

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201711036



轨道客运车辆山区小半径曲线 通过性能分析

张云飞¹, 李军^{1,2}

(1. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学 城市轨道交通车辆系统集成与控制重庆市重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 为了解决山区小半径曲线下车辆运行安全性低、平稳性差等问题,基于车辆轨道耦合动力学建立某型轨道客运车辆动力学模型;给出线路参数方程及车辆动力学方程,并对其进行仿真计算,分析曲线半径、缓和曲线长度、欠超高等山区工况曲线几何参数对轨道客运车辆通过性能的影响。研究结果表明:在一定范围内,轮轨横向力、轮轴横向力、脱轨系数、轮重减载率等曲线通过性能指标均随着圆曲线半径、缓和曲线长度、欠超高的增大而有明显的降幅,车辆曲线通过性能增强,安全性和平稳性提高。

关键词: 小半径曲线; 圆曲线半径; 缓和曲线长度; 欠超高; 曲线通过性能

中图分类号: U 271 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)03-0343-06

Performance Analysis of Passenger Trains Passing Mountain Area With Small Radius Curve

ZHANG Yunfei¹, LI Jun^{1,2}

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Urban Rail Transit Vehicle System Integration and Control,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to solve the problem of low safety and poor stability of vehicles under small radius curve in mountainous area, the dynamic model of a passenger railway vehicle was established based on vehicle-rail coupling dynamics. The parameters of the train line and vehicle dynamics equations were provided. The simulation calculation was carried out. The influence of geometric parameters such as curve radius, transition curve length and under-super high mountain operating conditions on the passing performance of rail passenger vehicles was analyzed and discussed. The results show that within a certain range, the performance indexes such as wheel-rail lateral force, axle lateral force, derailment coefficient and wheel load reduction rate obviously decrease with the increase of radius of circle curve, length of relaxation curve and under-high parameter so that the vehicle curve through performance was enhanced and the safety and stability were improved.

Keywords: small radius curve; radius of circular curve; length of relaxation curve; under-high; curve passing performance

收稿日期: 2017-11-13

通信作者: 李军(1964-),男,教授,博士,主要从事发动机排放与控制、新能源汽车及城市轨道交通车辆的研究. E-mail: cqleejun@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305472); 重庆市轨道交通车辆系统集成与控制重庆市重点实验室项目(CSTC2015YFPT-ZDSYS30001)

我国有大量铁路处于山区,西南地区地势险要,导致铁路建设桥隧相连,小半径曲线多,列车运行速度低.如果贸然提速必定导致运行安全性和平稳性变得更差甚至脱轨.目前,针对轨道车辆曲线通过性的研究,有的集中在曲线几何参数上^[1-3],有的集中在悬挂参数上^[4].李亨利等^[1]分析圆曲线半径及欠超高对两种新型改进型转向架曲线通过性能的影响规律.田光荣等^[2]利用模块化对列车进行耦合,进而研究重载列车的曲线通过性能,指出车辆动力学与铁道线路的关系,分析圆曲线半径及缓和曲线的影响.杨茜茜^[3]对京沪高铁线路及 CRH2 列车进行分析,研究曲线参数、轨道状态等在高速动车通过曲线路段时对动态性能的影响.张徐^[4]建立有轨电车动力学模型,分析悬挂参数和曲线参数对有轨电车通过性能的影响.但目前山区小半径下系统性研究曲线几何参数的文献较为少见.鉴于此,本文主要研究曲线半径、缓和曲线长度、欠超高等山区工况曲线几何参数对轨道客运车辆通过性能的影响^[5],以改善山区小半径下轨道客车的通过性能.

1 车-线动力学模型

1.1 缓和曲线及超高方程

轨道线路存在曲线,动态曲线通过时,一般采用轨道动态坐标系^[6],如图 1 所示.同时,缓和曲线常用三次螺旋线型,参数方程为

$$x = l - \frac{l^2}{40R^2l_0^2}, \quad y = \frac{l^3}{6Rl_0}. \tag{1}$$

式(1)中: x, y 分别为缓和曲线的纵向坐标与横向坐标; l_0 为缓和曲线长度; R 为圆曲线半径.当 $l=l_0$ 时,曲线倾斜角 $\theta=\theta_0=\frac{l_0}{2R}$.

