第 35 卷　第 1 期　　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　　Vol. 35　No. 1
2022 年 3 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Mar. 2022

铰接式转向架动车组车辆动力学性能研究

王俊锋，　张文朝，　李　跃，　赵　阳，　侯跃峰

(中车唐山机车车辆有限公司 转向架技术中心，河北 唐山　063000)

摘要：应用多体动力学软件建立某铰接式转向架动车组动力学模型，根据应用实际工况，对比分析了直线工况、曲线工况、小半径 S 曲线、通过三角坑等情况下铰接式转向架车辆动力学性能。研究结果表明，铰接式转向架车辆具有良好的曲线通过能力和优秀的线路扭曲适应能力，而且铰接式转向架轮对对应动力学指标与前后端独立转向架相差较小。直线工况下其运行稳定性满足标准，能够达到设计要求。

关键词：铰接式转向架；动车组；动力学；曲线通过性能；稳定性

中图分类号：U271.91　文献标志码：A　文章编号：2095-0373(2022)01-0092-08

近年来，随着经济水平快速提升，轨道交通行业也得到长足发展[1]，由于受到现场条件的限制，中小半径曲线、大坡度线路、车内噪声限制、车辆轻量化、车辆对环境振动影响等问题越来越突出[2]，对轨道车辆设计提出了更多的要求。铰接式转向架结构区别于传统转向架，在 2 节车体之间布置转向架，通过转向架直接连接前后车体。铰接式转向架具有噪音低、轮轨冲击小、曲线通过性能好、结构简单等优点[3]。

铰接式转向架车辆在国外已经有着几十年的发展历程[4]。最早采用铰接式转向架的高速列车为法国阿尔斯通的 TGV，在此基础上，其又推出了一款同样采用铰接式转向架的 AGV 高速动车组列车[5]。日本 953 系列新干线列车、E993 城际列车、50000 特快列车、E331 城际列车也都采用了铰接式转向架[6-7]。德国 ET425 系列动车组、瑞士 FILRT 电力动车组、荷兰 SPRINTER 列车均采用了铰接式转向架技术[8]。此后随着技术的不断发展，铰接式转向架在城轨车辆、动车组、货车等领域都得到长足发展[9]。目前中国研发的采用铰接式转向架的车辆主要有出口土耳其伊兹密尔铰接式轻轨[10]、马来西亚安邦线轻轨[11]、马其顿铰接式动车组[12]以及吉隆坡机场线铰接式车辆[13]。目前铰接式转向架车辆在我国市场还较少见，但铰接式转向架车辆在国际轨道交通领域具有十分广泛的应用前景。因此为开发“一带一路”沿线轨道交通市场，在契合“铁路走出去”的大背景下，开发一款专门适应国外市场、主要用于出口的铰接式动车组就显得尤为必要。

1　车辆结构

传统的轨道交通车辆通常采用 2 个转向架支撑车体，相邻车体之间通过钩缓装置连接。而铰接式转向架车辆相邻的车体共用一个转向架，只有前后首车采用独立转向架。本文铰接式动车组模型采用两动一拖编组形式，相邻车体采用铰接式转向架连接，铰接转向架为非动力转向架，采用转臂式轴箱，一系采用钢簧配合一系垂向减振器，二系悬挂包括：4 个空气弹簧、横向减振器、抗蛇行减振器、垂向减振器和抗侧滚扭杆，横向止挡布置在牵引装置两侧，牵引装置采用 Z 字型牵引杆。两端动车采用传统动力转向架，基本结构与铰接式转向架相同，只是空气弹簧数量为 2 个。传统动力转向架每个转向架安装 2 个电机。车辆前进方向为 1 车，依次为 2 车、3 车，车辆前进方向为构架 1、轮对 1，后面依次为 2、3、4。1、4 转向架为传统动力转向架，2、3 转向架为非动力铰接式转向架。车辆最高运行速度为 160 km/h。

收稿日期：2022-01-31　　责任编辑：车轩玉　　DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20220013

作者简介：王俊锋(1988—)，男，工程师，研究方向为轨道车辆转向架。E-mail：wangjunfeng198801@163.com

王俊锋，张文朝，李跃，等. 铰接式转向架动车组车辆动力学性能研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2022，35(1)：92-99.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2　动力学模型

2.1　铰接式动车组动力学模型

铰接式车辆由于结构特点，与传统车辆相比一般无法分解为单节车辆，必须以列车形式进行建模。采用 SIMPACK 软件进行动力学建模(如图 1 所示)，建立三编组铰接式动车组动力学模型。列车系统共包括 3 个车体、4 个构架、8 个轮对、16 个轴箱、4 个电机，共 35 个刚体，106 个自由度。每个动力转向架 2 个电机，通过力元连接在构架横梁上。车体、构架、轮对等部件均按照刚体考虑，忽略其弹性变形。各个部件之间通过弹簧阻尼力元连接，横向止挡、二系油压减振器采用非线性力元构建，一系悬挂、空簧、牵引拉杆采用线性力元构建。轮径 860 mm，车辆踏面选择 LM 踏面，钢轨外形选择 UIC60 廓形，轨底坡为1∶20。

