

文章编号:1005-0523(2021)02-0103-07

## 轮对自稳定性及提速轨道车辆 MBS 仿真研究

李特特,王琪斌,朴明伟

(大连交通大学机械工程学院,辽宁 大连 116028)

**摘要:**提速轨道车辆需要开展轮轨关系改进与提速转向架动态设计 MBS 协同仿真研究,正确处理(非)线性的辩证关系,努力维系轮对自稳定理想状态。CRH5 转向架仅凭 XP55 踏面就实现了轨底坡由 1:20 到 1:40 的轨道参数转变,因而安全稳定裕度不充裕是其引进转化所遗留的 1 个固有技术问题。但是改用 XP55 踏面也带来了诸多技术效果,如低磨损区域拓宽至 16 mm 并使磨损轮轨局部密贴型接触的发生概率降低。在经常性的横风扰动下,轮轨匹配及动态仿真分析表明:钢轨轨头打磨修型至 60N 处理削弱了因上述轮轨关系改进设计所带来的技术效果,进而成为了防风沙动车组 CRH5G 产生磨损振动的直接原因。为了增强抵御极端气候影响的稳定鲁棒性能,制订了抗蛇行参数优化方案,明确了 CRH5 的技改方向。

**关键词:**提速轨道车辆;轮对自稳定性;MBS 仿真;车轮有害踏面磨损

中图分类号:U270.12

文献标志码:A

本文引用格式:李特特,王琪斌,朴明伟.轮对自稳定性及提速轨道车辆 MBS 仿真研究[J].华东交通大学学报,2021,38(2):103-109.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20210416.013

## Wheelset Self-Stability and MBS Simulations of Speeding-up Railway Vehicles

Li Tete, Wang Qibin, Piao Mingwei

(School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract:** In the researches and developments of speeding-up railway vehicles, it is necessary to carry out the collaborative MBS simulations on the wheel-rail relationship improvements and speeding-up bogie dynamical design, to transact correctly the dialectical relationship of (non-) linearities and maintain the ideal state of wheelset self-stability. The CRH5 bogies transform the rail parameters of rail cant from 1:20 to 1:40 by applying the XP55 tread alone, and the deficient safety and stability margin has therefore been an inherent problem since their technical importations and absorptions. However, the use of XP55 tread also brings many technical effects, such as widening of the low wear area to 16 mm and the probability reduction of local conformed contacts between worn wheel and rail. Under the frequent cross-wind disturbances, both wheel-rail matching and dynamic simulation analyses show that the grinding of rail head to 60N weakens the beneficial effects of the improved wheel-rail relationship design, which becomes then the direct cause of wear vibration problem produced by the anti-wind/sand trainsets, CRH5G. To enhance the stability and robustness against extreme climate influences, the optimal configuration scheme of anti-hunting parameters was formulated, defining clearly the CRH5 innovation or renovation direction.

**Key words:** speeding-up railway vehicles; wheelset self-stability; multi-body system simulations; detrimental wears of wheel tread

收稿日期:2020-12-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1201302)

作者简介:李特特(1994—),男,博士研究生,研究方向为轨道车辆系统动力学及振动应用。E-mail:15940856835@163.com。

通信作者:朴明伟(1962—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为轨道车辆系统动力学及振动应用。E-mail:m\_w\_piao@126.com。

Citation format: LI T T, WANG Q B, PIAO M W. Wheelset self-stability and MBS simulations of speeding-up railway vehicles[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(2): 103-109.

提速轨道车辆研制必须重视因磨耗磨损而造成的非线性影响,有必要利用多体系统(multi-body system, MBS)仿真技术,积极推介提速转向架动态设计方法,并开展与轮轨关系改进的协同设计,正确处理(非)线性的辩证关系。

为了更好地加强铁路在现代综合运输体系中的地位与作用,积极促进跨区域/洲际的经济走廊建设,提速轨道车辆研制<sup>[1-2]</sup>,依靠提速转向架动态设计方法<sup>[3-10]</sup>,打破经济速度 200~250 km/h 周期律,真正实现由“跟跑”到“领跑”的质态转变,开创跨越式发展的新局面。

结合铁路货运/客运提速的相关科研工作,本研究阐述轮对自稳定理想状态及其维系条件;防风沙动车组所存在的磨耗振动问题,具体分析车轮凹陷踏面磨耗形成机理及其主要/次要影响因素。