缓和曲线使直线路况过渡到圆曲线路况变得舒缓,避免通过曲线时各种因素引起的突变冲击载荷,保持车辆通过的稳定性和安全性.我国根据长期运营实践,确定了缓和曲线的最小长度 $l_0 \geq \frac{h}{100} v_{\max}^{[7]}$.其中: l_0 为缓和曲线长度; h 为线路超高; v_{\max} 为通过曲线的最高车速.

为平衡车辆系统所受的离心力,设置曲线时,通常将线路外侧相对于内侧抬升一个高度(即超高),使内外侧曲线平面形成一定的倾角,产生与离心力作用相反的重力分力.由经验公式可得曲线上超高(h_d)计算式为

$$h_d = 11.8v^2/R - h_0. \tag{2}$$

式(2)中: $h_d>0$ 为欠超高, $h_d<0$ 为过超高; v 为速度.

1.2 车辆动力学模型

文中建立的客车模型^[8],如图 2 所示.车辆系统包括 1 个车体,2 个构架和 4 个轮对,每个刚体都有纵向、横向、垂向位移、侧滚、点头、摇头等自由度,整车共计 42 个.客车动力学微分方程组^[8]为

$$M\ddot{X} + f(\dot{X}, X, R, h) = g(t). \tag{3}$$

式(3)中: M 为系统质量矩阵; \ddot{X} 为二阶坐标向量; $M\ddot{X}$ 表示惯性力矩阵; f 为悬挂力,与曲线半径、超高、坐标向量等相关; $g(t)$ 为外界激励力,是由轨道不平顺而产生的.钢轨在高低及左右方向与钢轨理想位置几何尺寸的偏差、接头、轮轨磨损等因素造成的轨道不平顺的外部激励,是产生车辆系统振动的主要根源,不可避免.同时,轨道客车系统动力学方程采用数值积分方法求解.

1.3 模型验证

与文献[2]中的结果进行对比验证,计算工况为曲线半径 300~1 600 m,缓和曲线长度 80 m,外轨超高 110 mm,车速 70 km·h⁻¹.基于文中与文献[2]中的参数,计算结果如图 3 所示.

由图 3 可知:曲线半径(R)不断增大,脱轨系数与轮重减载率^[9]大幅减小;在小半径曲线下,对车辆通过性能的影响更大;在大半径下,变化则较为舒缓.文中所得规律与文献[2]中不同曲线半径对通过安全性能的影响规律相符,说明该模型计算结果与理论分析结论较为符合,模型具有有效性,可信度高.

