

橡胶弹性轮对对轻轨车辆动力学性能的影响

许哲丰¹ 龙 辉^{2,3} 刘 韦^{2,4} 白建军¹

(1. 无锡地铁集团有限公司建设分公司, 214023, 无锡; 2. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 412007, 株洲;

3. 湘潭大学机械工程学院, 411105, 湘潭; 4. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 100081, 北京//第一作者, 工程师)

摘 要 针对轻轨车辆在运行过程中出现的振动噪声过大问题,以某型橡胶弹性轮对为研究对象,通过试验获得轮箍与车轴之间橡胶弹性元件的参数,构建轻轨车辆动力学模型,分析不同橡胶弹性元件参数对橡胶弹性轮对和刚性轮对的车辆动力学性能,以及对线路的适应能力。结果表明:采用橡胶弹性轮对在一定程度上提高了车辆的平稳性,降低了轮轨冲击,提高了车辆的曲线通过能力,减缓了轮轨磨耗。

关键词 轻轨车辆; 橡胶弹性轮对; 动力学性能

中图分类号 U239.3;U270.1*1:U270.331

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.006

Influence of Rubber Resilient Wheelset on LRV Dynamic Performance

XU Zhefeng, LONG Hui, LIU wei, BAI Jianjun

Abstract Targeting the problem that the vibration and noise exceed standard during operation of LRV (light rail vehicle), taking certain type of rubber resilient wheelset as research object, the parameters of the rubber elastic element between the wheel hoop and the axle are obtained through experiments, and LRV dynamic model is constructed. The vehicle dynamic performance of different rubber elastic element parameters on rubber elastic wheelsets and rigid wheelsets is analyzed, as well as the adaptability of the line. Results show that the elastic rubber wheelset improves the stability of the vehicle to a certain extent, reducing wheel-rail impact, improving the curve passing ability of vehicle, alleviating the wheel-rail wear.

Key words LRV (light rail vehicle); rubber resilient wheelset; dynamics performance

First-author's address Construction Branch of Wuxi Metro Group Co., Ltd., 214023, Wuxi, China

针对城市环境中的复杂地形,轻轨车辆面临着提高运行平稳性、降低噪声和减少轮轨磨耗的要求。目前,橡胶弹性轮对是一项非常行之有效的措施。文献[1]基于 ABAQUS 仿真软件建立弹性车

轮轮轨接触应力有限元模型,分析了直线和曲线线路上压剪复合型弹性车轮轮辋与轮芯之间的橡胶元件变形及对轮轨接触位置分布的影响。文献[2]对弹性车轮进行了动态刚度测试,同时对其阻尼特性进行了计算,分析了其在不同工况下的减振降噪效果。文献[3]在弹性车轮建模方法及对橡胶材料本构模型研究的基础上,建立了相同直径的有轨电车弹性车轮和刚性车轮有限元模型,并采用适用于大型对称特征值问题的 Block Lanczos 方法对这两种车轮进行模态分析。文献[4]建立了橡胶压剪复合型弹性车轮与钢轨耦合的三维有限元模型,基于材料非线性和几何非线性,开展车轮的实际静压和滚动过程模拟,并与刚性车轮比较,得到了轮轨接触压力和钢轨接触斑的变化规律。

本文从轻轨车辆结构出发,建立了橡胶弹性轮对整车动力学模型,分析了不同工况下的车辆动力学性能,研究成果可为后续橡胶弹性轮对在轻轨上的研究提供参考。

1 轻轨车辆轮对结构及动力学模型

1.1 橡胶弹性轮对结构

轻轨车辆橡胶弹性轮对结构^[1]如图1所示。图1中,轮对最外侧为轮箍,与钢轨接触;轮对最内侧为轮芯,通过过盈配合连接车轴;轮箍和轮芯之间为V型橡胶元件,共计30个,其通过压环压紧,再使用紧固螺栓进行固定。

弹性橡胶车轮与刚性车轮相比,轮芯和轮箍之间增加了橡胶弹性元件,即轮芯相对于轮箍具有6个自由度(分别为相对于 x 、 y 和 z 轴的移动,以及绕 x 、 y 和 z 轴的转动,其中 x 向为车辆前进方向, y 向为车轮的轴向, z 向垂直于轨面)。在这6个方向上轮芯可以相对轮箍产生弹性变形,即弹性车轮轮芯相对于轮箍具有6个方向的变形刚度。弹性橡胶车