图 1　车辆多体动力学模型

2.2　计算工况设置

车辆动力学性能评价主要由直线通过性能和曲线通过性能组成。按照现场要求计算不同工况下的车辆动力学性能指标，并对结果进行综合分析评价。具体工况如下：

(1)直线工况。长度 1 000 m，在美国 6 级轨道谱轨道激励下车辆以不同的速度(40～180 km/h，步长 20 km/h)通过线路分析其动力学性能。

(2)曲线工况。正线曲线半径 R=300 m，外轨加宽 5 mm，曲线外轨超高 h=120 mm，圆曲线长度 200 m，缓和曲线长度 L=100 m，曲线段轨道要差于直线段，因此曲线段轨道不平顺选用美国 5 级轨道谱，车辆以 73 km/h 速度通过曲线段。

(3)S 曲线工况。车场线小半径 S 曲线，曲线半径 150 m，无超高，缓和曲线长度 L=15 m，夹直线长度 20 m，圆曲线段长度 100 m，轨道不平顺选用美国 5 级轨道谱，车辆以 15 km/h 速度通过曲线段。

(4)扭曲线路工况。根据标准要求，通过设置三角坑来模拟轨道扭曲工况。在半径 150 m 曲线线路上，缓和曲线 60 m，超高 0.09 m，圆曲线 100 m，在外轨进缓和曲线位置设置了 20 mm 深度的凹坑。车辆通过速度为 5 km/h，不考虑轨道不平顺。

3　仿真结果分析

车辆动力学性能评价存在很多标准，运用比较广泛的有英国 EN 14363、铁路联盟 UIC 518、美国 AAR 系列、澳大利亚 AS 7509、中国 GB/T 5599—2019、TB 2360 等。本文的车辆主要用于出口，因此各项动力学指标以 UIC 518 为主，兼顾 GB/T 5599—2019。

3.1　稳定性分析

以 UIC 518 为例对车辆稳定性进行分析，采用简化测量方法的评价指标，针对构架轴箱上部的横向加速度进行测量。具体方法为：当车辆以最高速度在带有随机不平顺线路的直线或大半径曲线下运行时，判据采用构架横向振动加速度的 RMS 值在 100 m 范围内，以 10 m 为窗口的滑动平均值，加速度的最大值不得超过限制值：$[A_{bys}]_{\lim}=6-\frac{m_b}{10}$。其中，$[A_{bys}]_{\lim}$ 为构架横向加速度允许限度；s 表示进行滑动 RMS 处理；m_b 为转向架质量。铰接式转向架质量 7.1 t，端部独立转向架(含电机)质量 17 t，由计算可得构架横向加速度允许限度 $[A_{bys}]_{\lim}$ 为 5.3 m/s^2 和 4.3 m/s^2。

校核过程中，将车辆以 20～180 km/h 速度在 AAR6 的直线线路运行工况作为判定条件，得到各个构架横向加速度随速度的变化过程，见图 2。结果表明，新轮新轨条件下车辆构架横向加速度低于规定的限值，且仍有一定的安全裕度，所以动车组的运行稳

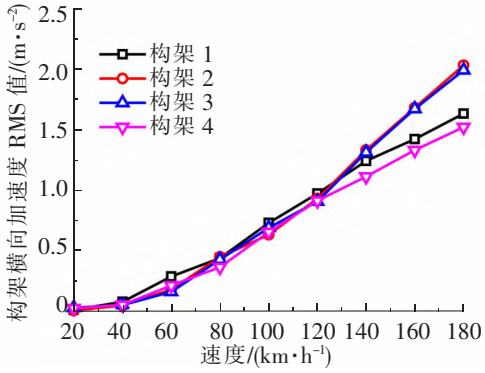


图 2　构架横向加速度 RMS 值

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

定性满足 160 km/h 的设计要求。

3.2 直线运行性能分析

根据 UIC 518—2009 标准规定,车辆运行平稳性可由横向和垂向加速度最大值及加速度均方根值来表示。车体最大横向和垂向加速度均不能超过$[A_{ymax},A_{zmax}]_{lim}=2.5\ m/s^2$,而横向加速度均方根值的限度为$[A_{yrms}]_{lim}=0.5\ m/s^2$,垂向加速度均方根值的限度为$[A_{zrms}]_{lim}=1\ m/s^2$。此外,根据车轴横向力之和标准规定,车辆运行平稳性的评定采用司机室座椅上方位置的平稳性指标来表示,新车平稳性需要达到优秀,即不超过 2.5。

车体横向最大加速度 A_y、垂向最大加速度 A_z、横向加速度均方根值 A_{yrms}、垂向加速度均方根值 A_{zrms}、横向平稳性指标 W_{zy} 和垂向平稳性指标 W_{zz} 分别绘于图 3～图 5 中。