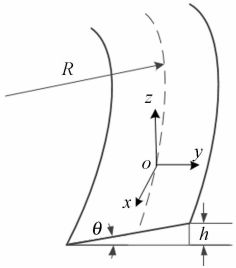


图 1 动态曲线通过轨道参考坐标系

Fig. 1 Reference coordinate system of dynamic curve passing orbit

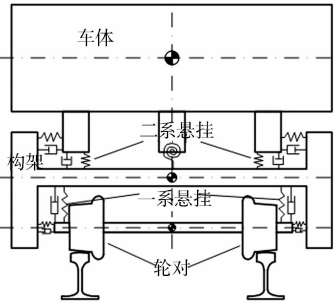


图 2 客车模型

Fig. 2 Rail passenger vehicle model

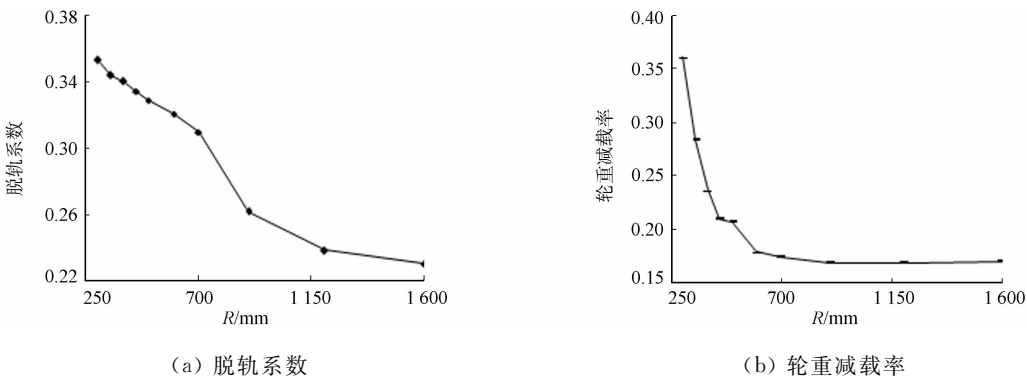


图 3 不同半径条件下所得指标变化
Fig. 3 Indicators change with different radius

2 计算参数的选取

以某轨道不平顺功率谱为基础,各段线路条件设置,如表 1 所示.表 1 中:曲线由两段缓和曲线加圆曲线组成.建立的轨道不平顺激励^[10],如图 4 所示.图 4 中: $f(s)$ 为不平顺幅值; s 为行程.所建立的轨道客运车辆模型基本参数,如表 2 所示.

表 1 曲线段线路条件设置
Tab. 1 Curve segment line condition settings

工况	曲线组成/m	R/m	$v/km \cdot h^{-1}$	h_d/mm
圆曲线半径影响分析	80+300+80	300~1 600	70	110
缓和曲线长度影响分析	(50~250)+300+(50~250)	600	70	110
欠超高影响分析	80+300+80	600	70	-120~80

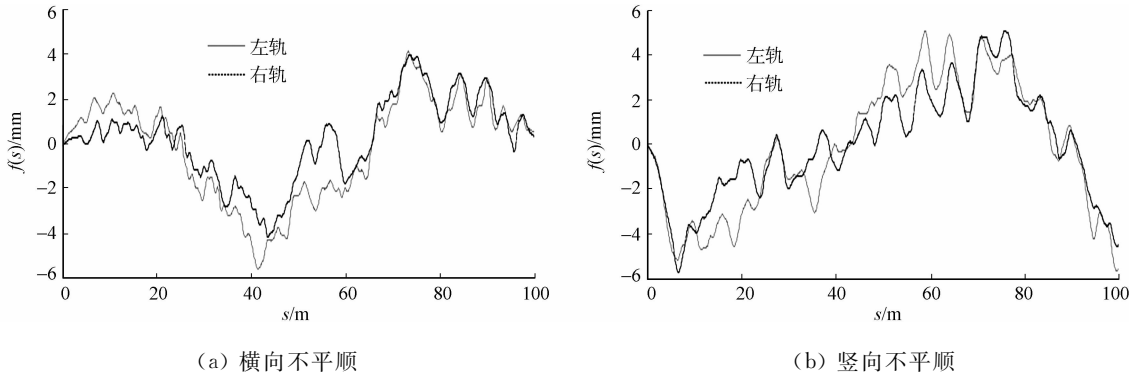


图 4 轨道不平顺激励
Fig. 4 Track irregular excitation schematic

表 2 车辆基本参数
Tab. 2 Vehicle basic parameters

名称	数值	名称	数值	名称	数值
一系悬挂垂向刚度/ $MN \cdot m^{-1}$	0.60	车体质量/t	32	轴距/mm	2 500
一系悬挂横向刚度/ $MN \cdot m^{-1}$	10.00	构架质量(每侧)/t	3	车辆定距/mm	18 000
二系悬挂垂向刚度/ $MN \cdot m^{-1}$	0.45	轮对质量(每条)/t	1		
二系悬挂横向刚度/ $MN \cdot m^{-1}$	0.15	轨距/mm	1 435		

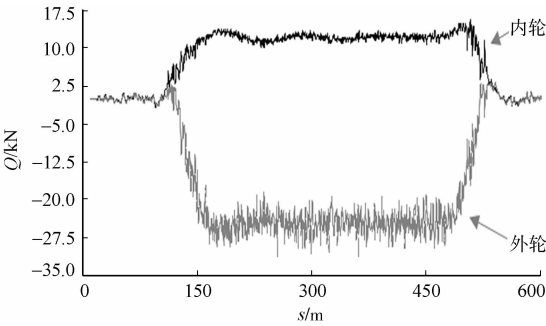
3 圆曲线半径的影响分析

300 m 半径下客车通过曲线,如图 5 所示.图 5 中: Q 为轮轨横向力; P 为竖向力.由图 5(a),(b)可知:客车驶入缓和曲线后,轮轨横向力及竖向力都有较大增幅,驶入圆曲线后,增长至最大阶段,下一段再次进入缓和曲线直至驶入直线段后,横向力、竖向力均大幅减小;竖向力在轮对平均静载荷 52.5 kN