轮的等效刚度通过试验获得,具体参数如表 1 所示。

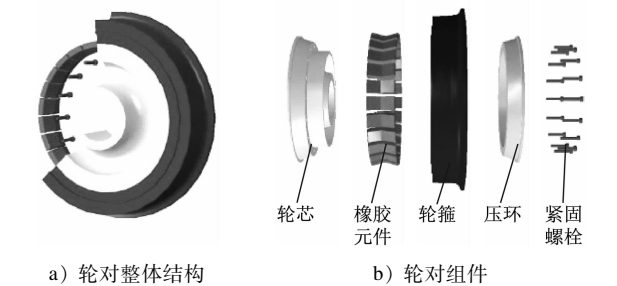


图 1 轻轨车辆橡胶弹性轮对结构

Fig. 1 LRV rubber elastic wheelset pair structure

表 1 弹性橡胶车轮的等效刚度

Tab. 1 Equivalent stiffness of elastic rubber wheels			
参数	取值	参数	取值
x 向刚度/(MN/m)	80.69	x 向偏转刚度/(MNm/rad)	0.96
y 向刚度/(MN/m)	80.69	y 向扭转刚度/(MNm/rad)	0.55
z 向刚度/(MN/m)	22.93	z 向偏转刚度/(MNm/rad)	0.96

1.2 轻轨车辆动力学模型

以某型轻轨车辆为研究对象,构建车辆动力学模型。该模型由 1 个车体、2 个构架、4 个轮对及 8 个轴箱构成。各个部件之间通过弹簧阻尼力元进行连接。一系悬挂包括一系钢簧、一系垂向减振器、转臂节点。二系悬挂包括二系空簧、横向减振器、二系止挡、Z 字型牵引装置等。轮对踏面采用 LM 廓形。轻轨车辆的主要参数如表 2 所示。轻轨车辆的设计速度为 80 km/h。

表 2 轻轨车辆的主要参数

Tab. 2 Main parameters of LRV

参数	取值	参数	取值
车体质量/kg	21 000	一系钢簧三向刚度/(MN/m)	2.1 或 2.1 或 4.9
构架质量/kg	2 340	空簧三向刚度/(MN/m)	1.5 或 1.5 或 3.1
轮对总质量/kg	1 050	转臂节点纵向刚度/(MN/m)	9.0

橡胶弹性轮对在 SIMPACK 中的建模过程如下:

- 1) 按照正常建模方法建立 1 个轮对,采用 07 号铰接,将左侧轮轨力元删除;
- 2) 按照正常建模方法建立 1 个轮对,采用 07 号铰接,将右侧轮轨力元删除;

3) 建立 1 个质量块 A,并通过 0 号铰接铰接到左侧轮对上,输入轮对质量、转动惯量;

4) 建立 1 个质量块 B,并通过 0 号铰接铰接到右侧轮对上,输入轮对质量、转动惯量;

5) 建立 1 个车轴,采用 07 号铰接,不生成轮轨关系;在车轴左、右侧和轮对连接位置设置点 C、D;

6) 通过 43 号力元连接质量块 A 和点 C,以及质量块 B 和点 D;力元刚度选择通过试验获得的弹性轮对橡胶元件的等效刚度数据。

2 轻轨车辆仿真模拟分析

2.1 轻轨车辆的稳定性

轻轨车辆稳定性的评价方法主要有两种:一种方法是通过观察高速运行工况下轻轨车辆轮对极限环的收敛情况,判断车辆的非线性临界速度;另外一种方法是车辆构架横向加速度是否超过文献[5]的要求。不同标准的要求不尽相同,依据文献[5],对轻轨车辆的稳定性进行分析。文献[5]规定了构架中心处对应的横向加速度均方根值的测量要求和合格标准。

采用第一种方法对轻轨车辆的稳定性进行分析。图 2 为橡胶弹性轮对和刚性轮对对应的车辆分岔构型图,两种轮对对应分岔曲线图均为亚临界状态。由图 2 可见,橡胶弹性轮对的非线性临界速度约为 190 km/h,刚性轮对的非线性临界速度约为 210 km/h,两者相差约 10%,但均满足轻轨车辆的设计速度 80 km/h;橡胶弹性轮对非线性临界速度低于刚性轮对,究其原因主要非线性临界速度受一系水平刚度影响较大,橡胶弹性轮对降低了一系悬挂水平刚度,进一步降低了车辆非线性临界速度。