### 1 轮对自稳定理想状态及其维系条件

轮轨匹配条件是提速转向架设计的基础参数

之一,而高速铁路的轮轨关系改进设计则要为维系轮对自稳定理想状态提供更为有益的技术条件。进而提速轨道车辆 MBS 仿真以整车稳定性态分析图来引领转向架参数选配,彻底消除一次蛇行或其它类似现象,正确处理(非)线性的辩证关系。从而在 RAMS/LCC 管理体制下回归至转向架标称模型,确保(动态)载荷安全性,优化高铁运维成本。

如图 1 所示的轮对自稳定理想状态具有如下 3 点重要内涵:① 轮对摇头运动相对横移的具有适度的相位裕度;② 在小平斑无自旋下以单一曲率逼近轮轨接触的(近)线性关系;③ 进而得到基于谐波等效的(近)线性接触单元。

CRH5 是 ETR 系列摆式转向架的 1 种改进设计型式,拆除复摇枕及倾摆机构,二系钢簧改用空簧悬挂,保留抗侧滚一架二杆(其与转向架构架成了浮动筒支)。但是仅凭 XP55 踏面,如图 2(a)所示,CRH5 就实现了轨底坡由 1:20 到 1:40 的下述轨道参数转变。

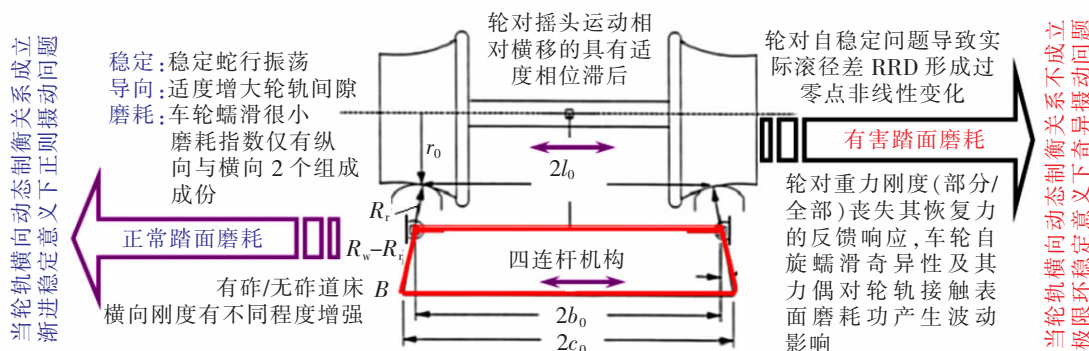
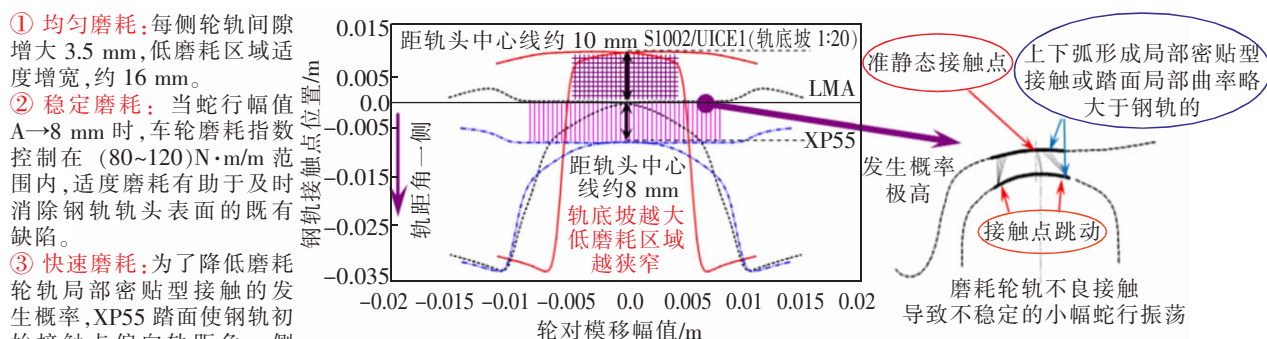


图1 基于单一曲率的轮轨接触等效线性模型构成及其轮对自稳定理想状态

Fig.1 Linear equivalent model of wheel-rail contacts based on mono-curvature and its ideal state of wheelset self-stability