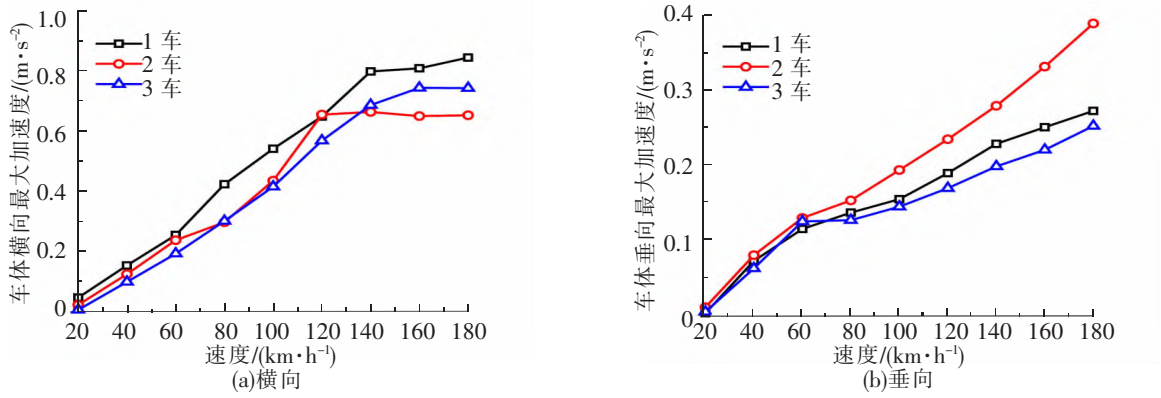


图 3 车体最大加速度

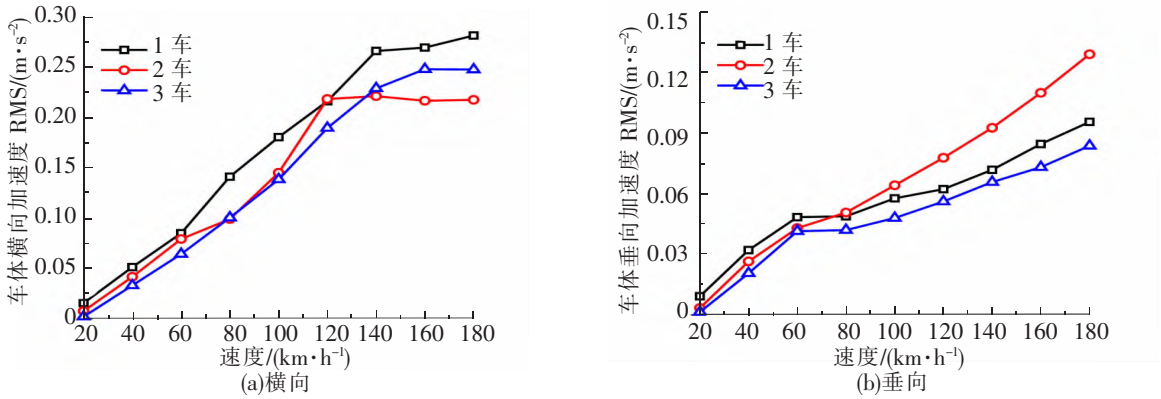


图 4 车体加速度均方根值

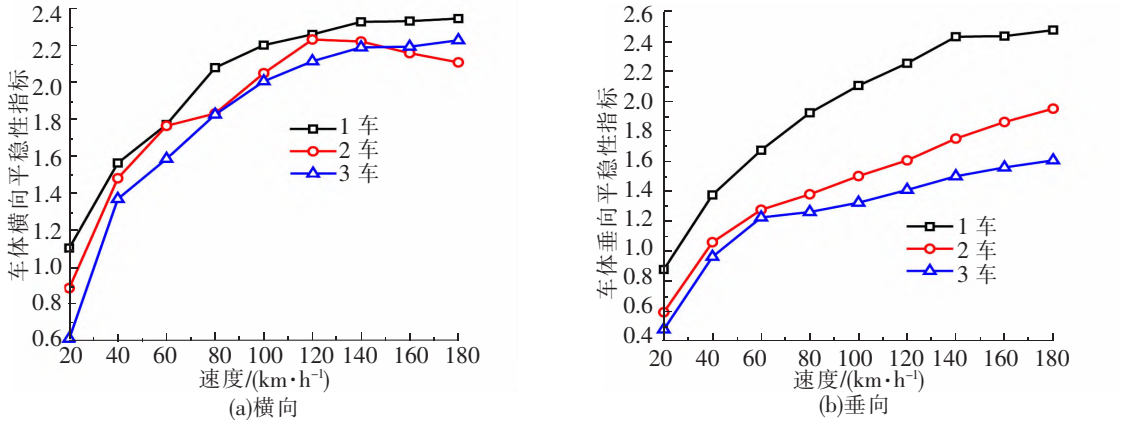


图 5 车体平稳性指标

结果表明,AAR6 线路条件下,在 180 km/h 速度以内的车体横向及垂向振动加速度最大值均低于 2.5 m/s^2,横向振动加速度均方根值低于 0.5 m/s^2,垂向振动加速度均方根值低于 1 m/s^2,满足 UIC 518—2009 中的要求。AAR6 线路条件下,各个速度下车体横向和垂向加速度均方根值均未超出 UIC

