

不同抗蛇行减振器对动车组蛇行失稳的影响研究

吴会超, 霍文彪, 卢 权, 石俊杰

(中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 063035)

摘 要:以 CRH3 型动车组为研究对象, 研究了不同抗蛇行减振器对动车组一次蛇行和二次蛇行的影响规律。分析结果表明: T60 抗蛇行减振器可以有效抑制车体的一次蛇行运动, 但是对转向架的二次蛇行运动抑制能力不足; 相反 T70 抗蛇行减振器可以大大提高转向架的二次蛇行运动稳定性, 而对车体的一次蛇行失稳抑制能力不足。研究结果表明, 理想的抗蛇行减振器应具备低频下体现小刚度和小阻尼特性, 而高频下体现大刚度和大阻尼特性, 从而保证 CRH3 型动车组可以适应不同线路条件、不同磨耗踏面的轮轨匹配要求, 避免转向架失稳报警和晃车的发生。

关键词: 抗蛇行减振器; 一次蛇行运动; 二次蛇行运动; 动态刚度; 动态阻尼

中图分类号: U292.91⁺4; U270.1⁺1

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.05.101

Influence Study of Different Anti-Yaw Dampers on EMUs Hunting Instability

WU Huichao, HUO Wenbiao, LU Quan, SHI Junjie

(CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063035, China)

Abstract: The influence of different anti-yaw dampers on primary and secondary hunting of CRH3 EMUs was studied. The results showed that T60 anti-yaw damper could restrain carbody primary hunting effectively, but could not restrain bogie secondary hunting. On the contrary, T70 anti-yaw damper could improve bogie secondary hunting immensely, but could not restrain carbody primary hunting. This research result showed that the perfect anti-yaw damper should show smaller stiffness and damping characteristic in low-frequency condition, and bigger stiffness and damping characteristic in high-frequency condition, which would ensure that CRH3 EMUs could adapt to different railway lines, satisfy wheel/rail matching requirement of different worn profile tread and avoid bogie instability alarm or carbody hunting.

Keywords: anti-yaw damper; primary hunting; secondary hunting; dynamic stiffness; dynamic damping

0 引言

在轮轨匹配不良情况下, 高速运行的动车组转向架容易出现一种周期性的横向运动, 即蛇行运动。这种持续、大幅度的蛇行运动会导致轮缘不断地撞击钢轨, 增大车轮脱轨的危险性, 从而威胁到动车组的运行安全性^[1]。蛇行稳定性是车辆系统动力学非常重要的研究领域之一, 也是决定动车组能否高速安全运行

的关键因素^[2]。为了提高转向架的蛇行稳定性, 主要采取在构架和车体之间安装抗蛇行减振器的措施, 通过抗蛇行减振器提供的刚度和阻尼, 有效抑制动车组的蛇行失稳运动, 从而保证车辆的安全运行。蛇行失稳运动通常可以分为两类: 第一类称为一次蛇行运动, 即晃车; 第二类称为二次蛇行运动, 即转向架失稳报警。目前, 高铁线路上运营的 CRH3 型动车组主要包括: CRH3C、CRH380BL 以及 CRH380B。其中, CRH3C 型动车组采用 T60 抗蛇行减振器, 这种抗蛇行减振器在轮轨等效锥度大于 0.35 情况下, 容易导致转向

架蛇行失稳而报警, 即二次蛇行运动。CRH380BL 和 CRH380B 动车组采用 T70 抗蛇行减振器, 这种抗蛇行减振器在轮轨匹配等效锥度小于 0.1 的情况下, 容易出现晃车现象, 即一次蛇行运动。由于这 2 种抗蛇行减振器实际结构不同, 从而表现出不同的动态刚度和阻尼特性, 因此非常有必要研究和验证这 2 种抗蛇行减振器对蛇行失稳特征的影响规律。针对抗蛇行减振器的研究, 国内外学者已经进行了很多研究。如曾京^[3]、马卫华^[4]、杨亮亮^[5]研究了抗蛇行减振器橡胶接头刚度对临界速度的影响, 研究结果表明抗蛇行减振器橡胶接头会明显影响车辆系统稳定性。张海^[6]研究了不同油液流动类型的抗蛇行减振器特性。侯建文^[7]研究了抗蛇行减振器横向安装位置对机车动力学性能的影响。虽然许多学者都对抗蛇行减振器进行了相关研究, 但是没有人分析抗蛇行减振器的动态刚度和动态阻尼对动车组蛇行稳定性的影响。