- ① 均匀磨耗: 每侧轮轨间隙增大 3.5 mm, 低磨耗区域适度增宽, 约 16 mm。
- ② 稳定磨耗: 当蛇行幅值 A→8 mm 时, 车轮磨耗指数控制在 (80~120)N·m/m 范围内, 适度磨耗有助于及时消除钢轨轨头表面的既有缺陷。
- ③ 快速磨耗: 为了降低磨耗轮轨局部密贴型接触的发生概率, XP55 踏面使钢轨初始接触点偏向轨距角一侧且距轨头中心线约 8 mm。

图2 车轮三种典型踏面所对应的钢轨接触点分布

Fig.2 Rail contact point distributions corresponding to three typical wheel treads

1) 如 ETR600 的线路条件<sup>[8]</sup>,以 S1002 踏面作为车轮标准型面,轮背距 1 360 mm,钢轨初始接触点偏向外侧且距轨头中心线约 10 mm,名义等效锥度  $\lambda_{eN}=0.01$ 。根据提速 300 km/h 试运行的跟踪测试数据,文献[10]制订了车轮踏面磨耗极限的经验曲线,恢复至经济速度 200~250 km/h 运行,并采用初始低锥度均匀磨耗策略,即借用预防性与维修性 2 种钢轨轨头打磨/修型辅助技术,使实际等效锥度  $\lambda_e$  的均方差值  $RMS_{2,2r}/RMS_{3,0r} \leq 0.05$ 。

2) 而 CRH5 转向架,轮背距缩小至 1 353 mm,每侧轮轨间隙增大 3.5 mm,但是钢轨初始接触点偏向轨距角一侧且距轨头中心线约 8 mm,  $\lambda_{eN}=0.058 \approx 0.06$ ,  $\lambda_e$  的  $RMS_{2,2r}/RMS_{3,0r}=0.25/0.35$ 。但是利用 XP55 踏面所带来的轮轨关系改进技术效果,磨耗轮轨局部密贴型接触的发生概率显著降低,车轮形成了正常的下凹型踏面磨耗。

在中国铁路 CRH5 和韩国铁路 KTX 转向架上,XP55 踏面均取得了较为成功的运用经验。在经济速度 200~250 km/h 下,有砟线路服役条件,  $\lambda_e=0.25\sim 0.35$  的发生概率不足 5%。即使东北季风地区

或跨越其它线路运用,CRH5 的最长轮对镟修周期也可以达到或超过 25~30 万 km。考虑到高寒地区运用,钢轨局部冰霜雪等第三介质影响,车轮踏面产生诸多擦痕或擦斑,并未演变成为车轮多边形磨耗问题。

但是目前 CRH5G 兰新高铁运用所产生的磨耗振动问题日益严重,如图 2(b)所示,轮对镟修周期缩短至 10~15 万 km。不仅如此,车轮踏面横向不均匀磨耗正在转变为轮轨滚动纵向不均匀磨耗,如车轮多边形磨耗/钢轨波浪形磨耗。

工务部门应采取必要的防风减灾措施,如挡风墙或导流坡等,如图 3(a)所示,削弱或消除强横风对车体所形成的扰流效应,如图 3(b)所示,尽可能避免约 0.44 Hz 的车体横移模态被激发振动。一旦横挡碰撞接触,则会迫使前位与后位转向架蛇行振荡瞬间增大其参振质量,转向架摇头相位裕度迅速衰减,甚至会转变为相位超前,1 位和 3 位轮对的车轴横向力增大。考虑到倾覆力矩影响,相应的车轮脱轨系数最大值接近或超过 0.9,使脱轨翻车安全事故的发生概率增大。