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

518—2009 中规定的限值。此外，AAR6 线路条件下，在 180 km/h 速度以内的车体横向及垂向平稳性指标均小于 2.5，达到 GB/T 5599—2019 规定的优秀标准。

3.3　曲线通过能力

3.3.1　标准要求

根据要求，该车辆安全性指标应符合 UIC 518—2009 和 GB/T 5599—2019 标准规定的相关要求，主要动力学性能应达到以下指标：

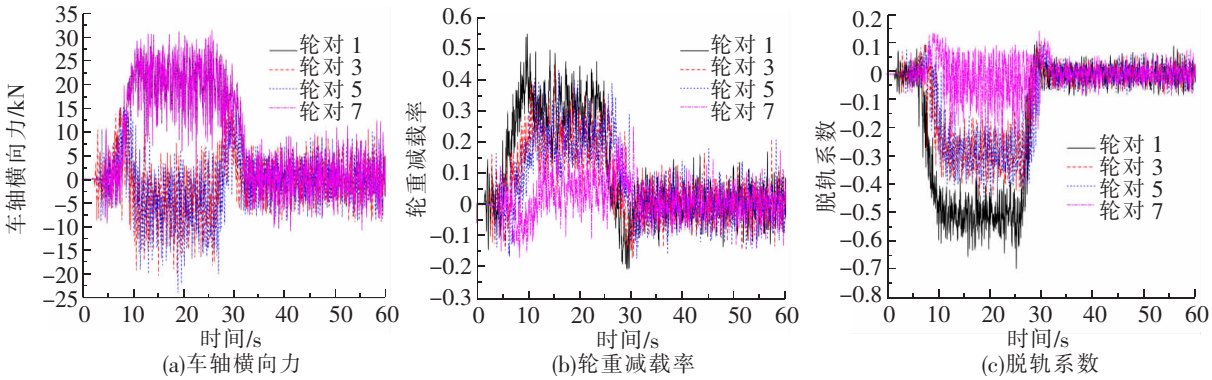
(1)导向力之和采用 UIC 518—2009 进行评定。$\left[\sum Y_{2m}\right]_{\lim}=\alpha\left(10+\frac{P_0}{3}\right)$。由计算可得导向力之和允许限度为 56.6 kN。

(2)脱轨系数采用 UIC 518—2009 进行评定。$[(Q/P)_{2m}]_{\lim}=0.8$。

(3)轮重减载率采用 GB/T 5599—2019 进行评定。第一限度：$\frac{\Delta P}{\overline{P}}\leqslant 0.65$，第二限度：$\frac{\Delta P}{\overline{P}}\leqslant 0.60$。

3.3.2　R300 曲线通过性能

R300 曲线车轴横向力计算结果如图 6(a)所示。结果表明，当车辆以 73 km/h 通过 R300 曲线时车轴横向力未超过标准限值。轮对减载侧轮重减载率和脱轨系数的计算结果绘于图 6(b)和图 6(c)中。在所计算工况中，各轮对脱轨系数和减载侧轮重减载率均未超过 UIC 518—2009 中规定的 0.8 限值，各轮对轮重减载率均未超过标准中规定的限值 0.6。

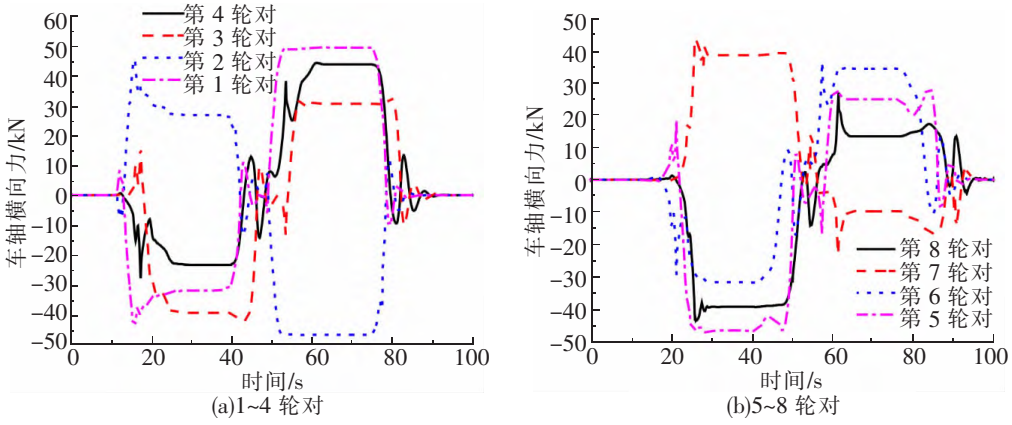


(a)车轴横向力　(b)轮重减载率　(c)脱轨系数

图 6　R300 曲线车辆通过性能

3.3.3　半径 150 的 S 曲线通过性能

图 7、图 8、图 9 分别为动车组以 15 km/h 通过 S 形小半径曲线时对应的车轴横向力、减载侧轮重减载率和脱轨系数。如图 7 所示，当动车组通过半径为 150 m 的 S 曲线时，各轮对的车轴横向力均小于 UIC 518—2009 中规定的限值。