本文通过仿真和试验的手段, 重点研究了 2 种不同抗蛇行减振器的静态和动态特性差异, 并讨论了它们的动态特性对动车组蛇行失稳运动的影响规律。

1 抗蛇行减振器特性分析

1.1 不同抗蛇行减振器静态特性对比分析

当抗蛇行减振器作低频大振幅运动时, 它体现出来的阻尼特性称为静态阻尼特性。图 1 是 2 个典型的抗蛇行减振器的静态特性曲线, 其中, T70 抗蛇行减振器卸荷点的卸荷力为 13 kN, 卸荷速度为 0.02 m/s, T60 抗蛇行减振器卸荷点的卸荷力为 10 kN, 卸荷速度为 0.03 m/s。这 2 种抗蛇行减振器的名义阻尼不同, 分别为 435 kN·s/m 和 325 kN·s/m, 两者相差 30% 左右。图 1 结果表明 T70 抗蛇行减振器卸荷点位置的卸荷力比较大, 从而导致整车的回转阻力增加, 能够提高转向架的蛇行稳定性。相反, T60 抗蛇行减振器卸荷点位置的卸荷力较小, 回转阻力不足, 将导致抑制抑制转向架蛇行失稳的能力降低。

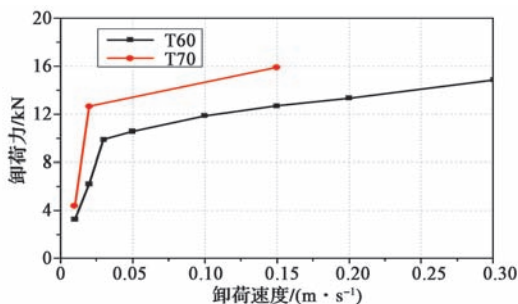


图1 抗蛇行减振器静态特性曲线

1.2 不同抗蛇行减振器动态特性分析

为了分析 T70 和 T60 抗蛇行减振器的动态特性, 对这 2 种抗蛇行减振器进行台架试验, 测试幅值 0.5~2.0 mm, 测试频率 1~10 Hz。根据线路测试的结果, CRH3 型动车组抗蛇行减振器的工作频率一般在 1~10 Hz

之间, 动车组在新轮状态时对应抗蛇行减振器的低工作频率, 车轮磨耗状态时对应抗蛇行减振器的高工作频率。根据线路跟踪试验数据分析, CRH3 动车组抗蛇行减振器的工作位移低频在 ± 1 mm 左右, 而高频在 ± 0.5 mm 左右。其中 T60 抗蛇行减振器的动态测试结果如图 2 和图 3 所示, 低频 (1 Hz 左右) 对应的动态刚度为 4 MN/m, 动态阻尼为 180 kN·s/m; 高频 (6 Hz 左右) 对应的动态刚度为 7 MN/m, 动态阻尼为 236 kN·s/m。T70 抗蛇行减振器的动态测试结果如图 4 和图 5 所示, 低频 (1 Hz 左右) 对应的动态刚度为 8 MN/m, 动态阻尼为 230 kN·s/m; 高频 (6 Hz 左右) 对应的动态刚度为 17 MN/m, 动态阻尼为 415 kN·s/m。从测试结果中可以看出, T70 抗蛇行减振器的动态刚度和动态阻尼大于 T60 抗蛇行减振器。