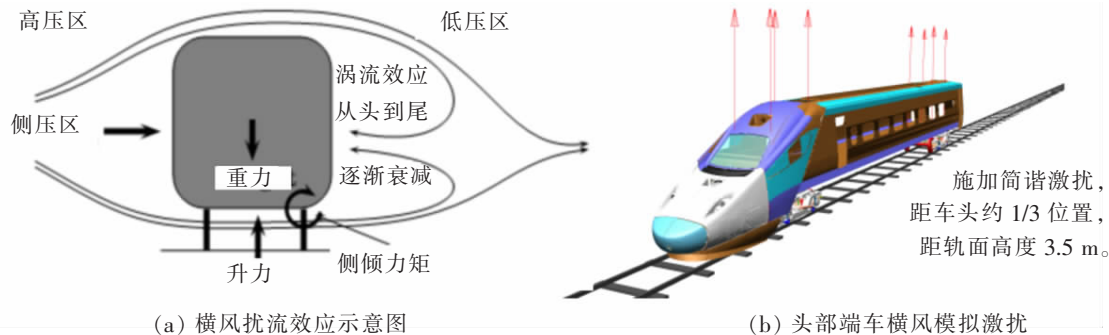


图3 横风扰流效应及其头部端车模拟激扰  
Fig.3 Cross-wind disturbance impact and its head end-vehicle simulated excitation

在经常性的横风扰动下,防风沙动车组 CRH2G/5G 两者车轮均转变为单纯的凹陷踏面磨耗特征。前者是由于抗侧滚扭杆装置运用不当造成的<sup>[11-12]</sup>,目前已被强制撤离。

## 2 有害踏面磨耗形成机理及主要/次要影响因素

与凹坑磨耗不同,CRH5G 的车轮凹陷踏面磨耗形成机理不容忽视钢轨轨头打磨修型至 60N 处理所造成的如下 3 大轮轨关系缺陷:

1) 使实际等效锥度  $\lambda_e$  的最小值  $\lambda_{e\min}$  降低至

0.03,在轨底坡 1:40 下轮对所形成的重力刚度被削弱,其更加暴露了安全稳定裕度不充裕问题;

2) 钢轨初始接触点趋于轨头中心线附近,如上图 2(b)所示,其类似于 LMA 踏面的轮轨匹配情况,使磨耗轮轨局部密贴型接触的发生概率变得最高;

3) 钢轨轨头打磨修型至 60N 处理所形成的累计误差影响,迫使车轮自旋蠕滑增强且对轮轨接触表面磨耗功产生波动影响。

我国铁路原本具有低磨耗区域较为宽展的特殊性,但是钢轨轨头打磨修型至 60N 处理削弱了因改用 XP55 踏面所带来的轮轨关系改进设计技术效



果,进而在新车状态下无法遵循均匀磨耗规律。

与轮对蛇行的情况类似,转向架摇头运动相对横移的亦具有适度的相位裕度,其要在整个轮对镟修周期内确保提速轨道车辆的安全稳定运行,简称安全稳定裕度。与 ETR600 的情况不同,CRH5 转向架采用抗蛇行原始配置,如线性阻尼标定值  $360 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$ , 液压刚度约  $2\sim 3 \text{ MN/m}$ , 其并不具备抵御因  $\lambda_e$  增大而使动态阻尼快速衰减的能力,即构成了所谓的安全稳定裕度不充裕问题。

不仅如此,在经常性的横风扰动下约  $1.2\sim 1.3 \text{ Hz}$  的车体侧滚模态很容易被激发振动。考虑到抗侧滚一架二杆,高速晃车会产生对车轮蠕滑的反馈负面影响。钢轨轨头打磨修型至 60N 处理所造成的上述 3 大轮轨关系缺陷,如同闭环系统的内部循环一样,其会促使车轮很快形成凹陷踏面磨耗特征,即踏面凹陷磨耗并适度拓展其开度。与德国 ICE 城际快铁的情况类似,磨耗钢轨局部密贴型接触导致车轮踏面中央集中磨耗,钢轨接触点跳动且形成走行宽光带,即构成了所谓的不稳定小幅蛇行振荡。

考虑到牵引电机体悬(即吊挂在车体地板下面),CRH5G 兰新高铁运维需要更加重视小幅蛇行振荡所造成的(动态)载荷安全性问题。如上所述,诸如强横风极限工况会迫使 1 位和 3 位轮对产生超常的蛇行幅值。除此之外,尽管限速  $200 \text{ km/h}$  运行,如图 4 所示,磨耗轮轨不良接触所带来的小幅蛇行振荡也会形成窄带响应特征并造成所谓的“首次穿越”不确定事件,迫使常规疲劳转变为阈值穿越不确定事件。结果车下吊挂的牵引电机产生异常