(a)1~4 轮对　(b)5~8 轮对

图 7　S150 小半径曲线车轴横向力

各个轮对对应的轮重减载率的计算结果如图 8 所示。结果表明，在所计算的工况中，各轮对的轮重减载率均未超过标准规定的第一限值 0.6。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

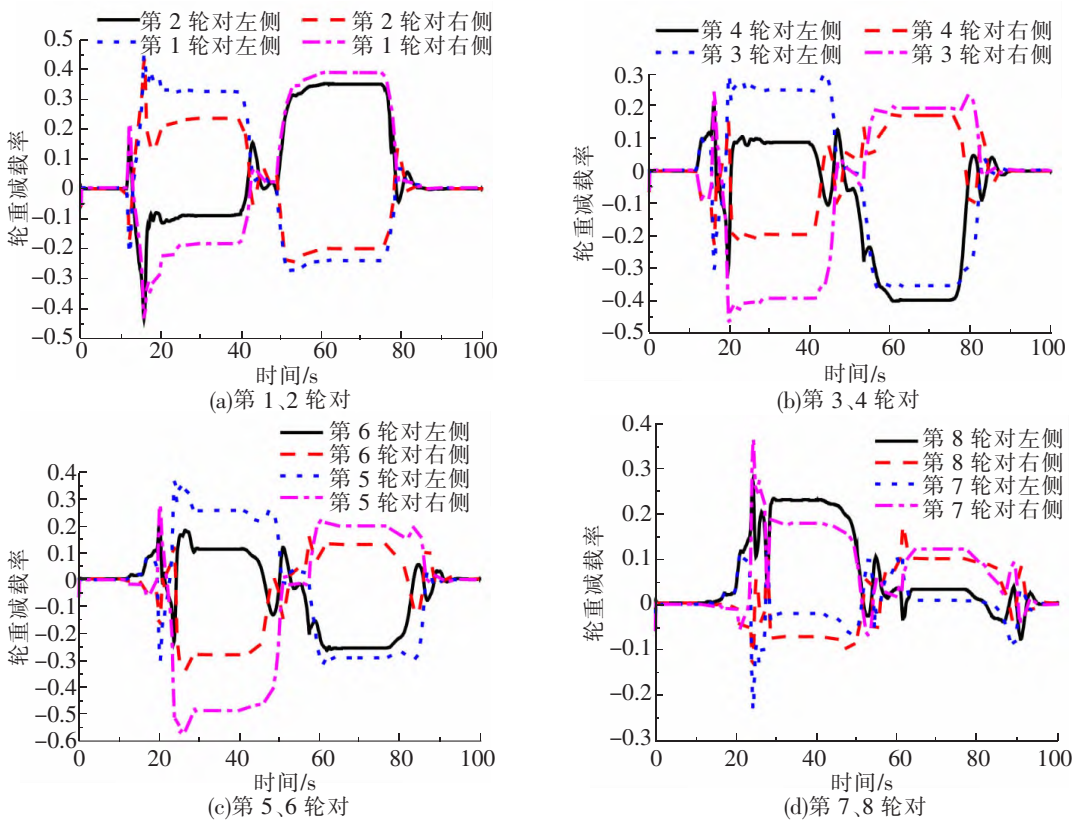


图 8　S150 小半径曲线轮重减载率

脱轨系数 Q/P 的计算结果绘于图 9 中。结果表明，在所计算的工况中，各轮对的脱轨系数均未超过 UIC 518—2009 **中规定的限值** 0.8。

