

针对地铁车辆晃动的轨道几何不平顺敏感波长分析

齐英杰¹ 李伟^{1*} 刘增华² 周亚波¹ 温泽峰¹

1.西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室,成都,610031

2.广州地铁设计研究院股份有限公司,广州,510010

摘要:针对直线电机地铁车辆横向晃动问题,调查了线路轨道几何不平顺与车辆平稳性指标的关联关系,利用多体动力学软件SIMPACK建立了直线电机车辆动力学模型,研究了轨道几何不平顺对车辆动力学性能的影响,分析了轨道几何不平顺敏感波长范围。结果表明,车辆在直线段高速运行时车体横向出现2 Hz左右低频晃动,与晃动线路存在10~13 m波长特征的轨向不平顺相关;轨道几何不平顺敏感波长范围主要由车辆自身悬挂模态频率决定,轨向不平顺对轮轨横向力和车体横向加速度响应影响最为显著;对于直线电机地铁车辆横向晃动,轨向不平顺敏感波长段为10~13 m、17~20 m,高低不平顺敏感波长段为5~8 m和12~17 m,扭曲和水平不平顺敏感波长段均为5~8 m和15~20 m;轨道几何不平顺的激励频率在10~13 m敏感波长段主要与车辆上心滚摆频率接近,在15~20 m敏感波长段主要与车辆点头频率和摇头频率接近。

关键词:直线电机;车辆动力学性能;轨道几何不平顺;敏感波长;横向晃动

中图分类号:U213.2

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Sensitive Wavelength Analyses of Track Geometric Irregularities for Metro Vehicle Swayings

QI Yingjie¹ LI Wei^{1*} LIU Zenghua² ZHOU Yabo¹ WEN Zefeng¹

1.State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031

2.Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, 510010

Abstract: Aiming at the problems of LIMs metro vehicle lateral swayings, correlation analyses between the characteristics of track irregularities and the stability indicators of the vehicles were studied. The dynamics software SIMPACK was used to establish a dynamics model of the LIM vehicles. The influences of track irregularity on the vehicle dynamics performances were simulated and the sensitive wavelength ranges of track geometric irregularity for the LIMs vehicle swayings were analyzed. Results show that the low-frequency lateral swaying of carbody occurs at about 2 Hz when the vehicles are travelling at high speed in a straight line, which is related to the lateral track periodic irregularity with wavelengths of 10~13 m. The suspension mode frequency of the vehicles determines the sensitive wavelength range of different track irregularities. Alignment irregularity has the most significant influences on the wheel-rail lateral forces and the lateral accelerations of the carbodies. For the carbody lateral swayings, the sensitive wavelengths of alignment irregularity are as 10~13 m and 17~20 m. The sensitive wavelengths of vertical irregularity are as 5~8 m and 12~17 m. The sensitive wavelengths of both twist and crosslevel irregularity are as 5~8 m and 15~20 m. The excitation frequency of track irregularity with a sensitive wavelength band of 10~13 m is close to the frequency of the upper sway mode of the vehicles. The excitation frequency of track irregularity with a sensitive wavelength band of 15~20 m is close to the frequencies of pitch mode and roll mode of the vehicles.

Key words: linear induction motor(LIM); vehicle dynamics performance; track geometric irregularity; sensitive wavelength; lateral swaying

收稿日期:2024-07-13

基金项目:国家自然科学基金(52002343);四川省科技计划(2024NSFSC0160,2023YFQ0091)

0 引言

近年来,我国地铁车辆晃动现象频发,主要表现为车体的低频晃动和异常抖动。地铁车辆在轨

道上运行时,车辆本身可以被视为一个非线性振动系统,轨道几何不平顺作为车辆系统振动的扰动源,直接决定了车辆振动响应大小,从而影响车辆运行的平稳性和舒适性^[1]。轨道几何不平顺指两股钢轨实际几何尺寸相对于理想平顺状态的偏差。轨道常见几何不平顺类型主要有轨向、高低、水平和扭曲(即三角坑)等。当车辆以一定速度通过某些波长段的轨道几何不平顺时,如轨道不平顺激励频率与车辆悬挂频率一致,车体加速度会增大,加剧车辆晃动,严重影响乘坐舒适性和列车运行安全性^[2-3]。

国内外学者针对轨道几何不平顺对车辆晃动的影响展开了研究。在众多不平顺波长成分中,部分波长段对车辆运行品质有显著影响,不同类型轨道几何不平顺敏感波长有一定差异。魏庆朝等^[4]建议直线电机线路轨道不平顺管理中重点关注10 m波长的不平顺。商佳园等^[5]研究发现焊接接头不平顺会使轮轨系统产生较大的冲击,波深越大、波长越短对轮轨系统冲击越大。张斌等^[6]提出当周期性轨道几何不平顺的波长位于5~20 m之间时,对直线电机车辆平稳性影响最大。

杨吉忠等^[7]建立了考虑车体柔性的高速列车-板式轨道耦合动力学模型,发现轨向和水平不平顺3~10 m敏感波长段主要与车体柔性模态有关;10~140 m敏感波长段主要与列车刚体模态有关。高建敏等^[8]建立了高速列车动力学模型,分析得出高低不平顺敏感波长段为80~160 m,轨向不平顺敏感波长段为40~120 m。秦晓光等^[9]建立了有轨电车车辆-轨道耦合模型,发现曲线段运行时,轨道高低不平顺敏感波长段为10~20 m,水平不平顺敏感波长段为10~20 m,轨向不平顺敏感波长段为10~25 m。