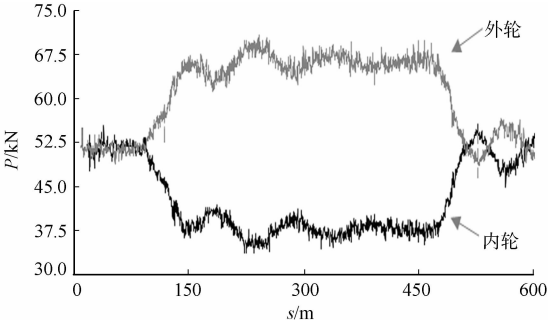
附近稳定,横向力在零附近稳定. 这是轮对外侧车轮由于离心力作用挤压外轨导致,由于处于欠超高,车体对外轨发生挤压,轨排力增加,外轮受力均大于内轮^[11].

由图 5(c)可知:脱轨系数先增后减,外轮数值更大. 车辆经过曲线时,由于离心力作用,外轮本身更易脱轨,且此时处于欠超高,外轮较内轮易脱轨^[12].

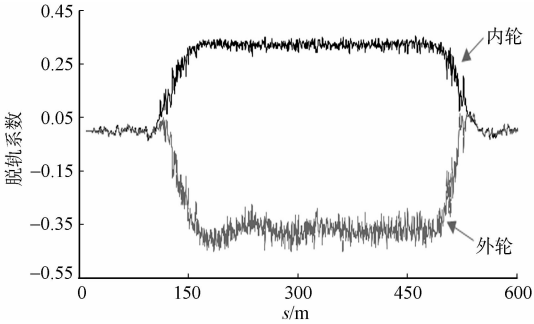
研究不同圆曲线半径的影响情况,预设车速为 70 km · h⁻¹,外轨超高为 110 mm,缓和曲线为 80 m,圆曲线为 300 m,圆曲线半径为 300~1 600 m 的通过性能评



(a) 轮轨横向力



(b) 轮轨竖向力



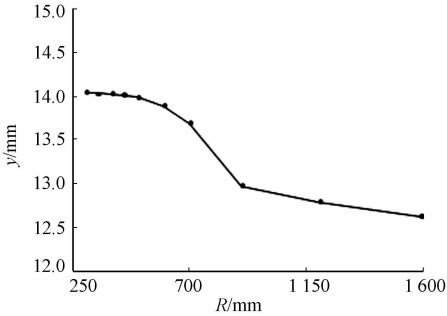
(c) 脱轨系数

图 5 300 m 圆曲线半径工况下的客车通过曲线

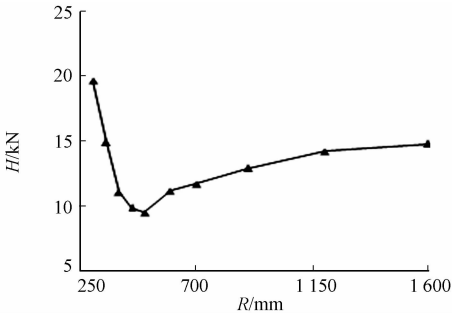
Fig. 5 Passenger car curve under conditions of 300 m circular curve

价指标的增减情况,如图 6 所示. 图 6 中: y 为客车轮对横移量; H 为轮轴横向力.

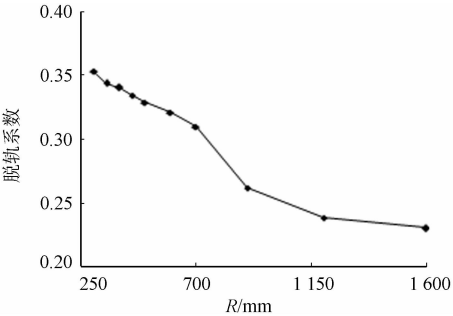
由图 6(a)可知:圆曲线半径增大,客车轮对横移量不断减小. 由于离心作用,轮对不可避免地向外甩,从而靠向外轨,甚至发生挤压和碰撞^[13]. 当半径较小时,冲角较大,轮缘开始接触钢轨形成较剧烈的轮轨侧磨,位移较大,但在大曲线阶段,影响减弱.