振动并对轻量化车体造成超常载荷影响,如大幅值循环载荷及其对轻量化车体所造成的疲劳损伤。因此,就提速轨道车辆来讲,小幅蛇行振荡安全论并不成立。

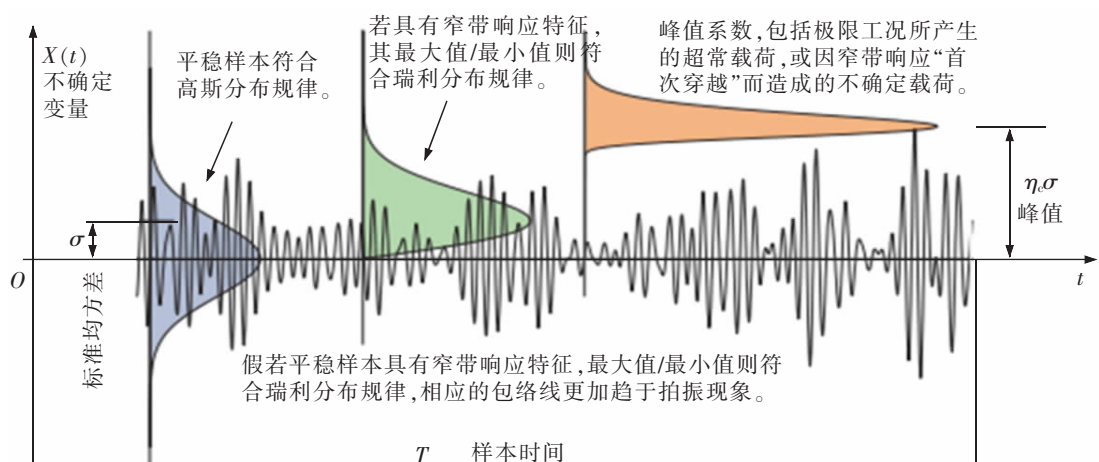
综上所述,安全稳定裕度不充裕是 CRH5G 兰新高铁运用产生磨耗振动问题的根本原因,而钢轨轨头打磨修型至 60N 处理所造成的上述 3 大轮轨关系缺陷则雪上加霜,其是 CRH5G 产生磨耗振动的直接原因,或者说,不容忽视的次要影响因素。为了确保兰新高铁安全稳定运营,当务之急就是要尽快修复或弥补上述轮轨关系缺陷,如改用 LM 或 LMB-10 等圆锥型踏面,  $\lambda_{\text{min}} \geq 0.05$ , 钢轨初始接触点偏向轨距角一侧且距轨头中心线  $6\sim 8 \text{ mm}$ 。

### 3 抗侧滚一架双杆所形成的一次蛇行及解决对策

面对欧洲既有铁路提速及轮轨接触几何关系普查,Polach 不再坚持小幅蛇行安全论进而提出了车轮型面更新设计<sup>[9]</sup>,试图拓宽踏面接触光带以维系(近)线性关系。尽管如此,假若忽视提速轨道车辆动态行为及其对车轮蠕滑磨耗影响,无论高速铁路的轮轨关系改进设计得再好,其也是徒劳的。

考虑到牵引电机体悬,如上所述,车轮凹陷踏面磨耗是 ETR 摆式高速列车提速运行的 1 项主要制约性影响因素。这与本研究所得到的分析结论基本吻合,即安全稳定裕度不充裕。

但是下述两项相关研究工作<sup>[13-14]</sup>却忽视了如图 5 所示的抗侧滚一架二杆及其所形成的一次蛇行问题。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

图 4 小幅蛇行振荡窄带响应及其对(动态)载荷安全性影响

Fig.4 Narrow band response of small amplitude hunting oscillation and its influence on (dynamic) load safety