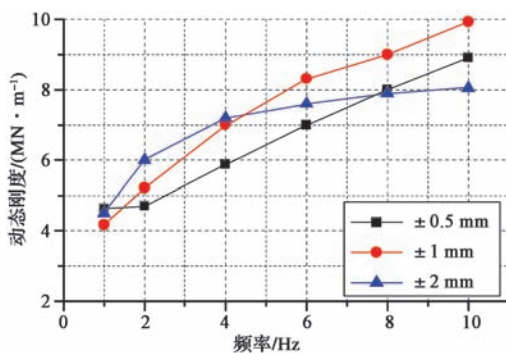


图2 T60 抗蛇行减振器动态刚度特性

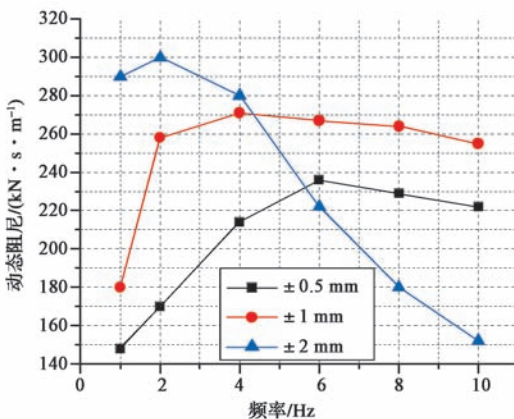


图3 T60 抗蛇行减振器动态阻尼特性

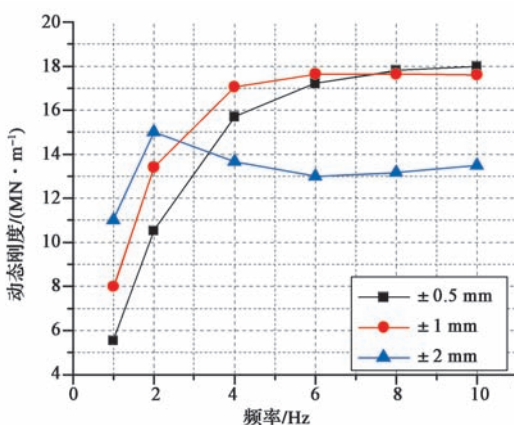


图4 T70 抗蛇行减振器动态刚度特性

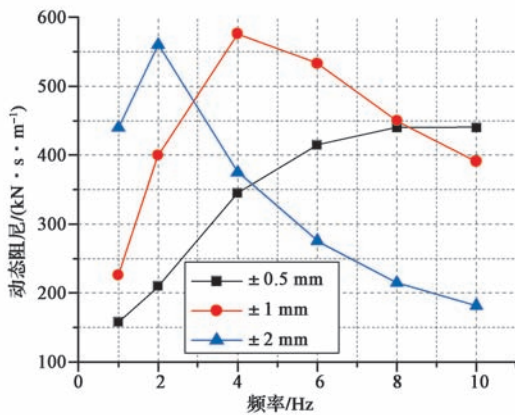


图5 T70 抗蛇行减振器动态阻尼特性

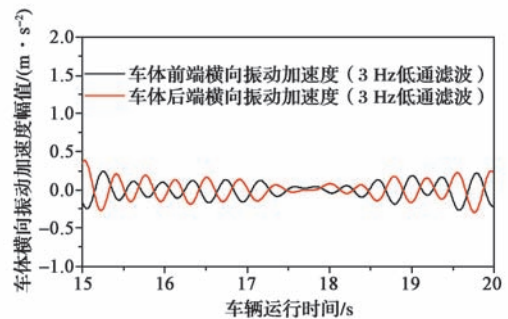


图8 T60 影响车体横向振动的时程曲线

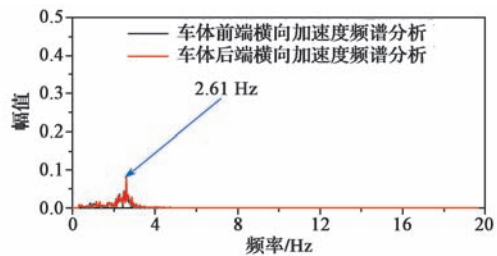


图9 T60 影响车体横向振动的频谱特性

2 蛇行失稳仿真分析

为了深入研究不同抗蛇行减振器对蛇行失稳运动的抑制效果，本章建立了CRH3动车组的单车动力学模型。通过动力学仿真，重点研究了不同抗蛇行减振器对低频晃车和转向架失稳报警的影响规律。