NAEIMI等^[10]研究了左右钢轨存在不均匀不平顺时车辆-轨道系统的耦合行为。姜培斌等^[11]研究了单项轨道几何不平顺和复合轨道几何不平顺对高速列车车辆动力学性能的影响,得出高速铁路敏感波长段主要集中在3~10 m、10~60 m和60~140 m。袁玄成等^[12]认为,对于高速动车组,轨向不平顺敏感波长段为小于20 m和50~70 m,水平不平顺敏感波长段为小于20 m、50~80 m和100~140 m波长段。田新宇等^[13]探究了高速行车线路的长波高低不平顺敏感波长,得出敏感波长为150 m。韩艳等^[14]对高速磁浮列车展开研究发现,系统横向和垂向振动耦合性较小,而

磁浮车辆的侧滚、点头、摇头等模态具有相应的激励波长。

CHOI等^[15]对韩国KTX快速列车动力学性能展开模拟研究发现,轨向不平顺对车辆运行安全性影响显著,水平和高低不平顺影响较小。SKERMAN等^[16]模拟了三轴转向架货车在离散和周期性轨道横向不平顺状态下运行时的轮轨运动响应特征,结果表明轮对横移量的大小高度依赖于轨道横向不平顺的波长。LUBER等^[17]指出EN 13848-5和EN 14363标准中的轨道几何不平顺质量控制方法不能满足车辆运行响应评估要求,提出轨道几何不平顺质量评价应考虑车辆与轨道之间相互作用;利用传递函数法分析得出不同波长域轨道几何不平顺与轮对垂向响应力大小具有高度相关性。BOSSO等^[18]对车辆通过道岔时运行动力学性能展开研究,发现当特定波长轨道不平顺激励频率与转向架垂直固有模态频率接近时,周期性轨道不平顺幅值低于EN 13848-5标准提出的紧急行动要求限值状态,车辆运行也会出现轮重减载超标风险。

以上研究主要分析轨道几何不平顺对高速车辆动力学性能的影响。车辆高速状态下的动力学响应敏感的不平顺波长相对较长,而地铁车辆速度相对高速列车低,车辆动力学关注频带范围对应的敏感不平顺波长相对短,因而针对高速列车的敏感不平顺波长不完全适用于地铁车辆的响应。目前针对考虑车辆悬挂模态特征的轨道几何不平顺敏感波长研究相对较少。本文以我国某条线路的直线电机地铁车辆为例,通过现场实测和数值分析,研究车体横向低频晃动的特征;并利用多体动力学仿真软件SIMPACK建立直线电机车辆动力学模型,从轨道几何不平顺与车辆悬挂模态角度,仿真探究了轨道几何不平顺不同波长与车辆动力响应之间的关系,分析了影响直线电机地铁车辆晃动的不同类型轨道几何不平顺敏感波长范围。

1 现场测试

1.1 车辆晃动特征

为分析直线电机地铁车辆在直线段高速(85 km/h左右)运行时出现的车体横向低频晃动特征,选取某线路直线电机地铁车辆作为测试对象,参考GB/T 5599—2019标准在车辆不同位置加装了振动加速度传感器,选用多通道的数据采集设备获取振动加速度数据。试验车辆选取6编组

列车的头车,依次在轴箱、构架和车体的不同位置进行传感器的布置,如图1所示。试验线路选取实际运行线路部分晃车明显的区段。

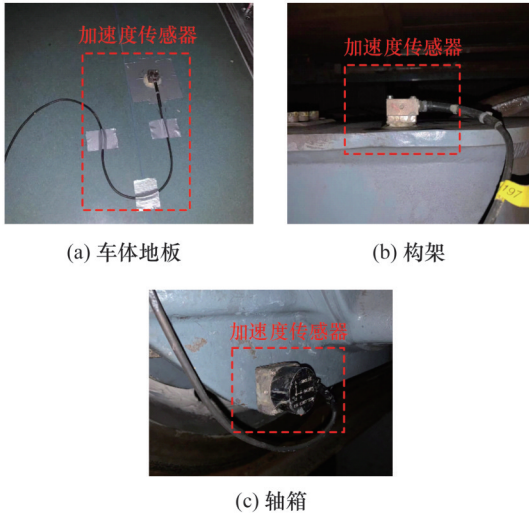


图1 振动加速度传感器布置

Fig.1 Arrangement of vibration accelerometer

由于车辆低频横向晃动现象发生在所试验线路的直线高速段,因此选取相邻站点直线较长区间的振动测试数据进行分析。为更好地识别其振动特征,对采集的不同部件位置的横向振动加速度进行0~10 Hz的滤波处理。图2所示为地铁线路两个车站之间的轴箱、构架和车体地板的实测横向加速度时间历程。可以看出,轴箱横向振动加速度部分超过0.2g;转向架横向振动加速度在0.2g左右;车体横向振动加速度个别时刻大于0.2g,大部分时段加速度小于0.2g。轴箱、构架及车体的横向振动加速度都呈现较为明显的谐波特性,说明车辆此时发生了横向晃动。

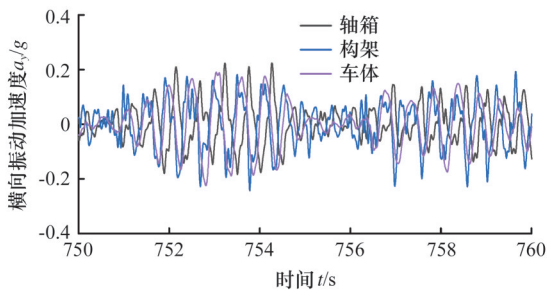


图2 横向振动加速度时间历程

Fig.2 Lateral vibration acceleration history

图3给出了轴箱、构架及车体对应测点的横向振动加速度频谱分析结果。由图可知,直线电机地铁车辆发生横向晃动时,轴箱、构架和车体的横向振动加速度均具有明显的主频特征,频率大小为1.95 Hz。