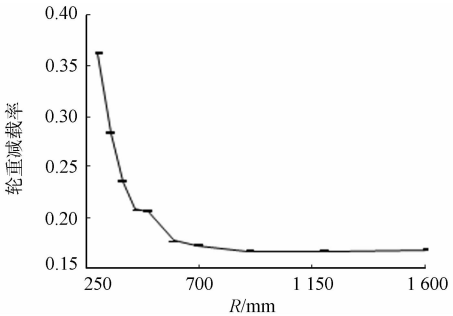
(a) 轮对横移量



(b) 轮轴横向力



(c) 脱轨系数



(d) 轮重减载率

图 6 不同圆曲线半径工况下的客车通过曲线

Fig. 6 Passenger cars through curve under different circular curve radius

由图 6(b)可知:轮轴横向力先减后增,全程峰值为 19.7 kN,小于 GB 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》^[9]要求的 50.15 kN;开始通过曲线段时,处于欠超高,轮对对外轨有明显的

挤压,最大轮轴横向力指向外轨;随着欠超高程度减小,逐渐向内轨方向趋近;在接近平衡超高的位置,靠内外轨的趋势基本持平,轮轴横向力随之减至最小;之后半径不断增大,预设超高已变为过超高,轮对逐渐向内轨靠,最大轮轴力出现在指向内轨方向。

由图 6(c),(d)可知:脱轨系数和轮重减载率指标与圆曲线半径成负相关,由小半径过渡到大半径时不断减小,两者最大分别为 0.35,0.36,远小于规范要求的脱轨系数限度 0.8^[9],也小于轮重减载率第二限度 0.6。分析认为,由于离心力作用,整车有向外轨靠的趋势^[14],在设定车速、超高下,随着半径逐渐增大,离心作用减轻,超高作用明显,指标随之呈现不断减小的趋势,安全性提高。

4 缓和曲线长度的影响分析

在预设 600 m 圆曲线半径条件下,分析缓和曲线长度对客车通过性能的影响情况。预设外轨超高为 110 mm,车速为 70 km · h⁻¹,超高范围为 50~250 m,通过性能评价指标的变化情况,如表 3 所示。

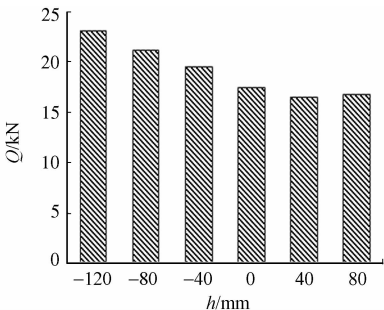
由表 3 可知:4 个曲线评价指标峰值与缓和曲线长度成负相关,长度越长,各项值越小,轮重减载率变化更大。在缓和曲线长度增加初期,轮轴横向力降幅较猛,但当长度继续增大时,降幅却逐渐减缓,而脱轨系数、轮轨横向力降幅则相对较为舒缓。由表 3 还可知:轮轴横向力为 11.90 kN,脱轨系数及轮重减载率的峰值分别为 0.36,0.33,远小于规范要求的轮轴力限度 50.15 kN,脱轨系数限度 0.8 及轮重减载率第二限度 0.6^[9],运行安全。

缓和曲线缓和了车辆通过曲线时的离心力,曲线半径不断变化,从零增加至圆曲线半径,符合车辆通过的自然轨迹,有利于车辆平稳通过^[15]。离心加速度连续变化,超高等逐渐变化,缓和优势随长度的增加更加明显,尤其在预设超高对应的平衡半径之前,指标降低势头更猛;当长度增大到一定值后,半径、超高等指标的值变化趋势更加舒缓。