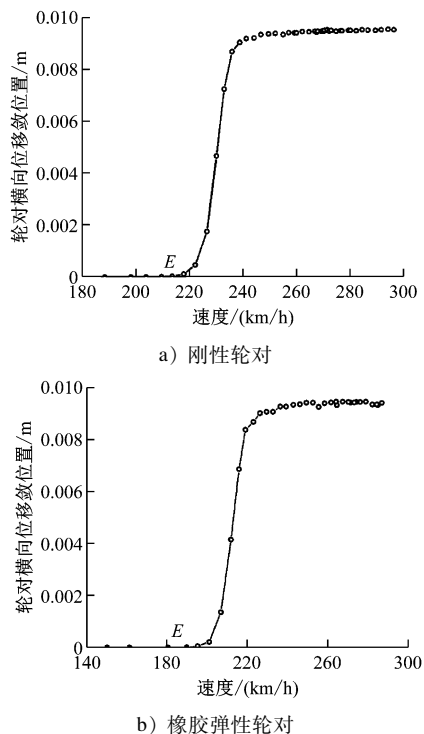
2.2 轻轨车辆的直线线路通过能力

轻轨车辆在直线线路上运行时,主要考察车体平稳性和最大加速度两项指标。GB 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》^[6]规定的铁道车辆车体平稳性指标等级,如表 3 所示。

表 3 铁道车辆车体的平稳性指标等级

Tab. 3 Railway vehicle body stability index grade

平稳性等级	平稳性评价	平稳性指标
1 级	优秀	<2.50
2 级	良好	2.50 ~ <2.75
3 级	合格	2.75 ~ 3.00



注: E 点为车辆非线性临界速度点。

图2 车辆分岔构型图

Fig. 2 Vehicle bifurcation configuration diagram

计算轻轨车辆平稳性指标时,采用美国五级谱进行计算,以反映橡胶弹性轮对对线路的适应能力。

图3为两种轮对结构下的轻轨车辆以10~90 km/h的运行速度通过美国五级谱直线线路时的车体横向和垂向平稳性指标。由图3可知,当轻轨车辆运行速度从10 km/h增加到90 km/h的过程中,采用橡胶弹性轮对的车体横向加速度分别为 1.15 m/s^2 、 1.35 m/s^2 、 1.51 m/s^2 、 1.60 m/s^2 、 1.68 m/s^2 、 1.92 m/s^2 、 2.04 m/s^2 、 2.08 m/s^2 、 2.27 m/s^2 ,采用刚性轮对的车体横向加速度分别为 1.20 m/s^2 、 1.43 m/s^2 、 1.58 m/s^2 、 1.70 m/s^2 、 1.87 m/s^2 、 2.14 m/s^2 、 2.30 m/s^2 、 2.56 m/s^2 、 2.70 m/s^2 ;采用橡胶弹性轮对的车体垂向加速度分别为 0.78 m/s^2 、 1.15 m/s^2 、 1.29 m/s^2 、 1.40 m/s^2 、 1.59 m/s^2 、 1.65 m/s^2 、 1.83 m/s^2 、 1.85 m/s^2 、 1.90 m/s^2 ,采用刚性轮对的车体垂向平稳性指标分别为0.81、1.07、1.36、1.52、1.68、1.77、1.88、1.93、2.00。由此可见,采用橡胶弹性轮对的车体平稳性要优于刚性轮对;两种轮对结构下的车体横向平稳性差距较大,垂向平稳性差距较小;两种轮对结构下车体的横向平稳性和垂向平稳性在列车高速运行区段较大,在低速运行区段较小。

