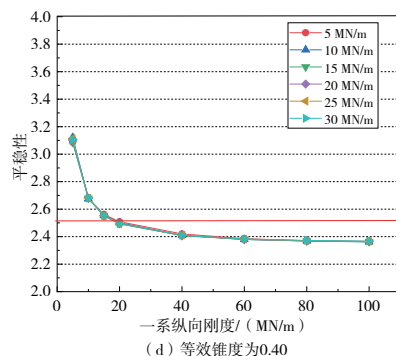
(a) 等效锥度为 0.04



(b) 等效锥度为 0.10



(c) 等效锥度为 0.20



(d) 等效锥度为 0.40

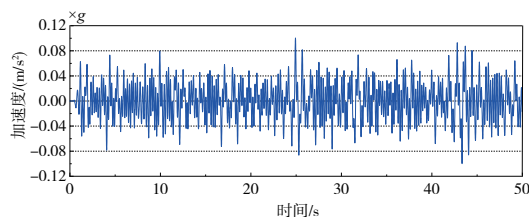
图 5 一系定位刚度对平稳性的影响

由图 5 可知,在等效锥度较小时(等效锥度 0.04、0.10),随着一系纵向刚度的逐渐增加,平稳性指标先减小后增大;随着一系横向刚度的增加,平稳性指标逐渐减小。相比于一系纵向刚度,一系横向刚度对平稳性的影响较小,且等效为 0.10 时,车辆能获得足够平稳性的一系定位刚度范围更广。在等效锥度较大时(等效锥度 0.20、0.40),随着一系纵向刚度的逐渐增加,平稳性指标先迅速减小后趋于稳定,当一系纵向刚度继续增加时,其对平稳性影响不大,且此时车辆平稳性基本不随一系横向刚度的增加而变化。

仅仅从平稳性指标结果无法确定车体是否发生了一次蛇行运动失稳,因此下面从转向架和车体横向振动的角度分析车辆系统是否发生了一次蛇行运动失稳。取 2 个平稳性指标较大时的典型工况进行研究。

取等效锥度为 0.04、一系横向刚度为 10 MN/m、一系纵向刚度为 80 MN/m,仿真分析此时车体横向振动加速度的信号(经过 0.5~5 Hz 的带通滤波)和车辆的振动频率,如图 6 所示。

由图 6(a)可知,此时车体横向振动加速度幅值最大达到 0.1g,车体横向振动剧烈,且对比图 6(b)、图 6(c),车体与转向架振动主频都在 1.5 Hz 左右,此时转向架的蛇行运动频率被车体的悬挂模态俘获,发生了车体一次蛇行运动失稳。



(a) 车体横向振动加速度谐波阵型 (0.5~5 Hz 滤波)

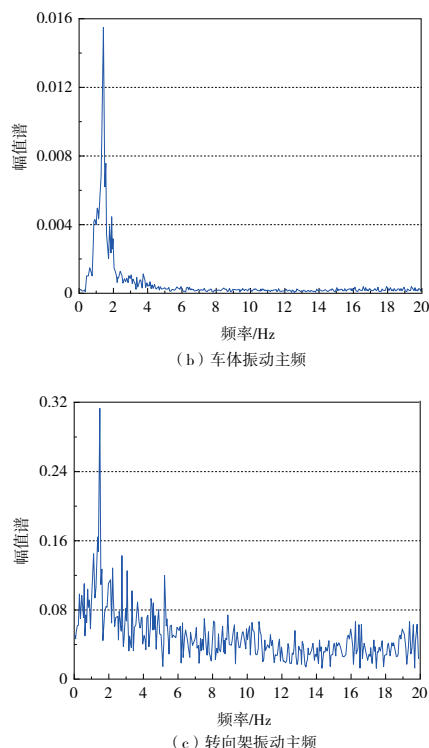


图6 车体横向振动加速度信号和车辆振动主频

取等效锥度为0.40、一系横向刚度为10 MN/m、一系纵向刚度为10 MN/m,仿真分析此时转向架横向振动加速度的信号和转向架及车体的振动主频,如图7所示。

由图7(a)可知,此时转向架横向振动的加速度符合GB5599—2019中“加速度峰值有连续6次以上达到或超过 8 m/s^2 时,判定转向架失稳”^[6]的标准规定,车辆发生了二次蛇形失稳。且对比图7(b)、图7(c),车体振动主频在1.8 Hz附近,而转向架的振动主频在5 Hz附近,二者频率相差较大不存在频率俘获现象,此时虽然车体平稳性指标较差,但并非是一次蛇行运动失稳。