用车辆运行平稳性评定方法中的平稳性指标

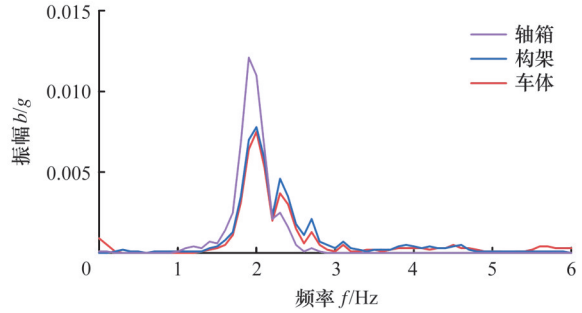


图3 横向振动加速度频谱图

Fig.3 Spectrum of lateral vibration acceleration

评价车辆晃动的严重程度,计算公式如下:

$$W = 7.08 \sqrt{\frac{a^3}{f}} F(f) \quad (1)$$

式中: W 为平稳性指标; a 为振动加速度,单位为 g ; f 为振动频率, Hz ; $F(f)$ 为频率修正系数,与振动加速度频率范围有关。

图4所示为不同速度下车辆在某条线路部分区段横向平稳性指标测试结果。可以看出,车辆横向平稳性与车速相关,随着车辆运行速度的增大,车辆横向平稳性指标逐渐增大。车辆运行速度超过50 km/h时,横向平稳性指标接近3.0,大于80 km/h高速运行区段的横向平稳性指标均大于3.5(最大横向平稳性指标为4.2)。车体垂向平稳性指标绝大部分区段小于3.0。

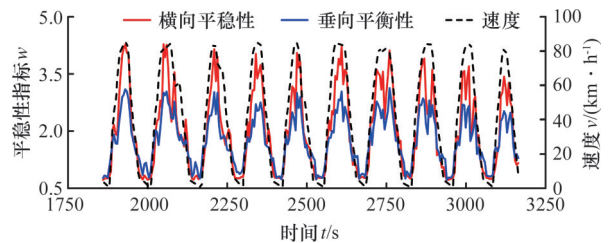


图4 车体平稳性指标变化情况

Fig.4 Sperl index distribution of carbody

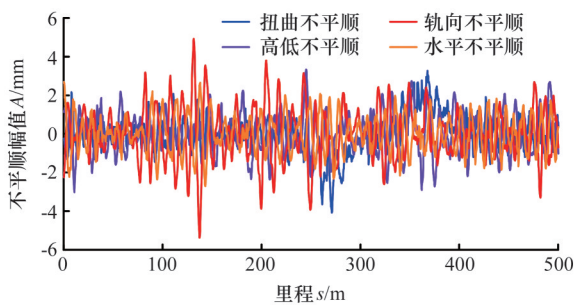
1.2 轨道几何不平顺

图5给出了车辆发生低频横向晃动区段线路测试的轨道几何不平顺数据。由图可知,发生晃动区段的线路轨向不平顺呈现主波长段为10~13 m的显著谐波特征,如图5b所示。

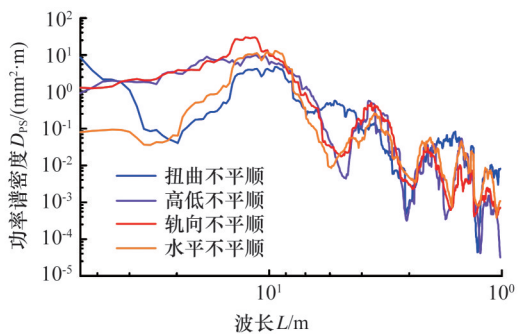
仿真中,用位移函数作为系统激励输入,通过对一股或两股钢轨施加同向或反向、同相位或异相位单波余弦不平顺,描述各类轨道几何不平顺输入^[1]。本文轨道几何不平顺仿真计算采用简谐波激励输入函数,即

$$Z = \frac{A}{2} (1 - \cos \frac{2\pi x}{L}) \quad (2)$$

式中: Z 为对应 x 处的激励函数幅值, mm ; A 为谐波激励最大幅值, mm ; x 为波长范围内谐波激励在钢轨上的位置, m ; L 为简谐波波长, m 。



(a) 实测轨道几何不平顺幅值



(b) 功率谱密度(PSD)

图5 实测轨道几何不平顺

Fig.5 Measured track geometric irregularity

图6为简谐波激励输入函数示意图。仿真分析了不同类型轨道几何不平顺波长对车辆振动和轮轨力响应的影响,并参考GB/T 5599—2019标准分析了轨道几何不平顺对运行平稳性和安全性指标的影响规律。

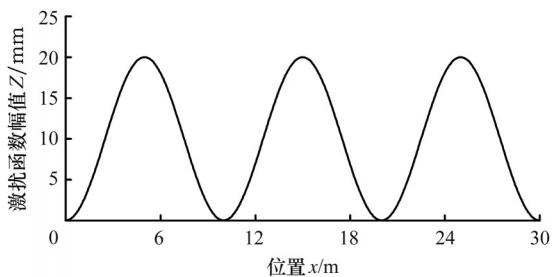


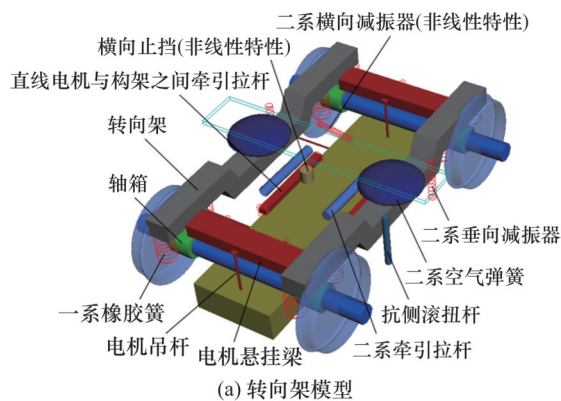
图6 简谐波激励输入函数

Fig.6 Harmonic excitation input function

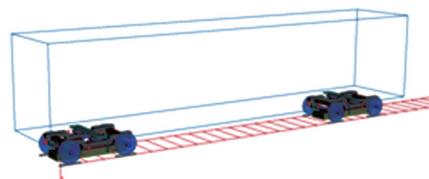
2 车辆动力学模型

利用多体动力学仿真软件SIMPACK建立了直线电机车辆动力学模型,如图7所示。其中,车辆由1个车体、2个构架、4个轮对、8个轴箱、2个直线电机、2个摇枕和4个电机悬挂梁等23个刚体组成,具有88个自由度。