2.1 车体低频晃动分析

采用实测的车轮踏面外形和标准钢轨匹配，通过在正常误差范围内调整轨道几何参数，得到比新踏面与标准钢轨稍低的等效锥度。轮对横移2 mm范围内等效锥度小于0.1，轮对横移3 mm时等效锥度约0.15。在这种工况下，若抗蛇行减振器参数不合适，会引起车辆低频晃动，主要体现为车体横向3 Hz以下的振动。针对CRH3动车组每个转向架每侧安装2个T60抗蛇行减振器、2个T70抗蛇行减振器的设计方案，进行低等效锥度轮轨匹配下的横向晃动性能分析，仿真结果如图6~图9所示。

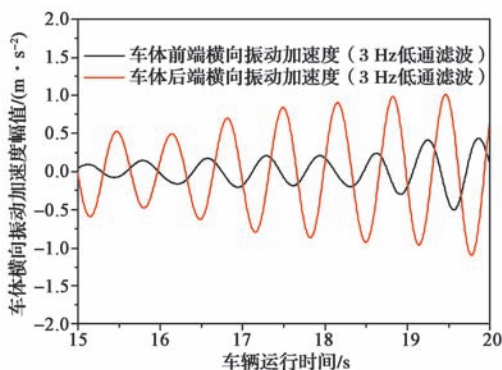


图6 T70 影响车体横向振动的时程曲线

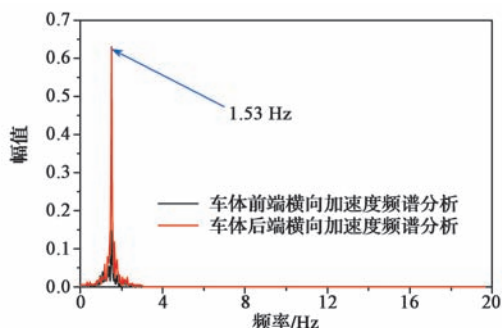


图7 T70 影响车体横向振动的频谱特性

从仿真结果可以看出，采用2个T60抗蛇行减振器并联方案，车体横向加速度幅值比较小，而且没有明显的谐波成分，振动主频在2.6 Hz左右。而采用2个T70抗蛇行减振器并联方案，发现车体横向加速度有明显的谐波振动，主频在1.53 Hz左右，加速度幅值较大。这表明当采用T60抗蛇行减振器方案时，由于抗蛇行减振器动态刚度降低，车体晃动频率向高频方向发展，车体晃动的能量降低，从而可以有效抑制晃车运动。而采用T70抗蛇行减振器方案时，由于动态刚度比较大，不能有效降低车体的晃动能量。

2.2 转向架蛇行失稳分析

转向架蛇行运动稳定性是车辆动力学最重要的评价指标之一，当转向架蛇行运动稳定性不足时构架横向加速度将大大增加。本节重点分析不同抗蛇行减振器对转向架蛇行稳定性的影响，尤其是对构架横向加速度、车体横向平稳性等指标的敏感程度。详细结果如图10、图11所示。

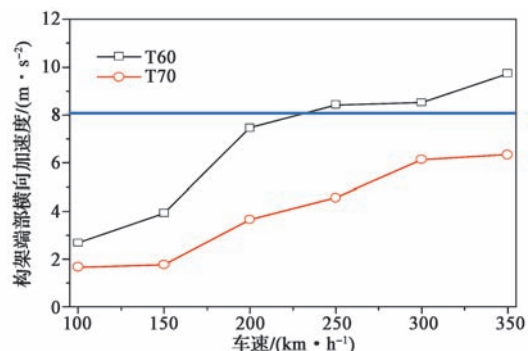


图10 构架横向加速度

从图10、图11中可以看出，安装T60抗蛇行减振器的转向架构架横向加速度要远远大于安装T70抗蛇行减振器的结果。这表明使用T60抗蛇行减振器在300 km/h速度运行时容易出现构架横向加速度报警，

使用 T70 抗蛇行减振器在 300 km/h 运行时不容易出现构架横向加速度报警。当动车组以 300 km/h 的速度运行时, 由于采用 T60 抗蛇行减振器的转向架出现了失稳, 振动传递到车体上, 从而导致车体的横向平稳性指标相对于采用 T70 抗蛇行减振器变大。