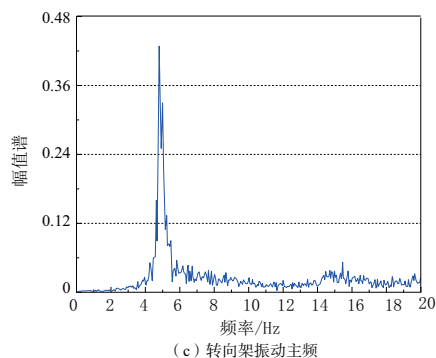
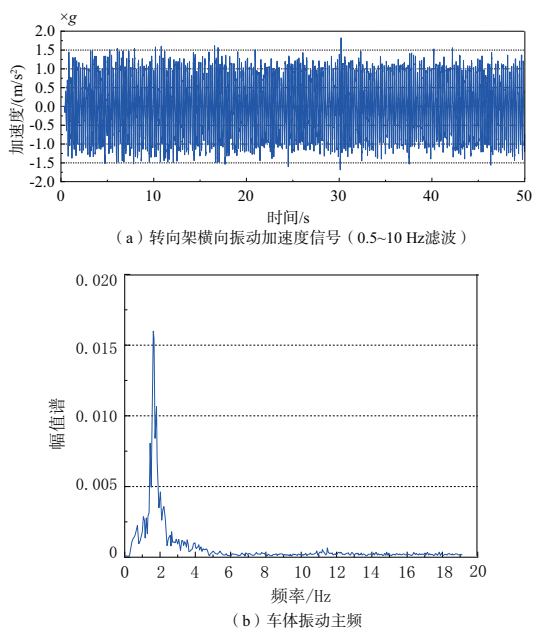


图7 转向架横向振动加速度信号和车辆振动主频

综合分析图4、图5(a)及图6可以发现,小等效锥度下,一系纵向定位刚度较大的车辆容易发生一次蛇形失稳,平稳性差,且此时转向架蛇行频率在1.5 Hz左右,这与第2节分析一致,可以通过改变一系悬挂定位刚度参数以改变转向架蛇行运动频率的方式,避免转向架蛇行运动频率被车体的悬挂模态频率俘获所引起的振动同步^[5],可以实现抑制车体一次蛇行失稳运动的目的。同理,综合分析图4、图5(d)及图6可知,大等效锥度下,一系纵向定位刚度较小的车辆容易发生二次蛇形失稳,也会导致车辆的平稳性差。

5 结语

从综合试验数据及仿真结果可以看出:一次蛇行是由于转向架蛇行频率被车体悬挂模态频率所俘获而造成的^[5],合理选择一系定位刚度参数,能够有效抑制小锥度车辆车体的一次蛇行运动失稳,且不会引起转向架的二次蛇行运动失稳。小锥度车辆应该选取较小的一系纵向和横向定位刚度,适当提高一系定位刚度,可以兼顾车体一次蛇行运动稳定性和转向架二次蛇行运动稳定性;大锥度车辆发生车体一次蛇行失稳的风险较低。为了更好地提升转向架二次蛇行运动稳定性,应该选取较大的一系定位刚度。

参考文献:

- [1] 赵远强,王自力. 转臂式轴箱转向架一系悬挂等效定位刚度的分析[J]. 电力机车与城轨车辆,2013,36(4):39-42,77.
- [2] 马广宇,曾京,汪群生. 基于城际动车组的踏面磨耗预测及参数优化[J]. 机械制造与自动化,2019,48(4):32-36.
- [3] 张洪. 基于运行模态识别的铁路客车动力学特性研究[D]. 上海:同济大学,2005.
- [4] 池茂儒,张卫华,曾京,等. 轮径差对车辆系统稳定性的影响[J]. 中国铁道科学,2008,29(6):65-70.
- [5] 方静赛. 铁道车辆转向架与车体振动同步研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- [6] GB/T 5599—2019. 机车车辆动力学性能评定及实验鉴定规范[S].

收稿日期:2021-03-08