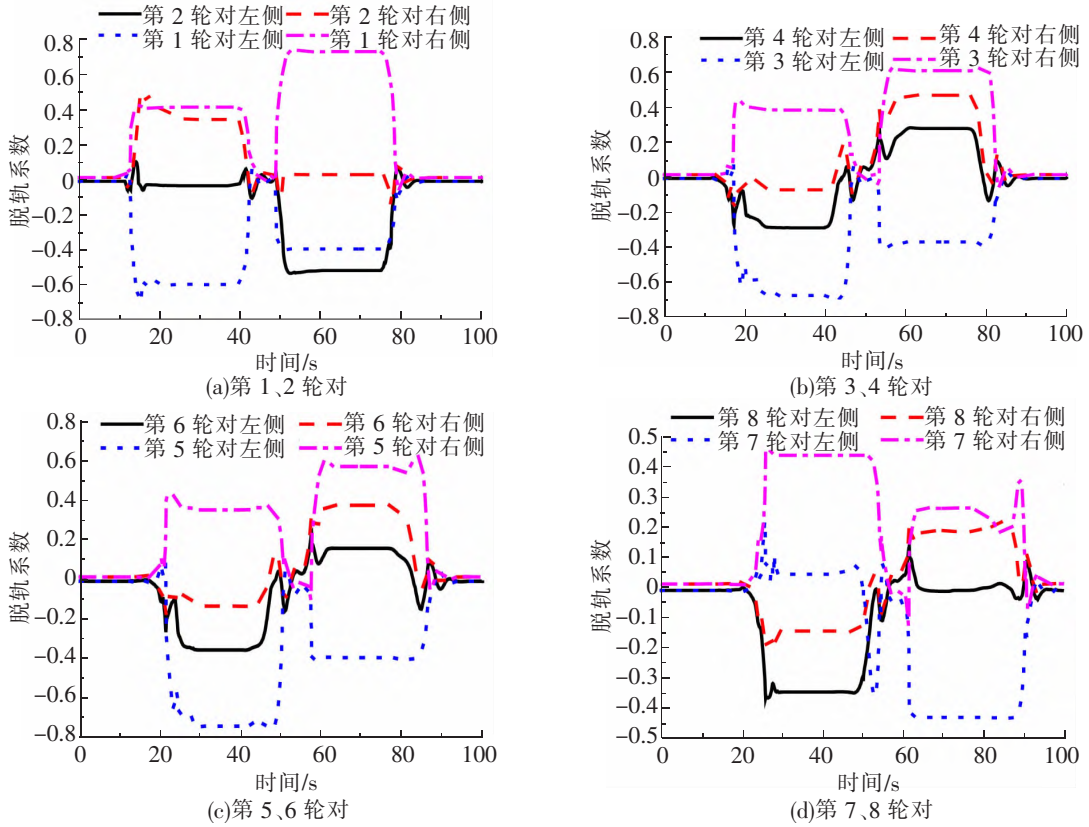


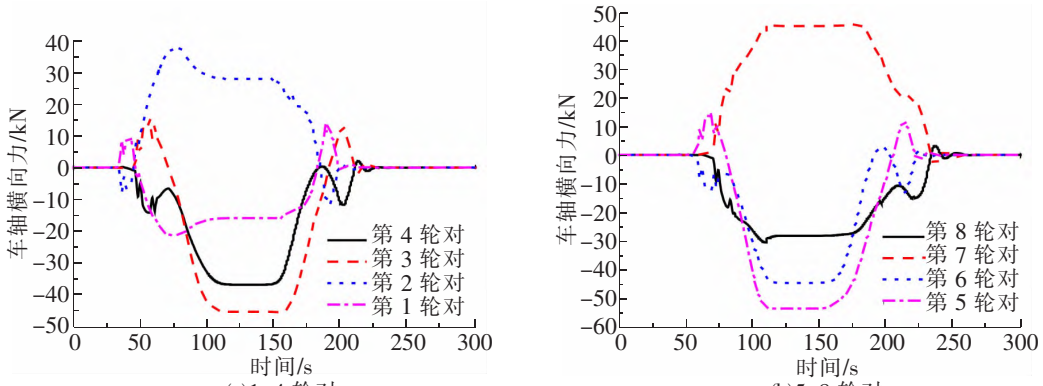
图 9　S150 小半径曲线脱轨系数

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

车辆以 15 km/h 速度通过 150 m 的 S 形小半径车场线时,在 AAR5 线路条件下,对各个轮对的车轴横向力、轮重减载率、脱轨系数指标进行计算发现,其各项指标均小于标准中规定的限值。总体看,铰接式转向架动车组能够安全通过 150 m 半径 S 形曲线。