车辆动力学模型中,将车体、转向架、轴箱、轮对和摇枕等质量体简化为刚体,仅考虑其质量和转动惯量。悬挂系统分别采用软件中自带的力元进行模拟。仿真模型中,一系橡胶弹簧和二系空簧均采用5号弹簧阻尼并联的集中力元类型力



(a) 转向架模型



(b) 整车模型

图7 车辆动力学模型

Fig.7 Vehicle dynamics model

元,二系垂向减振器、二系横向减振器均采用6号弹簧阻尼器的点到点类型力元。一系橡胶簧、二系空簧、牵引拉杆、横向和垂向减振器均采用线性特征,而横向止挡和二系横向减振器考虑其非线性特性。

直线电机会产生纵向、垂向和横向3个方向的电磁力,其中横向电磁力相对较小,相对于电机的质量可以忽略不计。根据文献[19],本文将数据拟合得到垂向电磁力和气隙之间的关系,如图8所示。结合车辆的设计参数建立图9所示的直线电机电磁力模型。

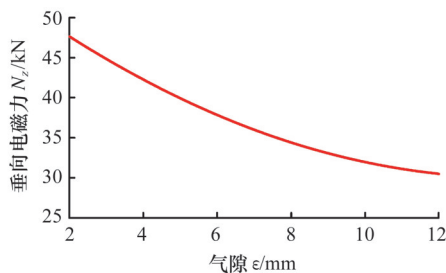


图8 电磁力与气隙间隙曲线

Fig.8 Electromagnetic force and air gap curve

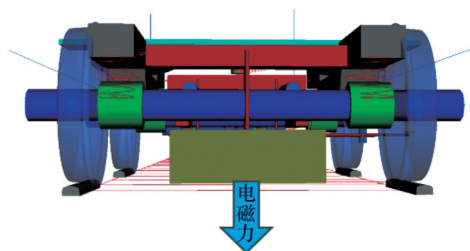
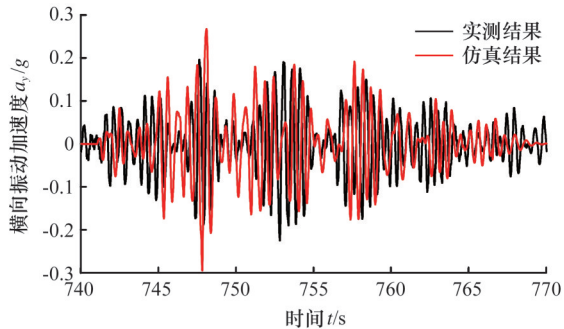


图9 电磁力模型

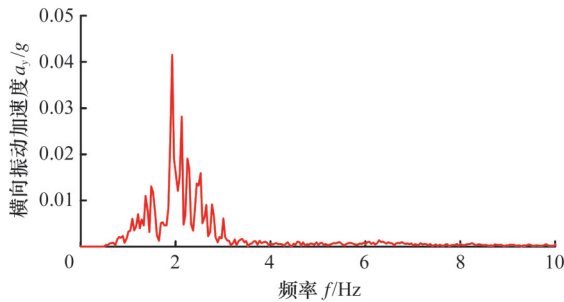
Fig.9 Electromagnetic force model

考虑轮轨接触几何关系非线性特性,采用FastSim(Kalker简化理论)计算轮轨蠕滑力,法向力计算采用Hertz接触理论,轮轨接触几何关系计算采用SIMPACK内置算法,摩擦因数为0.4。为保证后续仿真工作的准确可靠,对直线电机车辆动力学模型的准确性进行验证。验证工况:采用LM标准车轮廓形与CN60标准钢轨廓形匹配,施加实际晃车区段线路的实测轨道几何不平顺数据,仿真速度采用车辆在直线段运行时的最高速度85 km/h。

图10所示为仿真与实测的车体横向加速度时域对比以及仿真的车体横向加速度频域结果。由图可知,仿真的车体横向振动加速度具有明显谐波特征,且加速度最大值为0.29g,横向振动的主频约为1.93 Hz。



(a) 实测和仿真结果时域图



(b) 仿真结果频域图

图10 车体横向加速度响应

Fig.10 Lateral acceleration response of carbody

图11给出了晃车区段车体一二位转向架上方横向平稳性指标计算结果,可知:车辆在实际轨道几何不平顺激励下,车体横向平稳性指标大多数超过了2.75,最大值超过了3.75。因此,仿真结果符合实际车辆发生低频横向晃动时的特征,所建直线电机地铁车辆模型能够较好地反映低频车体横向晃动现象。

