

等效锥度对高速动车组蛇行运动的影响

梁禹迪,戴焕云

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:针对等效锥度对车辆的影响规律问题,长期跟踪测试某型号高速动车组,获得了不同里程下的车轮踏面廓形,匹配车轮与标准钢轨、磨耗钢轨,计算出不同形式的等效锥度曲线,搭建动力学仿真模型,利用实测数据研究等效锥度对车辆蛇行运动的影响。研究表明:车轮在行驶一段时间后会呈现不同程度的凹磨现象,与磨耗钢轨匹配后的等效锥度呈现较大的负斜率,会大幅降低临界速度,导致构架横向加速度增大出现二次蛇行运动,蛇行频率出现不同的变化规律。

关键词:高速动车组;踏面磨耗;等效锥度;蛇行运动;蛇行频率

中图分类号:TP391.9 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2021)05-0183-04

The Effect of Equivalent Conicity on Hunting Movement of High-speed EMUs

LIANG Yudi, DAI Huanyun

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

Abstract: To solve the problem of the effect of the equivalent conicity on the vehicle, wheel tread profiles at different mileages, matching wheels with standard rails and equivalent conicity curves in different forms calculated by wearing rails are obtained through a long-term tracking tests of a certain type of high-speed EMUs. A dynamic simulation model is built and measured data are used to study the effect of the equivalent conicity on the hunting movement of the vehicle. The research shows that the wheels present different degrees of hollow worn after driving for a period of time, and the equivalent conicity after matching with the worn rail shows a large negative slope, which reduces critical speed drastically, increases the lateral acceleration of the frame and causes a secondary hunting movement with hunting frequency in different patterns.

Keywords: high-speed EMUs; tread wear; equivalent conicity; hunting movement; hunting frequency

0 引言

截止 2019 年底,我国高速铁路运营里程已经达到了 3.5 万公里,安全运维的保障必须受到格外重视,轮轨接触便是其重要的影响因素之一。直接采用轮轨接触点来表征接触关系是十分困难的^[1],通常学者们使用等效锥度作为指标来评价轨道车辆的轮轨接触特征。目前国际上的铁路机构与科研部门将轮对蛇行横向运动 3 mm 时的等效锥度作为名义等效锥度来评判轮对接触状态,但在长期的实际使用中发现,仅仅考虑此时的锥度值不足以作为评判标准,需要对锥度进行更细致的研究。

干峰等针对国内几种不同的车轮典型踏面,使用多种算法来计算不同工况下的等效锥度,提供了这些踏面的轮轨接触特征并在后续磨耗试验中给予了特征的验证^[2]。POLACH O 指出了用等效线性法描述轮轨接触关系的局限性,提出使用非线性参数评估轨道车辆的稳定性^[3]。李凡松等^[4]和李浩等^[5]发现等效锥度过大会导致轨道车辆的临界速度降低,出现蛇行失稳现象。国际铁路联盟 UIC^[6]和欧盟铁路技术规范 TSI^[7]针对服役车辆的等效锥度限值给出了不同的建议限值。

目前从等效锥度非线性形式方面进行研究内容较少,

为了探究等效锥度非线性对车辆蛇行运动的影响,本文基于高速动车组长期跟踪试验获得的实测踏面与钢轨廓形,计算获得多种不同锥度曲线,并建立动力学仿真模型,分析了等效锥度对高速动车组蛇行运动的影响规律。

1 轮轨接触关系分析

高速列车随着运行里程的增加,车轮磨损情况会逐渐严重,使得踏面在滚动圆附近呈现出不同程度的凹磨现象^[8]。根据某高速动车组在线路上的长期跟踪测试,获取了不同运行里程的车轮踏面廓形,选取 3 组 10 万公里以后的磨耗踏面与镟修后的新轮进行对比分析,运行里程分别为 14 万公里、17 万公里、20 万公里,如图 1 所示。

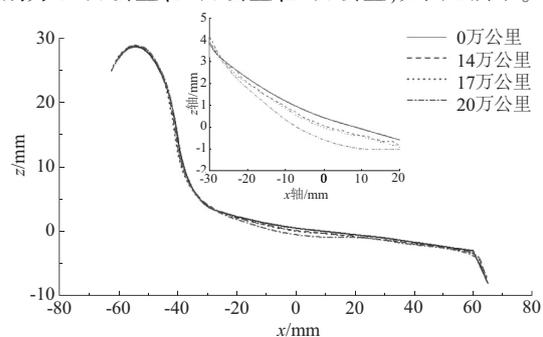


图 1 踏面外形图

如图2所示,根据实际测量后的磨耗踏面可以发现,车辆运行14万公里时的磨耗深度大约在0.58 mm,运行至20万公里时磨耗深度达到1 mm,磨耗宽度达到42 mm,里程的增加使得磨耗量增大,并且磨耗范围也在向两侧不断扩展。