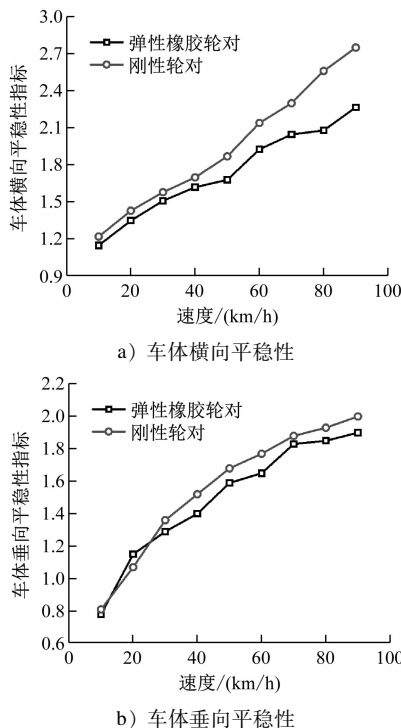


图3 轻轨车辆车体的平稳性-速度关系曲线

Fig. 3 LRV body stability-speed relationship curve

而对于车体垂向平稳性指标也存在相同的趋势,如图4橡胶弹性轮对对车体垂向加速度对应幅值分别为0.052 36、0.075 89、0.134 40、0.178 50、0.269 50、0.320 00、0.400 00、0.430 00、0.440 00,刚性轮对对应车体垂向加速度分别为0.036 5、0.068 6、0.133 0、0.198 0、0.292 0、0.350 0、0.440 0、0.472 0、0.455 0。而橡胶弹性轮对对车体横向加速度分别为0.023 9、0.093 4、0.178 0、0.181 0、0.273 9、0.406 6、0.606 0、0.858 6、1.154 0,刚性轮对对应车体横向平稳性指标分别为0.048 1、0.112 0、0.173 0、0.221 0、0.296 0、0.442 0、0.741 0、1.060 0、1.380 0。橡胶弹性轮对对车体平稳性要好一些。主要是因为橡胶元件相当于增加了为依据弹性悬挂的缘故能够更好地消减轮轨激励传递给车体的能量。

图5为两种轮对结构下的轻轨车辆以10~90 km/h速度通过美国五级谱直线线路时的构架横向和垂向振动加速度。由图5可见,所示不同速度下橡胶弹性轮对与刚性轮对构架横向加速度在90 km/h情况下相差12%,垂向加速度相差约5%,刚性轮对构架横向加速度要远大于橡胶弹性轮对,两者均小于UIC 518—2009中 5.5 m/s^2 限制值,均符合标准要求,而垂向相差幅值较小,橡胶弹性轮对

具有较好的线路适应能力。

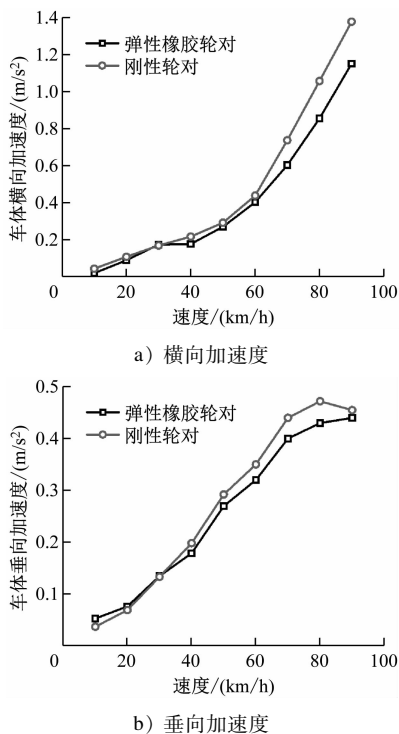


图4 轻轨车辆车体振动加速度-速度关系曲线

Fig. 4 LRV body vibration acceleration-speed relationship curve

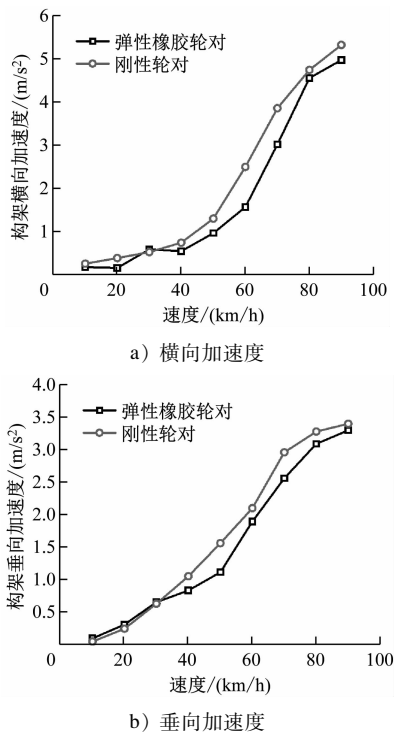


图5 轻轨车辆构架振动加速度-速度关系曲线

Fig. 5 LRV frame acceleration-speed relationship curve

的速度通过直线线路时的轮轨横向力和轮轨垂向力随速度变化曲线。由图6可见,橡胶弹性轮对对应的轮轨横向力要远小于刚性轮对,而其轮轨垂向力差值要小得多,且高速区间两者的差值大于低速区间。通过在轮芯与轮箍之间增加弹性橡胶层,能够有效缓解轮轨冲击对车辆动力学性能的影响,而对应车体、构架的加速度则表现为不同程度的降低。