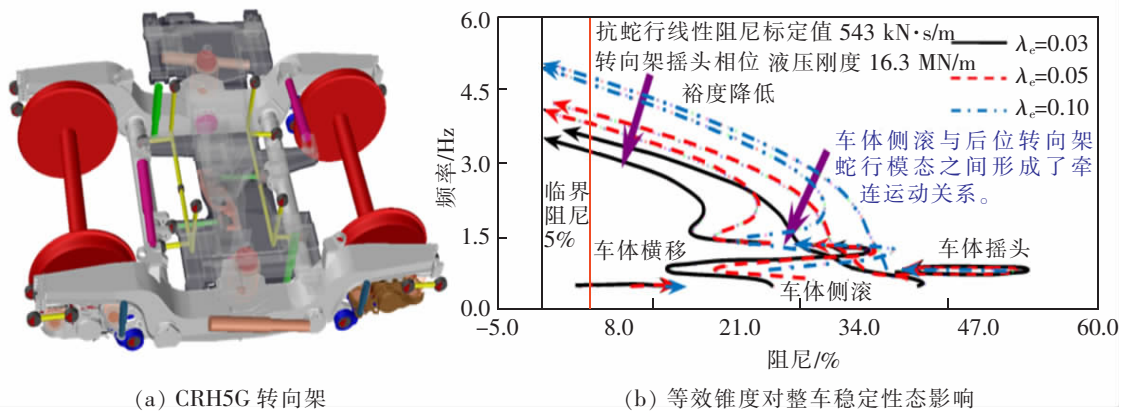


图 5 在新型抗蛇行减振器配置下 CRH5G 转向架及其一次蛇行现象  
 Fig.5 CRH5G bogie and its primary hunting phenomenon under novel anti-yaw dampers

1) 轴距 2.7 m 的 ETR 摆式转向架参数选配及相关分析表明:叉型转臂及辅助拉杆定位方式,其对轮对纵向与横向定位的刚度贡献分别达到 14,6 MN/m。根据转向架轴距与轮对定位约束刚度的互补性,ETR 摆式转向架属于迫导向类型转向架。但是叉型转臂及辅助拉杆定位方式却较好地兼顾了稳定、导向及磨损 3 大综合技术性能要求。

2) 改用 ALSTOM/Dispen 供货商提供的新型抗蛇行减振器(双循环,线性阻尼标定值 543 kN·s/m,液压刚度 16.3 MN/m),相应的台架动态试验测试表明:抗蛇行准静态特性(如示功图及阻尼特性曲线等)不足以描述其装车特性,而抗蛇行动态特性则具有 Maxwell 模型的可回归性。

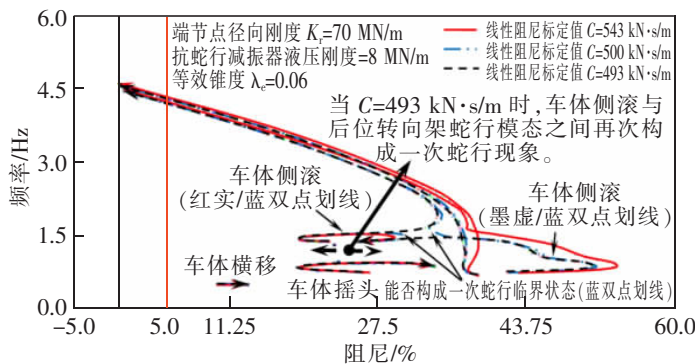
考虑到较强的抗蛇行高频阻抗作用,如图 5(b)所示,车体摇头大阻尼特征迫使后位转向架蛇行与车体侧滚模态之间形成了所谓的一次蛇行。在横风、侧风以及尾流扰动下,高速晃车会因一次蛇行而增强其流固耦合效应,进而产生对车轮蠕滑的反

馈负面影响,如同 CRH3 的情况一样,演变成凹坑踏面磨损。

同理,高速道岔通过也会因一次蛇行或其它类似现象而造成更为严重的道岔磨损问题,诸如岔尖磨损与翼轨鱼鳞斑等。

由此可见,在相关软件分析综合平台的技术支撑下,提速转向架动态设计方法是以复杂约束内力精准分析作为依据的 1 种系统设计方法,利用诸如正交分解或模态设计等大数据挖掘手段,尽快明确提速转向架的技改方向。

根据抗蛇行频带吸能机制(发明专利),如图 6 所示,在  $\lambda_c=0.06$  下给出了基于 CRH5 抗蛇行参数优选的整车稳定性态分析图。这一抗蛇行优选方案包括如下 3 个要点:① 抗蛇行减振器两端橡胶节点的径向刚度为 70 MN/m,相应的安装支座应该具有足够的刚度;② 上述抗蛇行减振器的辅助腔内,添加若干个自膨胀袋,将其液压刚度降低至 8 MN/m;③ 相应的线性阻尼也会稍有降低,其临界值为 500 kN·s/m。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net  
 图 6 基于 CRH5 抗蛇行参数优选的整车稳定性态分析图  
 Fig.6 Analysis graph of full-vehicle stability properties and variation patterns based on CRH5 optimal configuration of anti-hunting parameters