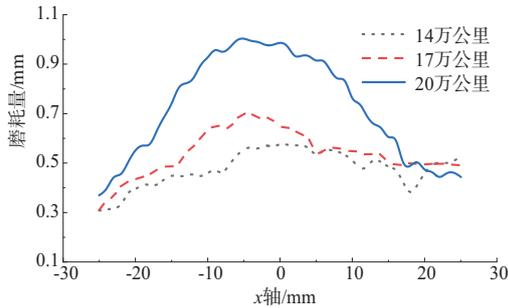


图2 踏面磨耗曲线

轨道车辆的特殊性使得轮轨接触关系呈现出高度非线性^[9]。将新轮与测得的3种磨耗踏面和标准钢轨进行匹配,观察轮轨接触关系,如图3所示,在车辆运行至14万公里时,车轮接触带宽为10.4 mm,17万公里时接触带宽为16.3 mm,运行至20万公里时的接触带宽达到25.3 mm,在磨耗后期接触点扩宽速度提高。

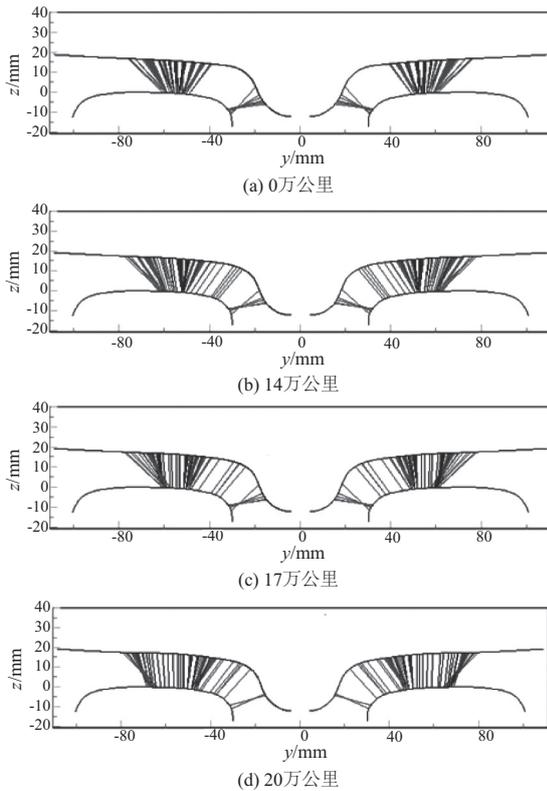


图3 轮轨接触关系图

2 轮轨匹配等效锥度分析

一般在计算等效锥度时,在接触点附近等效为锥形踏面,通过轮对横移量和轮径差来求得等效锥度。假设车轮的前进速度为 v ,横移量为 y ,车轮的名义滚动圆半径为 r_0 ,左右车轮的接触半径差为 Δr ,接触点跨距为 $2b$,自由

轮对在轨道上的运动微分方程为

$$\ddot{y} + \frac{v^2}{2br_0}y = 0 \quad (1)$$

当车轮为 φ 的锥形踏面时

$$\Delta r = 2y \tan \varphi \quad (2)$$

此时微分方程转换为常系数二阶微分方程

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{2 \tan \varphi}{2br_0}y = 0 \quad (3)$$

该方程的解为波长 L_w 的正弦波

$$L_w = 2\pi \frac{br_0}{2 \tan \varphi} \quad (4)$$

此式为Klingel公式。若车轮踏面不是锥形时使用线性化法计算,微分方程中将 $\tan \varphi$ 代替为 $\tan \varphi_e$, $\tan \varphi_e$ 就是要计算得到的等效锥度。给定初始横移量幅值 $y = y_0$,就可以得到轮对以峰-峰值或者谷-谷值为 $2y$ 和波长 L_w 的周期运动,应用Klingel公式求出等效锥度

$$\tan \varphi_e = \left(\frac{2\pi}{L_w} \right)^2 br_0 \quad (5)$$

为了获得多种不同形式的锥度曲线,使用标准钢轨(图中用N表示)与实测磨耗钢轨(图中用W表示)和不同里程磨耗车轮(图中数字表示)相匹配,计算得到的锥度曲线如图4所示。