3.4　车辆抗扭曲和抗倾覆能力

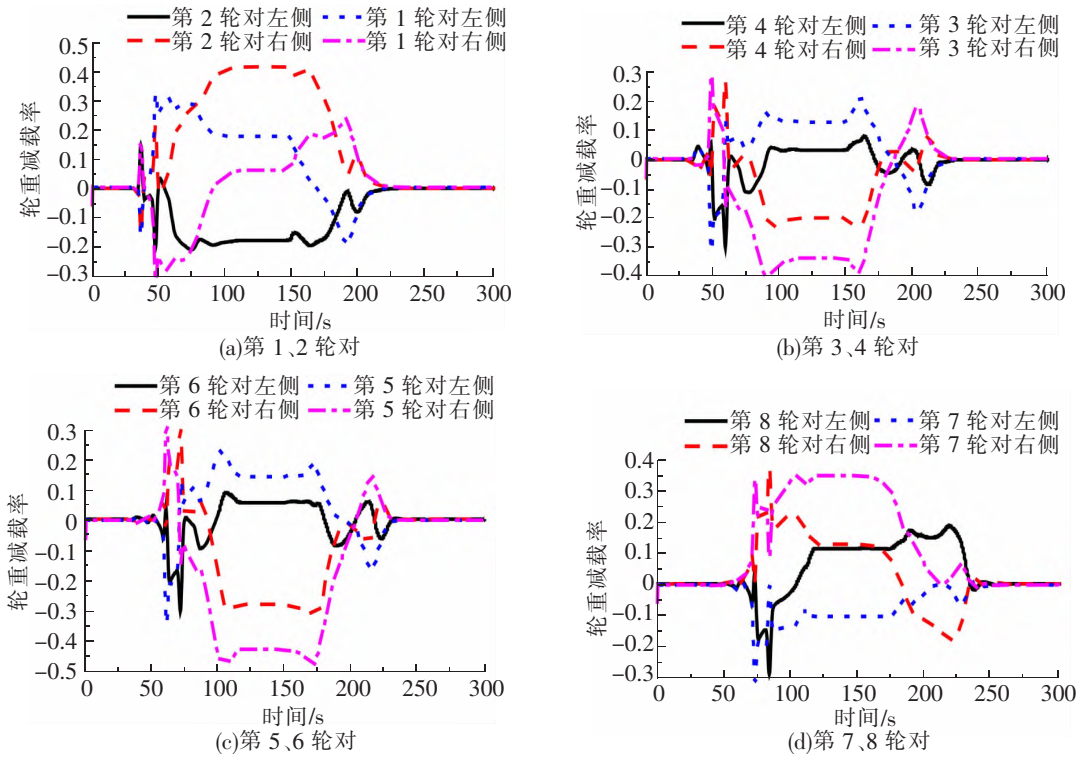
图 10、图 11、图 12 为动车组以 5 km/h 速度通过施加三角坑的 R150 曲线时对应的各个轮对车轴横向力、轮重减载率和脱轨系数。4 个转向架对应车轴横向力计算结果如图 10 所示,其中高轨代表在过曲线时的外侧轮,低轨代表在过曲线时的内侧轮。结果没有发现高于 56.6 kN 的峰值,计算结果满足 UIC 518 标准的要求。



(a)1~4 轮对　　(b)5~8 轮对

图 10　R150 三角坑工况车轴横向力

各个轮对对应减载侧轮重减载率计算结果如图 11 所示,其中左侧轮对通过曲线的外侧高轨,右侧轮对通过曲线内侧低轨。如图 11 所示,结果没有发现高于 0.6 的峰值,计算结果满足 UIC 518 标准的要求。各个轮对对应脱轨系数计算结果如图 12 所示,也均未超标。