3 结果分析

3.1 悬挂模态频率和轨道几何不平顺波长

轨道几何不平顺激励频率与车辆悬挂模态频

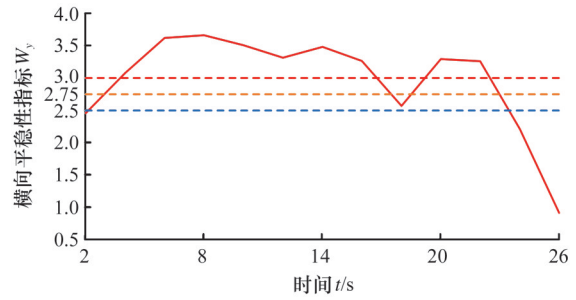


图11 车体横向平稳性指标

Fig.11 Lateral spurling index of carbody

率相近时会激励车辆悬挂模态共振,产生较大的车体振动响应,从而可获得车辆悬挂模态对应的轨道几何不平顺波长。根据车辆悬挂模态频率,可以确定与其相对应的轨道几何不平顺激励频率;在车辆运行速度一定条件下,根据公式:不平顺波长 λ 等于车辆速度 v 除以激励频率 f ,可获得与车辆悬挂模态频率对应的轨道几何不平顺波长。为分析车辆每个悬挂模态对应下的轨道几何不平顺波长,利用车辆系统动力学模型计算速度为85 km/h时的车辆悬挂模态频率和阻尼比,如表1所示。可知:车辆下心滚摆频率为0.81 Hz,上心滚摆频率为1.82 Hz,其余模态频率位于两者之间。

表1 车体振型与轨道几何不平顺波长对应关系

Tab.1 Correspondence between carbody vibration modes and track geometrical irregularity wavelengths

车体振型	频率/Hz	阻尼比	对应不平顺波长/m
车体浮沉	1.43	0.28	16.5
车体点头	1.54	0.36	15.3
车体摇头	1.21	0.30	19.5
下心滚摆	0.81	0.14	29.1
上心滚摆	1.82	0.23	12.9

3.2 轨道几何不平顺敏感波长

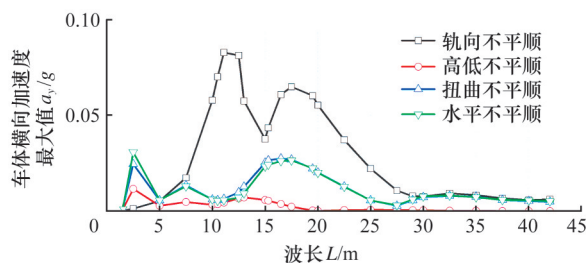
本节以轨向、高低、水平和扭曲4种轨道几何不平顺作为车辆系统激励源,仿真分析了车辆在直线段高速运行时不同波长不平顺对车体加速度、车辆运行平稳性和安全性等响应的规律,明确了车辆运行速度为85 km/h、不平顺幅值为4 mm时车辆晃动的不同类型轨道几何不平顺敏感波长特征。

图12a和图12b分别给出了车体横向和垂向加速度最大值随轨道几何不平顺波长的变化结果,可知:

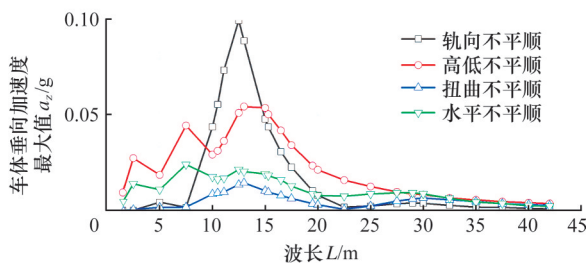
1)轨向不平顺对车体横向振动加速度影响最明显,扭曲和水平不平顺影响其次,高低不平顺的影响相对较小,可以忽略不计。针对车体横向振

动加速度响应,轨向不平顺敏感波长范围为10~13 m、17~20 m,扭曲和水平不平顺敏感波长范围为15~20 m。其中,10~13 m波长段对横向加速度响应峰值最明显,这与车辆晃动时激发的上心滚摆模态(频率1.82 Hz)振动相关。15~20 m波长段不平顺下车体响应与车辆浮沉(频率1.43 Hz)和摇头模态(频率1.21 Hz)振动相关。车体横向加速度响应在波长2.5 m左右水平和扭曲不平顺处也出现峰值,其对应的激励频率9.4 Hz,与车体悬挂模态不相关。

2)轨向和高低不平顺对车体垂向振动加速度影响显著,分别对应敏感波长范围10~15 m和12~17 m,二者与车辆滚摆和浮沉振动相关。此外,5~8 m次波长段的高低和水平不平顺对车体垂向振动加速度影响也较为明显。



(a) 车体横向加速度



(b) 车体垂向加速度

图12 轨道不平顺波长变化对车体加速度的影响

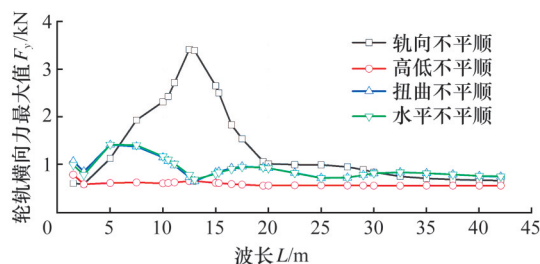
Fig.12 Influence of track irregularity wavelength variation on vehicle acceleration

图13a和图13b分别给出了轮轨横向力和垂向力最大值随轨道几何不平顺波长的变化结果,可以看出:

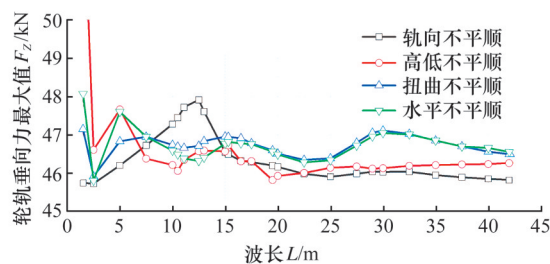
1)轨向不平顺对轮轨横向力有较大影响,呈单峰值特征,扭曲和水平不平顺影响其次,高低不平顺影响相对较小,可以忽略不计。由轮轨横向力响应曲线可知,轨向不平顺敏感波长段为5~17 m,分布范围较为广泛,峰值出现在13 m左右波长段,扭曲和水平不平顺敏感波长段出现在5~8 m范围内,说明轮轨横向力受扭曲和水平短波影响明显。其中,轨向不平顺10~15 m波长段对轮轨横向力响应最明显,这与车辆晃动时激发的上心滚摆模态(频率1.82 Hz)和点头模态(频率