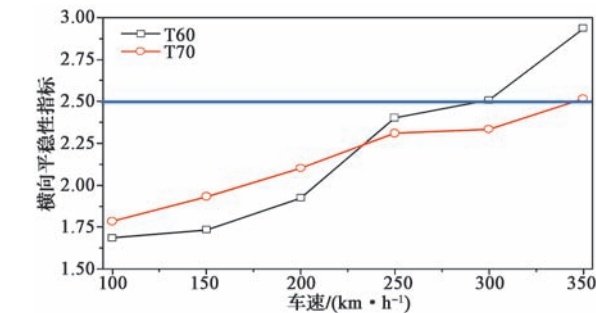


图 11 横向平稳性指标

3 蛇行失稳试验验证

通过仿真分析研究了不同抗蛇行减振器对蛇行失稳运动的影响规律, 为了进一步说明上述仿真规律的可靠性, 又进行了线路试验对比验证。

3.1 车体低频晃动试验对比分析

针对小锥度工况下的车体横向晃动问题, 在武广线对 CRH3C 动车组安装不同抗蛇行减振器情况下的车辆平稳性和振动特性进行了测试, 测试结果如图 12~图 15 所示。从图 12~图 15 中可以看出, 当 CRH3C 动车组装用 T60 抗蛇行减振器时, C08 车未出现车体横

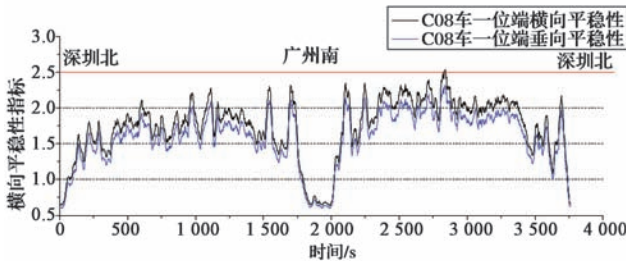


图 12 采用 T70 抗蛇行减振器的车体一位端横向平稳性

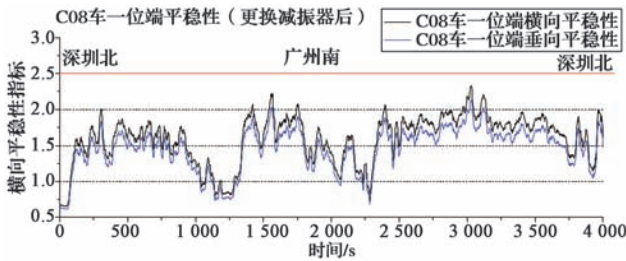


图 13 采用 T60 抗蛇行减振器的车体一位端横向平稳性

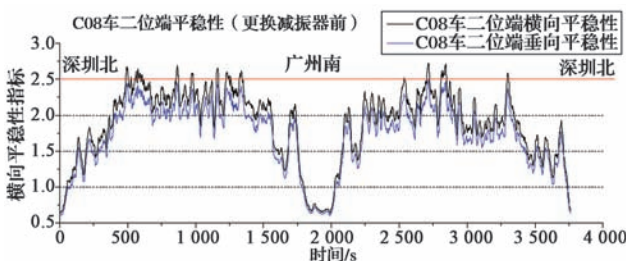


图 14 采用 T70 抗蛇行减振器的车体二位端横向平稳性

向晃动, 车体横向平稳性指标一位端和二位端大部分都处于 2.0 左右。而当装用 T70 抗蛇行减振器时, C08 车出现了车体横向晃动, 车体横向平稳性指标最大值接近 2.5。以上试验结果表明, T60 抗蛇行减振器对抑制车体晃动有很好的效果, 而 T70 抗蛇行减振器的效果不明显。