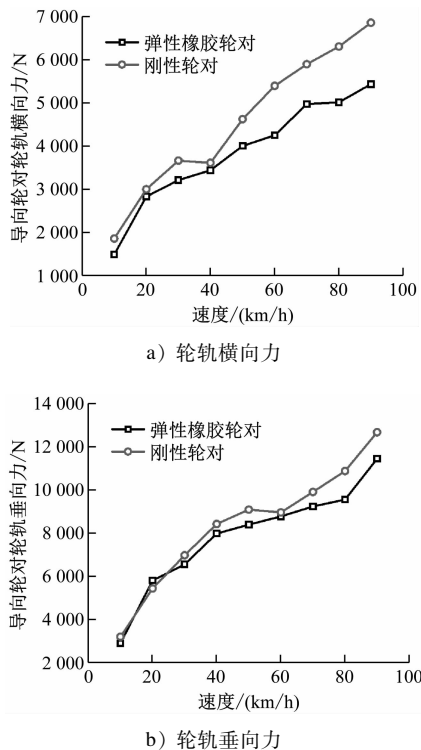


图6 轻轨车辆轮轨冲击力-速度关系曲线

Fig. 6 Curve of LRV wheel-rail impact-speed relationship curve

2.3 轻轨车辆的曲线线路通过能力

为研究轻轨车辆的曲线线路通过能力,选择 R (曲线半径)为400 m的曲线线路和小半径曲线线路两种工况进行研究。 R 为400 m的曲线线路中直线段长100 m、缓和曲线长100 m、圆曲线长200 m、超高为0.12 m、车辆运行速度为60 km/h;小半径曲线线路中直线段长100 m、无缓和曲线、 R 为150 m、圆曲线长60 m、无超高、车辆运行速度为5 km/h。

图7为两种轮对结构下的轻轨车辆以68 km/h的运行速度通过 R 为400 m的曲线线路时的轮轨横向力、轮轨垂向力、轮重减载率、脱轨系数及轮轨磨损功率。由图7可见,橡胶弹性轮对和刚性轮对对应的各参数曲线均满足GB 5599—1985的要求;刚性轮对对应的脱轨系数、轮轨横向力及整车磨损