1.54 Hz)振动相关。

2)针对轮轨垂向力响应,大于5m中长波段轨向不平顺对其影响明显,敏感波长范围为10~13 m,扭曲和水平不平顺敏感波长段为27~35 m。其中,27~35 m波长段不平顺下轮轨垂向力响应与车辆下心模态(频率0.81 Hz)振动相关。高低不平顺短波对轮轨垂向力影响较大,在1.5 m波长处响应大。



(a) 轮轨横向力



(b) 轮轨垂向力

图13 轨道不平顺波长变化对轮轨力的影响

Fig.13 Influence of track irregularity wavelength variation on wheel-rail interaction force

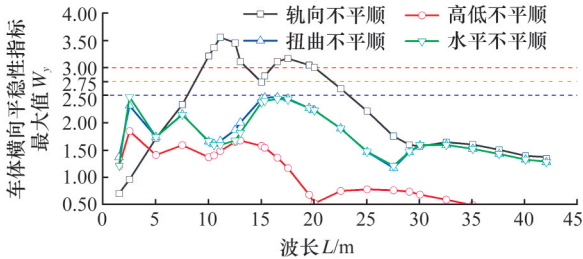
图14给出了车辆运行平稳性指标随轨道几何不平顺波长的变化结果,可以看出:

1)轨向不平顺对车体横向平稳性指标影响最明显,随轨向不平顺波长的增大,车体横向平稳性指标最大值呈现双峰值的特征,两处峰值均超过3.0。扭曲和水平不平顺影响其次,高低不平顺对其影响最小,且横向平稳性指标均没有超过3.0。

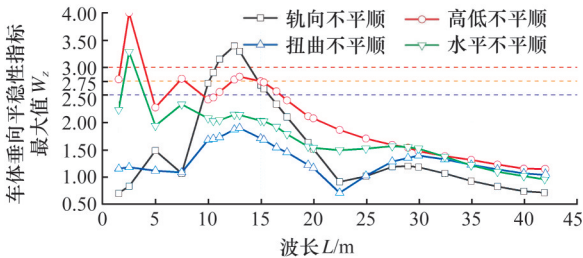
2)针对车体横向平稳性指标响应曲线,轨向不平顺敏感波长范围为10~13 m和15~20 m,扭曲和水平不平顺敏感波长范围为15~20 m。其中,10~13 m波长段轨向不平顺对横向加速度响应峰值影响最明显,这与车辆晃动时激发的上心滚摆模态(频率1.82 Hz)振动相关。在15~20 m波长段水平、扭曲和轨向不平顺下的车体响应与车辆浮沉(频率1.43 Hz)和摇头模态(频率1.21 Hz)振动相关。车体平稳性指标在波长2.5 m左右水平和扭曲不平顺处也出现峰值。

3)高低和水平不平顺在小于5m短波长段对

车体垂向平稳性指标影响明显。针对车体垂向平稳性指标最大值响应,轨向、高低和水平不平顺敏感波长范围分别为10~15 m、5~15 m和5~15 m。轨向不平顺在13 m波长左右出现峰值,对应的激扰频率与车辆上心滚摆模态(频率1.82 Hz)振动相关。



(a) 车体横向平稳性指标



(b) 车体垂向平稳性指标

图 14 轨道不平顺波长变化对车体平稳性指标的影响

Fig.14 Influence of track irregularity wavelength variation on spertling index of carbody

图 15 给出了车辆运行安全性指标随轨道几何不平顺波长变化规律,可知:

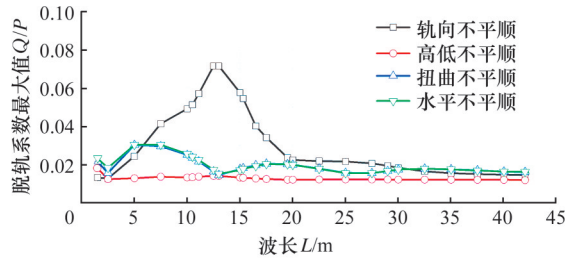
1)轨向不平顺对脱轨系数(横向力Q与垂向力P的比值)和轮轴横向力影响最明显,扭曲和水平不平顺对脱轨系数和轮轴横向力影响其次,高低不平顺对其相对较小,可以忽略不计。

2)轨向、高低、扭曲和水平4种不平顺对轮重减载率的影响不大,整体随波长的变化较为平缓。其中,受高低不平顺1.5~5 m短波段冲击影响,轮重减载率响应大;轨向不平顺在10~13 m波长段对轮重减载率影响相对较大。

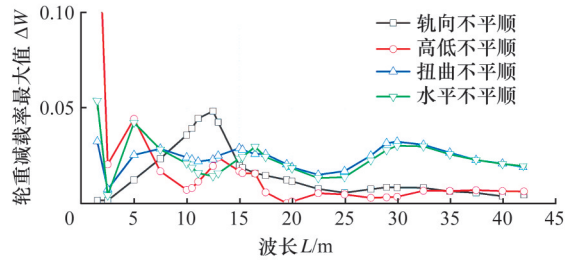
3)针对脱轨系数响应曲线,轨向不平顺敏感波长范围为10~13 m。由车辆系统模态频率分析可知,13 m波长激扰频率与车辆晃动时激发的上心滚摆模态(频率1.82 Hz)振动相关。针对轮轴横向力响应,轨向不平顺敏感波长范围为10~15 m,扭曲和水平不平顺敏感波长范围为5~10 m。