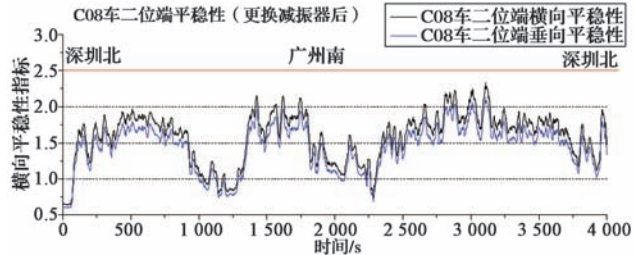


图 15 采用 T60 抗蛇行减振器的车体二位端横向平稳性

3.2 转向架蛇行失稳试验对比分析

不同抗蛇行减振器对大锥度工况下构架横向加速度的影响规律试验验证结果如图 16、图 17 所示。可以看出, 相同线路上装用 T60 抗蛇行减振器的转向架构架出现了谐波振动, 并且幅值接近甚至超过了 0.8g, 而装用 T70 抗蛇行减振器后, 转向架构架出现的谐波振动现象消失了, 并且振动加速度幅值小于 0.2g。上述试验结果表明, 换装 T70 抗蛇行减振器能够有效抑制转向架的失稳运动, 降低构架横向加速度的幅值, 且波形衰减为非谐波随机振动。

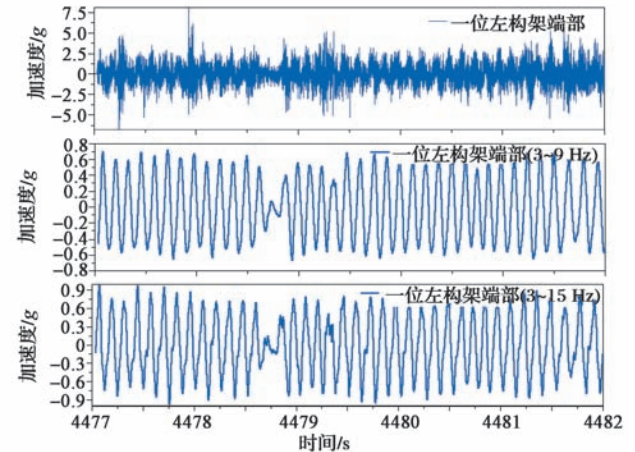


图 16 采用 T60 抗蛇行减振器的构架横向加速度

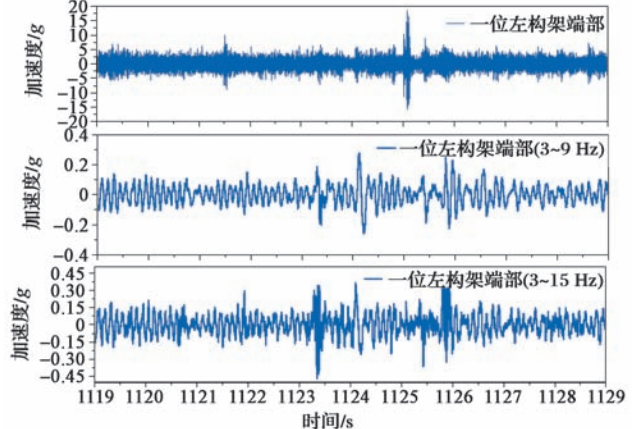


图 17 采用 T70 抗蛇行减振器的构架横向加速度

4 结语

通过数值仿真和试验验证得出的结论如下:

① T70 抗蛇行减振器的名义阻尼为 435 kN·s/m, 而 T60 抗蛇行减振器的名义阻尼为 325 kN·s/m, 两者相差 30% 左右, 所以 T70 抗蛇行减振器可以大大提高抑制转向架蛇行失稳的能力。

② T60 和 T70 抗蛇行减振器在低频和高频激振下表现出不同的动态刚度和动态阻尼特性。T70 抗蛇行减振器的动态刚度和动态阻尼无论是对应低频激振还是高频激振都大于 T60 抗蛇行减振器。

③ T60 抗蛇行减振器低频下的小动态刚度和阻尼特性, 能够降低车体晃动的能量, 从而有效抑制晃车运动。而 T70 抗蛇行减振器高频激振下动态刚度和动态阻尼比较大, 有利于抑制转向架的失稳运动, 从而降低构架横向加速度的振动幅值。

④理想的抗蛇行减振器应具备低频下体现小刚度和小阻尼特性, 而高频下体现大刚度和大阻尼特性, 从而保证 CRH3C 动车组可以适应不同线路条件、不同磨耗踏面的轮轨匹配要求, 避免转向架失稳报警和晃车的发生。