否则,若取  $493 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$ ,车体侧滚与后位转向架蛇行模态之间则再次形成一次蛇行。

以英国小缺陷谱作为轨道不平顺激励输入,整车 MBS 非线性仿真分析充分证明了上述抗蛇行参数优化方案具有如下 3 个主要技术效果:

1)  $\lambda_{eN}$  可以降低至 0.03,其可以利用车体横移模态振荡来促使车轮形成正常的下凹型踏面磨耗,进一步提高对轨道线路的适应性与友好性;

2) 前位与后位转向架摇头相位裕度两者均有明显的增强,且彻底消除了一次蛇行的负面影响,使安全稳定裕度变得较为充裕,进而增强稳定鲁棒性能;

3) 在合理的轮轨匹配条件下,快速动车组不仅可以科学提升构造速度至  $250 \text{ km/h}$  或更高一些,也能够 RAMS/LCC 管理体制下回归至转向架标称模型。

快速转向架  $\lambda_{eN}=0.03$ ,可以与(超)高速转向架或提速货运转向架形成对钢轨磨耗的互补,尽可能避免对钢轨轨头进行过度的打磨修型处理,能够促进既有与新建铁路网的互联互通。

另外,在极端气候的服役条件下,还是应该适度提高  $\lambda_{eN}$ ,使  $\lambda_{\text{min}} \geq 0.05 \sim 0.06$ ,进而增强抵御诸如经常性的横风扰动或局部钢轨的冰霜雪等影响因素的稳定鲁棒性能,尽可能使磨耗轮轨局部密贴型接触的发生概率得到降低。

综上所述,整车稳定性态分析图是提速转向架动态设计方法的 1 项重要组成部分,凭借抗蛇行(宽)频带吸能机制,其成为了打破  $200 \sim 250 \text{ km/h}$  经济速度周期律的最佳优化手段。

#### 4 (非)线性的辩证关系

我国高铁运维应该积极推介提速转向架动态设计方法,正确处理(非)线性的辩证关系。

考虑到单牵引杆或抗侧滚扭杆装置运用不当,在横风、侧风及尾流扰动下,高速晃车会因一次蛇行或其它类似现象而增强其流固耦合效应并对车轮蠕滑产生反馈负面影响。如同闭环系统的内部循环一样,实际滚径差 RRD 曲线很快或因低磨耗区域内发生局部密贴型接触而形成过零点的不连续变化,或因低磨耗区域两侧边缘出现车轮自旋蠕滑奇异性而产生过零点的负斜率变化,进而滑向极限稳定意义下奇异摄动问题。由此可见,除了凹陷

或凹坑踏面磨耗外,车轮有害磨耗还包括严重的轮缘侧磨,但是车辆磨耗振动转变为钢轨轨头磨损问题。

严格遵循非线性系统的设计模态分析规则,本研究在如下 2 个方面正确处理了(非)线性的辩证关系:

1) 根据抗蛇行(宽)频带吸能机制,以整车稳定性态分析图来引领转向架参数优化,使抗蛇行动态特性与轮对定位约束刚度形成合理的匹配关系;

2) 在 RAMS/LCC 管理体制下回归至转向架标称模型,即渐进稳定意义下正则摄动问题,确保(动态)载荷安全性进而优化运维成本。

重温威金斯的磨耗稳定理论,深刻领悟基于横移摇头 2DoF 的轮对有约束动力学方程所揭示的如下蛇行运动规律:如图 1 所示,轮轨横向动态制衡关系是确保轮对自稳定理想状态的 1 项充要条件,尽可能避免因小幅蛇行振荡而发生“首次穿越”。车轮因此要形成正常的下凹型踏面磨耗规律,如图 2 所示,包括均匀、稳定及快速 3 个磨耗阶段,尽可能使磨耗轮轨局部密贴型接触的发生概率降低,或者说,应采取初始低锥度策略并满足均匀、稳定及快速磨耗规律要求。