3.3 行车试验验证

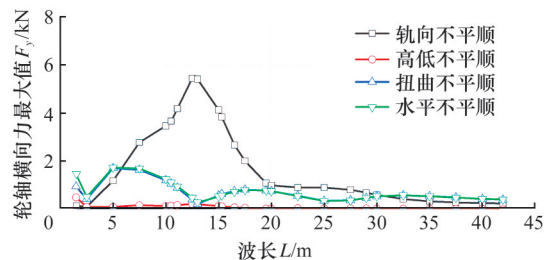
由于晃车线路轨道11~13m波长周期性不平顺(图5)存在于钢轨轨面,轨道精调和钢轨打磨



(a) 脱轨系数



(b) 轮重减载率



(c) 轮轴横向力

图 15 轨道不平顺波长变化对车辆动力学的影响

Fig.15 Influence of track irregularity wavelength variation on vehicle dynamics

技术无法消除该周期性不平顺^[3],因此选取另外一条轨道周期性几何不平顺不明显的线路(图16)开展行车试验,对比有、无轨道周期性不平顺状态下的车辆平稳性指标。试验时采用相同试验车辆,轮对踏面均镟修为LM型。试验对比的两条线路实际轮轨匹配等效锥度均为0.1~0.2。图17给出了同一列车在2条不同地铁线路试验区间的车体垂向和横向平稳性指标随运行时间变化结果。其中,该列车测试了2节车的车体平稳性数据。图17a对应图5中有轨道周期性轨向不平顺状态的测试结果,图17b对应图16中无轨道周期性几何不平顺状态的测试结果。可知:①车辆在周期性轨向不平顺轨道上运行时的横向和垂向平稳性指标均明显大于无周期性不平顺轨道的横向和垂向平稳性指标,且二者横向平稳性指标均大于垂向的;②车辆在周期性轨向不平顺轨道运行的横向平稳性指标大于3.5,表现出明显晃车现象,而在没有周期性不平顺轨道上运行的横向平稳性指标小于2.75,表现平稳。试验结果验证了仿真结果的合理性。

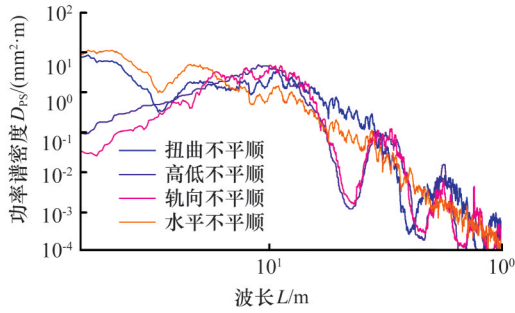
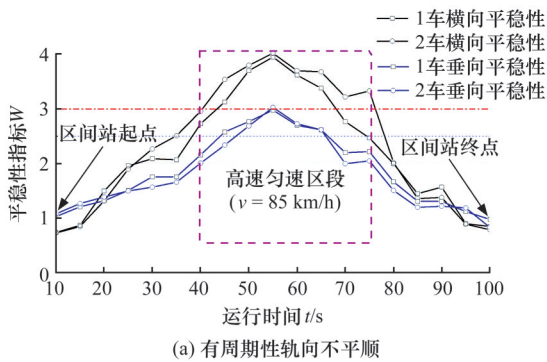
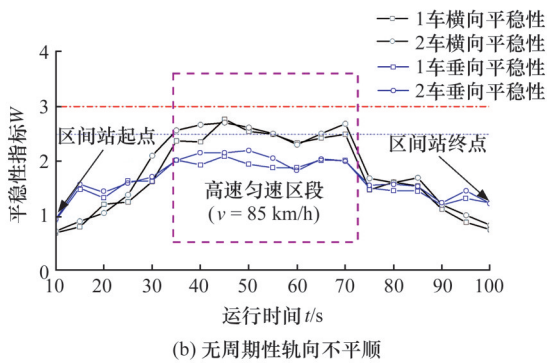


图 16 地铁线路实测轨道不平顺功率谱密度

Fig.16 PSDs of track irregularities measured in a metro line



(a) 有周期性轨向不平顺



(b) 无周期性轨向不平顺

图 17 有、无周期性轨向不平顺下测试车辆平稳性指标
Fig.17 Measured spurring index for the vehicle with and without track periodic irregularities

4 结论

基于建立的直线电机地铁车辆动力学模型研究了轨道几何不平顺波长变化对车辆动力学性能指标的影响规律,从而确定车辆在简谐波形式输入下的轨道几何不平顺最不利波长和敏感波长范围。分析了直线电机车辆悬挂频率、车辆相关结构参数和敏感波长之间的关系,得出如下结论:

1)在 85 km/h 下,简谐波输入形式下的轨向不平顺波长变化对直线电机地铁车辆动力学性能指标有不同程度的影响。轨向不平顺对轮轨横向力、脱轨系数、轮轴横向力、车体横向和垂向振动加速度等的影响较大,其敏感波长段为 10~13 m 和 17~20 m,其中,10~13 m 波长段不平顺对横

向加速度响应峰值最明显,这与车辆晃动时激发的上心滚摆模态(频率 1.82 Hz)振动相关。

2)高低不平顺波长对轮轨垂向力、车体垂向加速度、轮重减载率和车体横向平稳性指标等的影响较大,其敏感波长段为 5~8 m 和 12~17 m。

3)扭曲和水平不平顺波长变化对车辆平稳性和安全性等指标影响明显,二者敏感波长段分别为 5~8 m 和 15~20 m,其中,5~8 m 短波长激励导致轮轨力突变,从而引起各指标响应偏大。15~20 m 波长段不平顺激励下,车辆响应与车辆浮沉(频率 1.43 Hz)和摇头模态(频率 1.21 Hz)振动相关。

4)不同波长段不平顺的激励频率会与车辆悬挂模态频率接近,车辆响应对不同类型轨道几何不平顺的敏感波长存在差异,应针对不同的轨道几何不平顺类型制定相应的敏感波长管理标准。

参考文献:

[1] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHAI Wanming. Vehicle-track Coupled Dynamics [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.