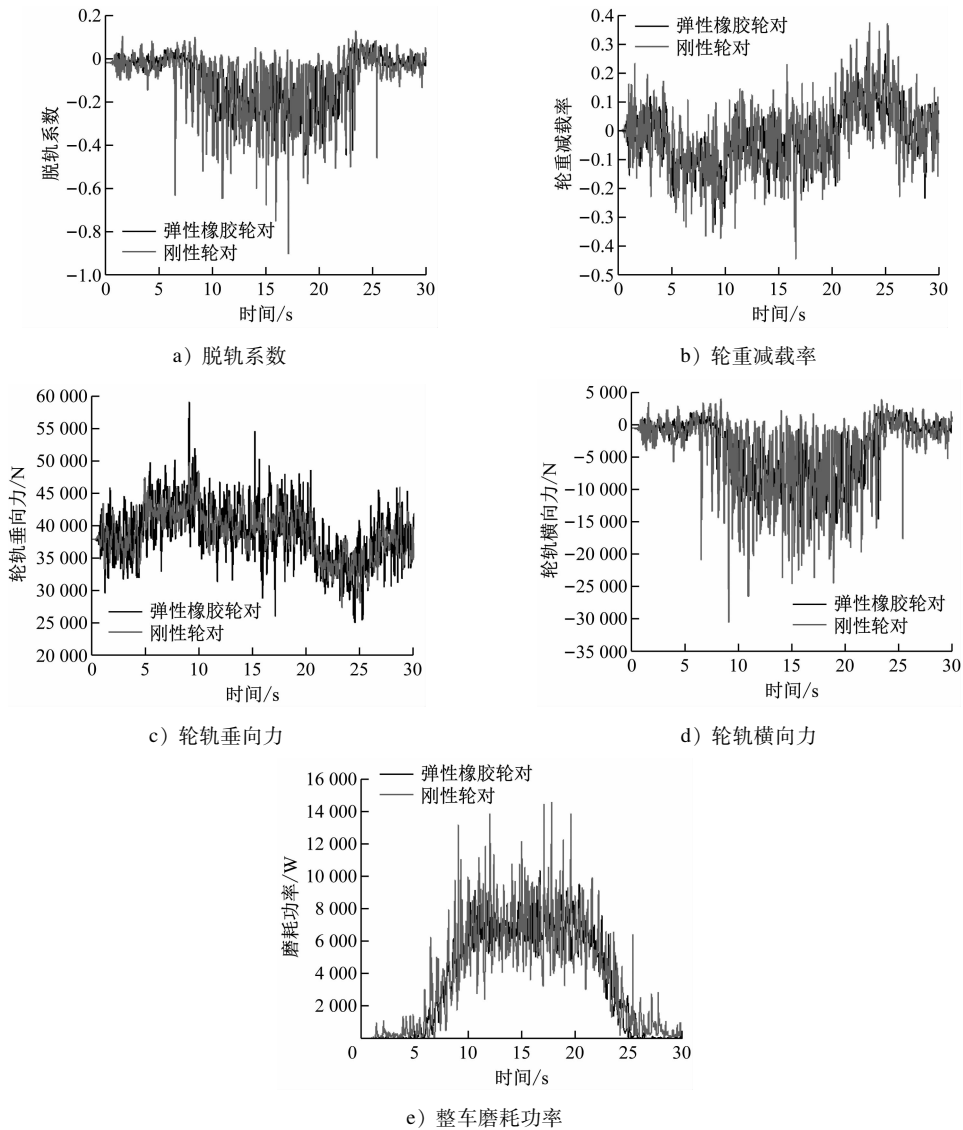
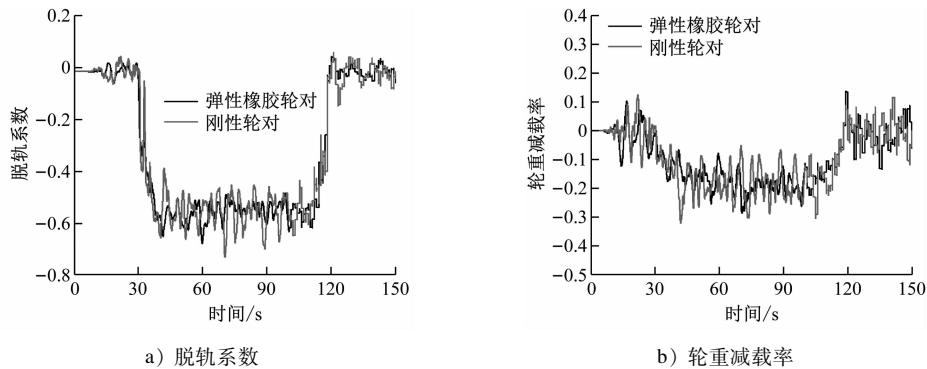


图 7 轻轨车辆的曲线通过性能-时间关系曲线 ($R=400\text{ m}$)
Fig. 7 LRV curve passing performance-time relationship curve ($R=400\text{ m}$)

功率均大于橡胶弹性轮对,而针对轮轨垂向力和轮重减载率,两者的差值则相对较小。

图 8 为两种轮对结构下轻轨车辆以 5 km/h 的运行速度通过 R 为 150 m 的小半径曲线时的轮轨

横向力、轮重减载率、脱轨系数及轮轨磨耗功率。由图 8 可见,两种轮对结构下轻轨车辆在低速运行时各参数均达到 GB 5599—1985 的要求,且在该运行速度下上述各参数幅值相差很小。