大量工业软件的应用是工业时代信息化快速发展的 1 个主要特征。但是轮轨接触具有几何与力学双重属性,这是考核或验证相关软件的基本原则,以便为正确处理(非)线性的辩证关系提供理论与技术支撑,进而更好地把握稳定磨耗振动的相关性影响关系和铁路提速与运输收益的利弊权衡关系。

#### 5 结论

1) 轮轨接触具有几何与力学双重属性,因而轮轨匹配条件是提速转向架动态设计的 1 项基础参数,不得随意改变。高速铁路的轮轨关系改进设计要为维系轮对自稳定理想状态提供更为有益的技术条件,而提速轨道车辆 MBS 仿真则要积极推介提速转向架动态设计方法,正确处理(非)线性的辩证关系。

2) 在经常性的横风扰动下,兰新高铁全长近  $2000 \text{ km}$ ,钢轨轨头打磨修型至 60N 处理削弱了因改用 XP55 踏面所带来的轮轨关系改进设计技术效果。轮轨匹配及动态仿真分析表明:其成为导致 CRH5G 产生磨耗振动问题的直接原因,或不容忽



视的次要影响因素。

3) CRH5 转向架仅凭 XP55 踏面就实现了轨底坡由 1:20 到 1:40 的轨道参数转变,因而安全稳定裕度不足是引进转化所遗留的 1 个固有技术问题,也是造成 CRH5G 产生磨耗振动的根本原因。以整车稳定性态分析图来引领转向架参数选配,本研究制订了抗蛇行参数选配方案,克服了一次蛇行及其负面影响,安全稳定裕度十分充足,进而增强了抵御极端气候影响的稳定鲁棒性能。

#### 参考文献:

- [1] WICHENS A H. Fundamentals of rail vehicle dynamics: guidance and stability[M]. Netherlands: Swets & Zeitlinger Publishers, 2003.
- [2] 陈泽深,王成国. 铁道车辆动力学与控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [3] 朴明伟,杨晶,刘德柱,等. 德国 ICE3 系列转向架设计缺陷及其解决方案[J]. 计算机集成与制造系统, 2016, 22(7): 1654-1669.
- [4] 方照根,杜伟,朴明伟,等. 高速轮轨有害磨耗形成机理及其反馈负面影响研究[J]. 大连交通大学学报, 2020, 41(6): 51-56.
- [5] GAN F, DAI H Y, GAO H, et al. Wheel-rail wear progression of high speed train with type S1002CN wheel treads[J]. Wear, 2015(328/329): 569-581.
- [6] 范军,王鹏,刘孟奇,等. 标准动车组车轮磨耗特征研究[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(6): 112-116.
- [7] ZACHER M, NICKLISCH D, GRABNER G, et al. A multi-national survey of the contact geometry between wheels and rails[J]. Rail and Rapid Transit, 2015, 229(6): 691-709.
- [8] POLACH O. Wheel profile design for target conicity and wide tread wear spreading[J]. Wear, 2010, 271(1): 195-202.
- [9] POLACH O, NICKLISCH D. Wheel/rail contact geometry parameters in regard to vehicle behaviour and their alteration with wear[J]. Wear, 2016(366/367): 200-208.
- [10] MAZZOLA L, ALFI S, BRAGHIN F, et al. Limit wheel profile for hunting instability of railway vehicles[C]//Berlin: Proceedings of the Euromech 500 Colloquium: Non-smooth Problems in Vehicle Systems Dynamics, 2008.
- [11] TOMIOKA T, TAKIGAMI T, FUKUYAMA A, et al. Prevention of carbody vibration of railway vehicle induced by imbalanced wheelsets with displacement-dependent rubber bush[J]. Journal of mechanical systems for transportation and logistics, 2010, 3(1): 131-142.
- [12] SHIMIZU A, IIDA T. Analyzing effect of profile change of top surface of 60 kg rail upon vehicle dynamics[J]. QR of RTRI, 2015, 56(1): 21-25.
- [13] MAZZOLA L, ALFI S, BRUNI S. A method to optimize stability and wheel wear in railway bogies[J]. International Journal of Railway, 2010, 3(3): 95-105.
- [14] BRUNI S, BELFORTE P, CERA A, et al. Experimental investigation of yaw damper performances: an improved and harmonized testing methodology developed within Mod-Train EU project[C]//Seoul: Proc of WCRR '08 International Conference, 2008.