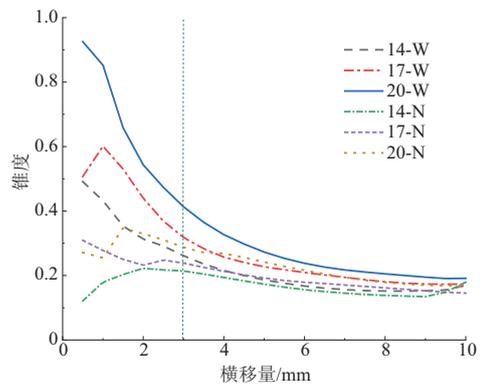


图4 等效锥度曲线

磨耗车轮与标准钢轨匹配后的等效锥度随行驶里程的增加而增大,以3 mm处的名义等效锥度为代表(用 λ 表示),14万公里时 $\lambda = 0.21$,17万公里时 $\lambda = 0.24$,20万公里时 $\lambda = 0.29$;磨耗车轮与磨耗钢轨匹配的锥度则要更大,分别为14万公里时 $\lambda = 0.26$,17万公里时 $\lambda = 0.32$,20万公里时 $\lambda = 0.41$ 。

通过等效锥度曲线可以看出,磨耗车轮与标准钢轨的锥度曲线相对较为平缓,但与磨耗钢轨的锥度曲线呈现负斜率,且负值的程度随行驶里程的增加不断增大,具有较强的非线性,这可能会对车辆的稳定性与安全性产生影响。

3 等效锥度对蛇行运动的影响

3.1 车辆动力学模型

建立车辆系统动力学模型(图5),包括1个车体、2个构架、4个轮对和8个转臂。模型考虑了一系悬挂、二系

悬挂等装置,各部件参数均根据实际情况建模。车轮踏面使用3个不同里程下的实测磨耗踏面,钢轨廓形采用标准钢轨与磨耗钢轨两种,轨距为1435 mm,轨底坡1:40。

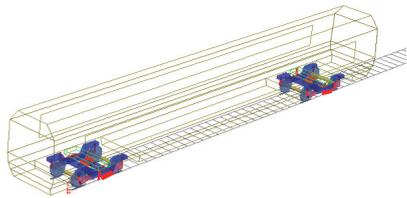


图5 动力学模型

3.2 等效锥度对临界速度的影响

车辆系统达到临界速度以后发生蛇行失稳,车轮开始出现稳定的周期性横移运动。通常采用降速法计算车辆系统的临界速度(图6),对车辆施加较高的初始速度令车辆处于失稳状态,随后对车辆施加纵向的反力,令其在光滑的轨道上前进,作用足够长的时间来观察车轮横移运动收敛情况,收敛时的速度即为临界速度。

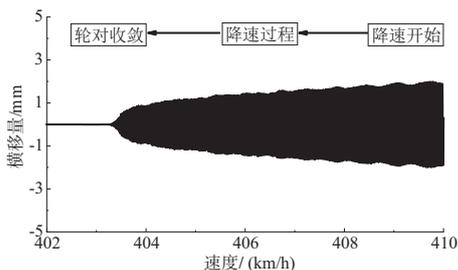


图6 降速示意图

6种不同的锥度形式对应的临界速度值如表1所示。整体而言,临界速度会随着锥度 λ 的增加而降低,但是 λ 为0.29时的临界速度要高于 λ 为0.26时。观察锥度曲线(图4),横移量为0.5~3 mm时, λ 为0.26时的锥度曲线负斜率更大,推测锥度曲线的负斜率程度会对临界速度产生影响,只考虑3 mm处锥度 λ 值的大小并不足以作为临界速度的评价标准。

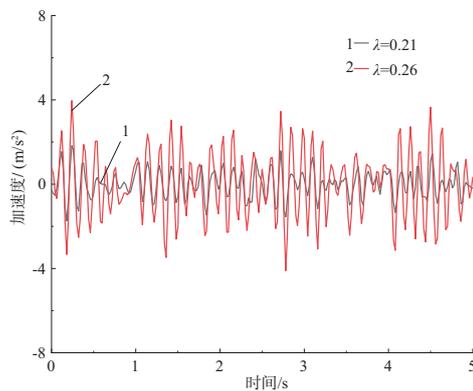
表1 临界速度

锥度 λ	0.21	0.24	0.26	0.29	0.32	0.41
临界速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	649	619	444	485	332	263