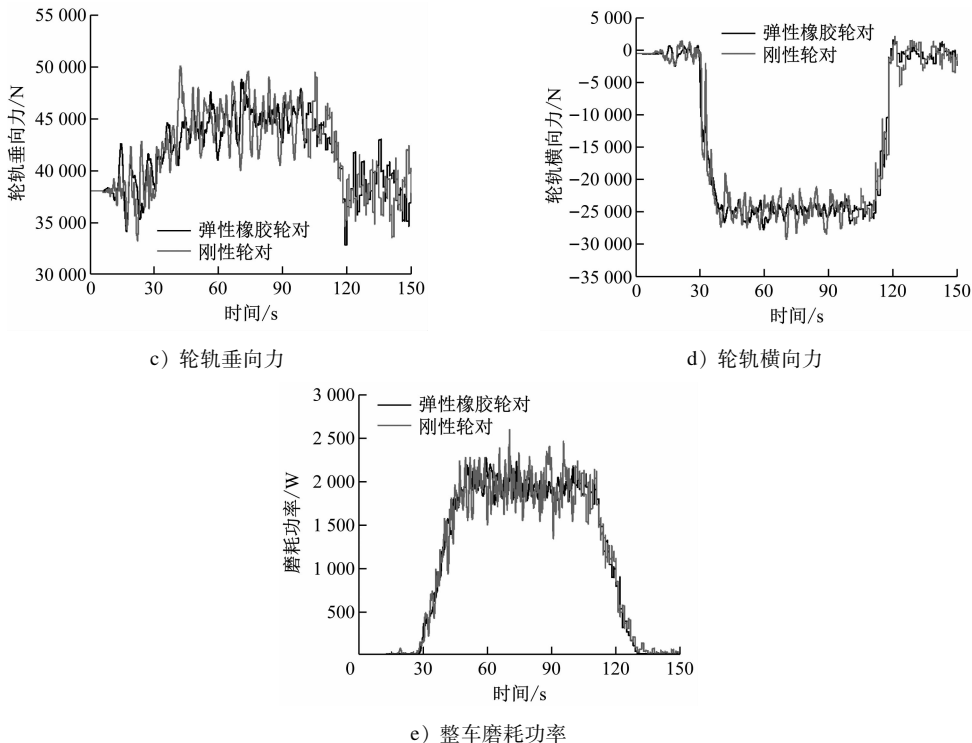


图8 轻轨车辆的曲线通过性能-时间关系曲线($R = 150 \text{ m}$)

Fig.8 LRV curve passing performance-time relationship curve ($R = 150 \text{ m}$)

3 结论

1) 采用橡胶弹性轮对后增加了轮箍与车轴之间的刚度,相当于减小了一系悬挂的水平刚度。因此相对于刚性轮对,橡胶弹性轮对非线性临界速度有一定的降低,但是仍然满足轻轨列车运行速度 80 km/h 的设计要求。

2) 从轻轨列车的平稳性指标来看,在相同的运行速度下,由于增加了车轴和轮箍之间的弹性,相当于增加了消减轮轨冲击的弹性元件,因此轮轨力传递到轮对、构架和车体的振动都得到一定程度的削减,提高了轻轨列车的舒适性。

3) 轻轨车辆以正常运行速度通过曲线线路时,两种轮对结构都满足 GB 5599—1985 的要求,但是弹性轮对对应的参数幅值低于刚性轮对;两种轮对通过曲线线路时的轮轨磨耗功率也有一定差异,弹性轮对要明显优于刚性轮对。

参考文献

- [1] 杨阳,丁军君,李芾,等.压剪复合型弹性车轮轮轨接触关系研究[J].铁道学报,2021(2):37.
YANG Yang, DING Junjun, LI Fu, et al. Study on wheel-rail contact relations of press-shear resilient wheel[J]. Journal of the

China Railway Society, 2021(2):37.

- [2] 宁烨,侯传伦.弹性车轮动态刚度测试及阻尼特性分析[J].轨道交通装备与技术,2021(1):26.
NING Ye, HOU Chuanlun. Dynamic stiffness test and analysis of damping characteristics for elastic wheel[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2021(1):26.
- [3] 吕元颖,张济民.基于有限元的有轨电车弹性车轮模态分析[J].城市轨道交通研究,2020(增刊1):104.
LYU Yuanying, ZHANG Jimin. Modal analysis of tramcar elastic wheel based on finite element method[J]. Urban Mass Transit, 2020(S1):104.
- [4] 张卓,田建辉,马国亮,等.弹性车轮的滚动接触特性研究[J].西安工业大学学报,2022(1):35.
ZHANG Zhuo, TIAN Jianhui, MA Guoliang, et al. Research on contact characteristics of rolling resilient wheel[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2022(1):35.
- [5] UIC. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior-safety-track fatigue-running behavior;UIC 518—2009[S]. Paris: UIC, 2009.
- [6] 国家标准局.铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范:GB/T 5599—1985[S].北京:中国标准出版社,1986.
National Bureau of Standards. Railway vehicles—Specification for evaluation the dynamic performance and accreditation test: GB/T 5599—1985[S]. Beijing: Standards Press of China, 1986.

(收稿日期:2020-04-22)