[2] 凌亮. 高速列车-轨道三维刚柔耦合动力学研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
LING Liang. Study on Three-dimensional Rigid-flexible Coupling Dynamics of High-speed Train-track[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[3] LI Wei, QI Yingjie, WEN Zefeng, et al. Coupling Effect of Track Irregularity and Wheel - Rail Contact Conicity on Carbody Swaying of a Metro Vehicle: an Experimental Investigation[J]. Vehicle System Dynamics, 2025, 63(5):944-963.

[4] 魏庆朝, 郑方圆, 冯雅薇, 等. 轨道不平顺对直线电机轮轨系统动力特性影响[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(1):36-40.
WEI Qingchao, ZHENG Fangyuan, FENG Yawei, et al. Influence of Track Irregularity on LIM Wheel/Rail System Dynamic Characteristics[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(1):36-40.

[5] 商佳园, 池茂儒, 周橙, 等. 地铁车辆直线电机悬挂装置垂向刚度优化研究[J]. 机车电传动, 2019 (3):125-128.
SHANG Jiayuan, CHI Maoru, ZHOU Cheng, et al. Optimization of Vertical Stiffness of Motor Suspension in LIM Metro Vehicle[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(3):125-128.

[6] 张斌, 关庆华, 李伟, 等. 轨道不平顺与轮轨匹配

- 对地铁车辆晃动的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(9):1772-1779.
- ZHANG Bin, GUAN Qinghua, LI Wei, et al. Influence of Track Irregularity and Wheel-Rail Profile Compatibility on Metro Vehicle Sway[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(9):1772-1779.
- [7] 杨吉忠, 谢毅, 庞玲, 等. 400 km/h高速铁路轨道几何不平顺敏感波长分析[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2):50-55.
- YANG Jizhong, XIE Yi, PANG Ling, et al. Sensitive Wavelength Analysis on Track Geometric Irregularities of 400 km/h High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2):50-55.
- [8] 高建敏, 翟婉明, 王开云. 高速行车条件下轨道几何不平顺敏感波长研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(7):83-88.
- GAO Jianmin, ZHAI Wanming, WANG Kaiyun. Study on Sensitive Wavelengths of Track Irregularities in High-speed Operation[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7):83-88.
- [9] 秦晓光, 黄爱军. 现代有轨电车轨道不平顺敏感波长研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(增刊1):56-61.
- QIN Xiaoguang, HUANG Aijun. Research on Sensitive Wavelength of Track Irregularity for Modern Tram [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(S1):56-61.
- [10] NAEIMI M, ZAKERI JALI, ESMAEILI M, et al. Influence of Uneven Rail Irregularities on the Dynamic Response of the Railway Track Using a Three-dimensional Model of the Vehicle - Track System [J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(1):88-111.
- [11] 姜培斌, 凌亮, 丁鑫, 等. 考虑车体刚柔耦合振动的高速铁路轨道不平顺敏感波长研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(15):79-89.
- JIANG Peibin, LING Liang, DING Xin, et al. Track Irregularity Sensitive Wavelengths of High-speed Railway Considering Flexible Vibration of Vehicle Body [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(15):79-89.
- [12] 袁玄成, 王开云, 閻鑫, 等. 轨道不平顺波长和幅值对高速动车组动力学性能的影响分析[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(2):1-9.
- YUAN Xuancheng, WANG Kaiyun, GE Xin, et al. Influences of Track Irregularity Wavelength and Amplitude on Dynamic Performance of High-speed EMU [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36(2):1-9.
- [13] 田新宇, 高亮, 杨飞, 等. 无砟轨道长波高低不平顺管理标准的研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(3):26-30.
- TIAN Xinyu, GAO Liang, YANG Fei, et al. Research on the Long-wave Longitudinal Level Irregularity Standards of Ballastless Track [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(3):26-30.
- [14] 韩艳, 卜秀孟, 王力东, 等. 高速磁浮列车-轨道梁耦合系统轨道不平顺敏感波长研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(5):1-11.
- HAN Yan, BU Xiumeng, WANG Lidong, et al. High-speed Maglev Train-track Beam Coupled System Track Irregularity Sensitive Wavelengths [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(5):1-11.
- [15] CHOI I I, UM J H, LEE J S, et al. The Influence of Track Irregularities on the Running Behavior of High-speed Trains [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2013, 227(1):94-102.
- [16] SKERMAN D, COLE C, SPIRYAGIN M. The Effect of the Wavelength of Lateral Track Geometry Irregularities on the Response Measurable by an Instrumented Freight Wagon [J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 62(3):533-555.
- [17] LUBER B, HAIGERMOSER A, GRABNER G. Track Geometry Evaluation Method Based on Vehicle Response Prediction [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(S1):157-173.
- [18] BOSSO N, BRACCIALI A, MEGNA G, et al. Effects of Geometric Track Irregularities on Vehicle Dynamic Behaviour when Running through a Turnout [J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(3):782-798.
- [19] MATSUMOTO A. Research and Development of Linear Motor Driven Metro System [J]. Japanese Railway Engineering, 1988, 107:8-11.

(编辑 王旻玥)

作者简介:齐英杰,男,1996年生,硕士研究生。研究方向为车辆系统动力学。E-mail:1170854698@qq.com。李伟(通信作者),男,1985年生,副研究员。研究方向为轮轨动力学与伤损。E-mail:1022liwei@163.com。

本文引用格式:

齐英杰,李伟,刘增华,等. 针对地铁车辆晃动的轨道几何不平顺敏感波长分析[J]. 中国机械工程,2025,36(9):1925-1933.

QI Yingjie, LI Wei, LIU Zenghua, et al. Sensitive Wavelength Analyses of Track Geometric Irregularities for Metro Vehicle Swayings [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(9):1925-1933.