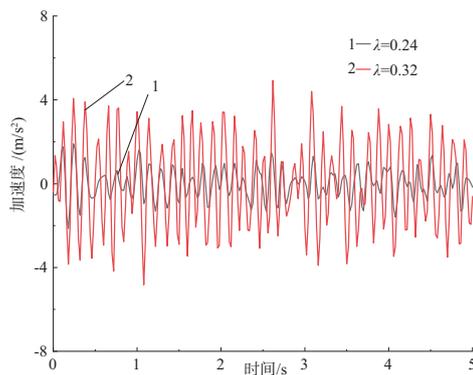
3.3 等效锥度对构架横向振动的影响

为探究不同等效锥度对车辆横向运动稳定性的影响,计算高速动车组在6种不同等效锥度非线性情况下,时速为350 km的速度时构架的横向振动情况。

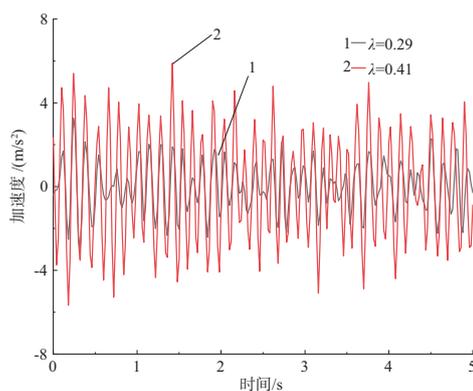
计算结果如图7所示,相同里程下,磨耗车轮与磨耗钢轨匹配后的横向加速度要明显大于标准钢轨,随着锥度的增大,与标准钢轨匹配后转向架的横向加速度最大值不超过 3 m/s^2 ,横向稳定性良好;而与磨耗钢轨匹配后的加速度最大值逐渐从 2 m/s^2 增长至 6 m/s^2 。当 $\lambda=0.32, 0.41$ 时,构架出现了明显的谐波振动,这是因为已经达到其临界速度,转向架出现了二次蛇行运动。



(a) 14万公里



(b) 17万公里



(c) 20万公里

图7 构架横向加速度

从频谱图8中可以看出,二者蛇行运动的频率在8 Hz附近,高锥度的加速度幅值更大,该频率已经接近车体的低阶模态频率,谐波振动将会通过二系悬挂装置传递到车体,引发车体剧烈振动,危害行车安全。

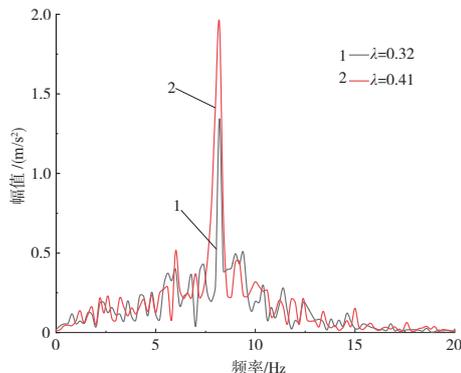


图8 构架频谱图

3.4 等效锥度对蛇行频率的影响

根据车轮横移的幅值可以获取上下包络线,包络线上蛇行运动的坐标值对应着轮对横移的峰值,计算蛇行频率时,需要取得减速度 a 、相邻两个峰值对应的时间 t_1 和 t_2 以及速度 v_1 和 v_2 :

$$v_1 - v_2 = a(t_1 - t_2) \quad (6)$$

求得蛇行频率 f 为

$$f = \frac{1}{t_1 - t_2} = \frac{a}{v_1 - v_2} \quad (7)$$

用公式(7)可以求出近似的蛇行频率,当减速度越低、采样频率越高时,结果精度越高,满足工程需要。

根据图9可以看出,车辆刚到达临界速度发生失稳时的蛇行频率最高,随着速度的增加,蛇行频率在逐渐降低,等效锥度为0.21和0.24的蛇行频率曲线变化速度较为平缓,超过临界速度50 km/h后频率只下降约0.3 Hz,而等效锥度为0.29的蛇行频率变化比较明显,超过临界速度50 km/h后频率降至6.8 Hz,频率变化约0.7 Hz。