参考文献:

- [1] 王福天. 车辆系统动力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
- [2] 罗仁, 曾京. 列车系统蛇行运动稳定性分析及其与单车模型比较 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 184-188.
- [3] 曾京, 郭平波. 减振器橡胶节点刚度对铁道客车系统临界速度的影响 [J]. 中国铁道科学, 2008, 29(2): 94-98.
- [4] 马卫华, 王自力, 罗世辉. 减振器安装刚度对径向转向架机车横向动力学性能的影响 [J]. 铁道机车车辆, 2005, 25(4): 10-13.
- [5] 杨亮亮, 罗世辉, 傅茂海, 等. 抗蛇行减振器安装刚度对弹性构架车辆动力学性能影响 [J]. 机车电传动, 2012(6): 15-18.
- [6] 张海, 王成国, 刘金朝, 等. 不同油液流动类型的抗蛇行减振器特性对比研究 [J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(2): 10-15.
- [7] 侯建文, 刘建新, 陈迪来, 等. 抗蛇行减振器横向安装位置对机车动力学性能的影响 [J]. 机车电传动, 2013(4): 32-35.

作者简介: 吴会超 (1980-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事车辆系统动力学及其疲劳强度方面的研究。

(上接第 25 页)

- [3] 李伟, 马志文, 蔡华斌, 等. 无二次滤波环节的单相四象限整流器输入电流控制研究 [J]. 铁道学报, 2014(5): 28-33.
- [4] 李波. 四象限变流器双闭环控制系统的计算机仿真 [J]. 机车电传动, 2000 (3): 16-19.
- [5] 邹仁. 四象限变流器瞬态电流控制的仿真研究 [J]. 机车电传动, 2003 (6): 17-20.
- [6] Wu Rusong. Analysis of an AC to DC Voltage Source Converter Using PWM with Phase and Amplitude Control [J]. IEEE Transaction on Industry Application, 1991 (2): 355-364.
- [7] Green A W, Boys J T. Hysteresis Current-forced Three-Phase Voltage-sourced Reversible Rectifier [J]. Electric Power Applications, IEE Proceedings, 1989, 136(3): 113-120.
- [8] 代云中, 许建平, 杨平, 等. 基于预测电流控制的四象限变流器研究 [J]. 机车电传动, 2010(6): 16-19.
- [9] 盛彩飞, 高吉磊, 林飞, 等. 单相 4 象限变流器的预测电流控制算法研究 [J]. 电气传动, 2009, 39(12): 34-36.
- [10] 李伟. 基于坐标变换的单相 4 象限整流器控制 [J]. 电气传动, 2011, 41(10): 33-36.
- [11] Salaet J, Alepuz S, Gilabert A, et al. Comparison between Two Methods of DQ Transformation for Single Phase Converters Control Application to a 3-level Boost Rectifier [J]. IEEE Power

Electronics Specialists Conference, 2004, 1(1): 214-220.

- [12] Mobin S, Hiraki E, Takano H, et al. Simulation method for DSP-controlled active PFC high frequency power converters [J]. IEEE Electric Power Applications, 2000, 147(3): 159-166.
- [13] 邓卫华, 张波, 丘东元, 等. 三相电压型 PWM 整流器状态反馈精确线性化解耦控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 97-103.
- [14] 李伟, 张黎, 马志文, 等. 三电平网侧变流器预测电流控制及其与两电平变流器比较 [J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 77-81.
- [15] 宋文胜, 冯晓云, 谢方, 等. 基于 DQ 坐标系的单相三电平 PWM 整流器研究 [J]. 电气自动化, 2008, 30(6): 39-41.
- [16] 李伟, 赵红卫, 全力. 单相四象限整流器预测电流控制的相位补偿方法 [J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 29-33.
- [17] 李伟, 唐蕾, 马志文. 基于瞬时无功的三相 4 象限整流器相位补偿控制 [J]. 电气传动, 2012(9): 25-28.
- [18] 马驰. 两相两重四象限变流器的控制方法及实现 [J]. 中国铁道科学, 2017(1): 95-101.

作者简介: 李 伟 (1974-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为电气牵引系统及控制。