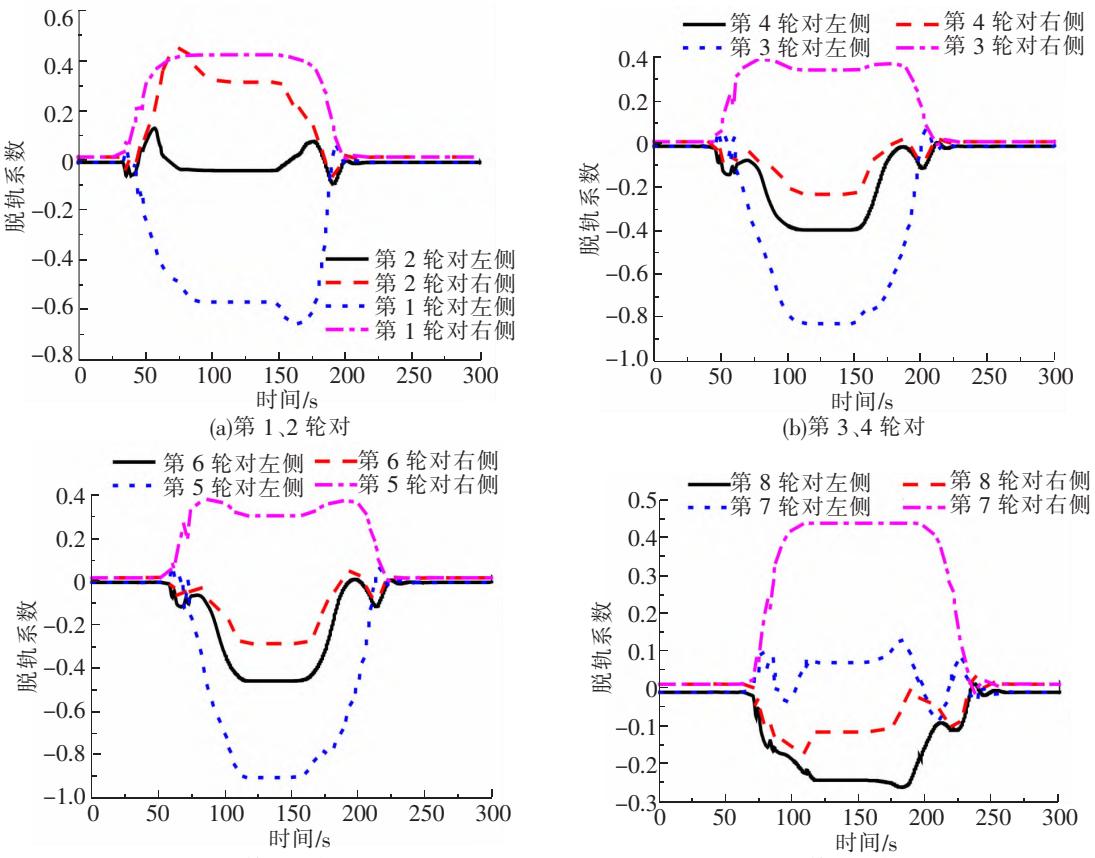


(a)第 1、2 轮对　　(b)第 3、4 轮对

(c)第 5、6 轮对　　(d)第 7、8 轮对

图 11　R150 三角坑工况轮重减载率

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)第 1、2 轮对 (b)第 3、4 轮对 (c)第 5、6 轮对 (d)第 7、8 轮对

图 12 R150 三角坑工况脱轨系数

如仿真所示结果,铰接式转向架车辆具有良好的抗侧滚、抗线路扭曲能力,在通过施加三角坑的小半径曲线时各项动力学指标均未超过标准的要求。

4 结论

介绍了铰接式转向架动车组,并进一步研究了极限工况下其车辆动力学性能,分析结果表明,铰接式转向架车辆具有较好的曲线通过性能,在正线曲线和小半径 S 曲线工况其脱轨系数、轮重减载率、车轴横向力等指标都满足标准要求。铰接式转向架车辆具有较高的适应线路扭曲能力,在通过三角坑工况时,铰接式转向架车辆轮对受到的轮轨冲击远小于标准要求。

通过分析各个轮对对应曲线通过性能发现,与传统转向架不同,铰接式转向架在作为前车后转向架同时也是后车前转向架,因此铰接式转向架轮对对应的车轴横向力、脱轨系数等数值与前部独立转向架轮对幅值相差很小,这个是值得注意的。综上所述,铰接式转向架车辆具有曲线通过性能好、轮轨作用力小、抗线路扭曲能力强、运行平稳等特点,充分说明铰接式转向架车辆在技术上已经成熟,是一种适应轨道交通需求的新型车辆。

参 考 文 献

[1]刘鹏飞,曹云强,张凯龙,等. 不均衡闸瓦压力下重载机车曲线通过动态行为[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2020,33(2):57-63.

[2]曹伟涛. 高速铁路环境下基于 RSSI 的距离估计算法优化[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2019,32(3):77-81.

[3]汪群生,曾京,董浩. 基于 SIMPACK 铰接式列车的动力学性能分析[J]. 城市轨道交通研究,2015,18(1):32-34.

[4]沈继强. 铰接式转向架在城轨车辆中的应用及其性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.

[5]齐斌. ZLA080 型铰接式轻轨车辆转向架研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.

[6]邓睿康. 铰接式城轨车辆动力学性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[7]邓睿康，黄运华，冯帅,等. 铰接式转向架的特点及其发展[J]. 现代城市轨道交通，2013(6)：21-23,27.
[8]谭皓尹. 铰接式动车组动力学特性研究[D]. 成都:西南交通大学，2017.
[9]范振合，杜鹏成. 铰接式铁路货车的开发[J]. 中国铁路，2016(3)：54-56.
[10]陈喜红，陶功安，颜志军,等. 土耳其 80 km/h 轻轨车辆 ZLA080 型铰接式转向架的研制[J]. 电力机车与城轨车辆，2012，35(6)：1-6.
[11]李骏，曹增明，刘永强. 马来西亚安邦延伸线项目轻轨车辆概述[J]. 电力机车与城轨车辆，2017，40(3)：23-27.
[12]张青松，陈喜红，李冠军,等. 四空气弹簧铰接式动车组转向架[J]. 电力机车与城轨车辆，2019，42(3)：31-34,88.
[13]李稳，陆海英，米彩盈,等. 一种低地板铰接动车组转向架及构架的结构设计与强度分析[J]. 城市轨道交通研究，2019，22(4)：18-22.

Study on the Dynamic Performance of Articulated Bogie EMU Vehicle

Wang Junfeng，　Zhang Wenchao，　Li Yue，　Zhao Yang，　Hou Yuefeng

(Bogie Technical Center，CRRC Tangshan Co. Ltd.，Tangshan 063000 ，China)

Abstract：An articulated bogie EMU vehicle dynamic model was established，and in the analysis of curving performance，stability indices，ride index，the difference of dynamic performance of articulated bogie vehicle was analyzed. The results show that articulated bogie vehicles have better curve passing ability and excellent line twist adaptability. Corresponding dynamic indicators of the articulated bogie are relatively small compared to the front and rear independent bogies. Its running stability is slightly worse under straight linear conditions，but still meet the design requirements.

Key words：articulated bogie；EMU；dynamic performance；curving performance；stability

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net