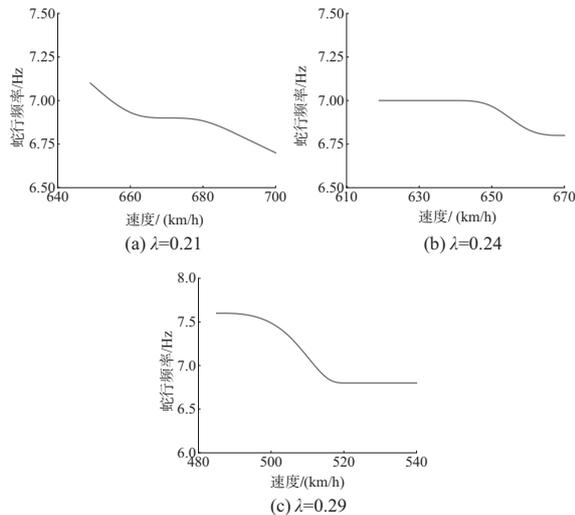


图9 蛇行频率曲线(标准钢轨)

磨耗车轮与磨耗钢轨匹配后,由于锥度相差较大,蛇行频率的特征更为明显。如图10所示,三者的初始蛇行频率分别为8.4 Hz、8.9 Hz、9.6 Hz,并且频率都随着速度的增加而降低, λ 为0.41时频率下降速度最快。观察等效锥度曲线(图4),当轮对横移量在0.5 mm~3 mm区间时, λ 为0.41时的锥度曲线负斜率最大,非线性最强, λ 为0.32时的锥度曲线次之,0.26锥度曲线最小,这可能是造成蛇行失稳频率下降更快的原因。

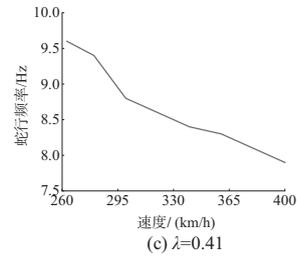
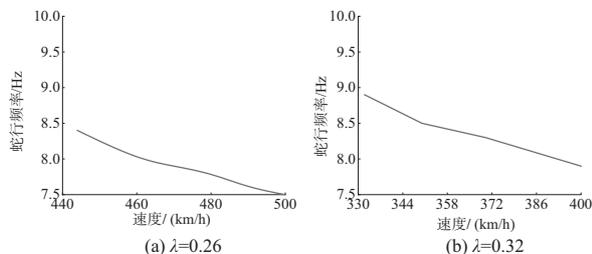


图10 蛇行频率曲线(磨耗钢轨)

4 结语

1) 实测不同里程的踏面廓形,发现车轮出现了不同程度的凹磨现象。磨耗车轮与标准钢轨匹配后的锥度曲线较平缓,而与磨耗钢轨匹配后的锥度曲线则出现较大的负斜率情况。

2) 建立动力学模型,计算不同锥度下的临界速度,发现锥度值 λ 和锥度曲线的负斜率程度都会对临界速度产生影响,以往只将3 mm处的锥度值 λ 作为分析标准的方法并不准确。

3) 超过临界速度以后,构架的横向加速度会出现明显的谐波信号,出现二次蛇行运动。当锥度曲线较为平缓时,蛇行频率随车速变化较慢,当锥度曲线呈现出负斜率形式时,负斜率越大蛇行频率下降得越快,锥度曲线的非线性形式会对车辆系统蛇行频率的变化产生影响。

4) 等效锥度会影响车辆的临界速度与蛇行运动特性,除关注3 mm处的锥度值外还应该考虑锥度曲线的负斜率情况,但相关机理暂未明确,还需要进一步系统研究。

参考文献:

- [1] 罗仁,石怀龙. 铁道车辆系统动力学及应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2018.
- [2] 干锋,戴焕云,高浩,等. 铁道车辆不同踏面等效锥度和轮轨接触关系计算[J]. 铁道学报,2013,35(9):19-24.
- [3] POLACH O. Characteristic parameters of nonlinear wheel/rail contact geometry[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(增刊1):19-36.
- [4] 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.
- [5] 李浩,戴焕云,汪群生,等. 等效锥度对120 km/h地铁车辆横向稳定性影响研究[J]. 机车电传动,2020(3):68-72.
- [6] International Union of Railways. UIC 519-2004 Method for Determining the Equivalent Conicity[S].
- [7] ECKHARD S,吴新民. 轮/轨几何学(待续)—轨道车辆与线路的共同课题[J]. 国外铁道车辆,2007,44(2):21-27.
- [8] 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.
- [9] DETTMANN C P, FAIN V. Linear and nonlinear stability of periodic orbits in annular billiards[J]. Chaos: an Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2017, 27(4):043106.

收稿日期:2020-10-26