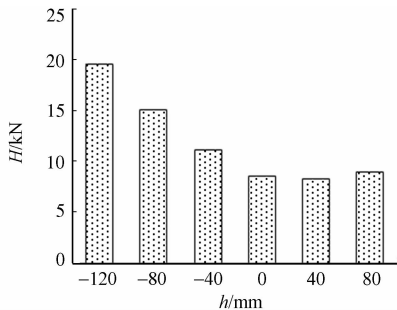
5 欠超高的影响分析

欠超高对客车在山区工况下的曲线通过性能至关重要。为研究其对通过性能的影响程度,在半径 600 m 曲线上取欠超高范围为 -120~80 mm,车速为 70 km · h⁻¹,指标变化情况如图 7 所示。图 7 中:h 为超高值。由图 7 可知:随着超高值的增大,各项数值均持续降低,除轮轨横向力外,其余指标减少势头均较猛。在长度变化初期,轮轨/轮轴横向力及脱轨系数降幅较猛,接近平衡超高,下降势头减缓。由图 7 还可知:轮轴横向力为 19.66 kN,脱轨系数、轮重减载率的峰值分别为 0.31,0.26,小于规范要求的轮轴力安全限度 50.15 kN,脱轨系数限度 0.8 及通过性能指标轮重减载率第二限度 0.6^[9]。

车辆在通过曲线时,由于离心力的作用,整车有向外轨甩的趋势,在预设车速、半径下,随着超高值逐渐增大,离心力逐渐被平衡,脱轨系数与轮重减载率指标随之呈现不断减小的趋势,安全性得到保障^[16];欠超高下,增加超高值有利于改善客车曲线通过性能,保证行车安全可靠。



(a) 轮轨横向力



(b) 轮轴横向力

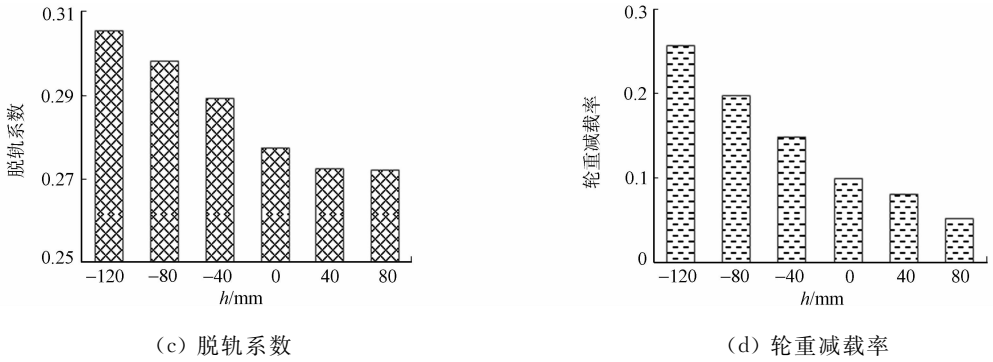


图 7 不同欠超高工况下客车通过曲线

Fig. 7 Rail passenger vehicle passing curves under different under-high operating conditions

6 结论

- 1) 各轨道曲线几何参数在预设范围内,随着参数取值的增大,轮轨横向力、轮轴横向力、轮对横向位移量、脱轨系数、轮重减载率等评价指标峰值均不同程度地降低,轨道客车曲线通过性能得到改善.
- 2) 在进行通过性能评价时,即使横向力极小也可能发生脱轨,因此,不能仅看轮轨横向力、轮对横移量,应该采用脱轨系数和轮重减载率作为重要的参考指标,以综合判断脱轨风险.
- 3) 在设计条件允许的范围内,应尽可能地增大曲线半径,适当延长缓和曲线长度,适量增大欠超高的超高值,这样可以降低轮轨磨损及脱轨风险,提高安全性.

参考文献:

[1] 李亨利,李芾,傅茂海,等. 曲线几何参数对货车转向架曲线通过性能的影响[J]. 中国铁道科学,2008,29(1):70-75. DOI:10.3321/j.issn:1001-4632.2008.01.015.

[2] 田光荣,张卫华,池茂儒. 重载列车曲线通过性能研究[J]. 铁道学报,2009,31(4):98-103. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2009.04.017.

[3] 杨茜茜. 高速动车曲线通过动态性能仿真研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.

[4] 张徐. 模块 100%低地板有轨电车小曲线通过性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.

[5] 李敏. 小半径曲线通过性能评价方法探索[D]. 成都:西南交通大学,2011.

[6] 任尊松. 车辆动力学基础[M]. 北京:中国铁道出版社,2009.

[7] 中华人民共和国建设部. 铁路线路设计规范: GB 50090—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

[8] 翟婉明. 车辆轨道耦合动力学[M]. 4 版. 北京:科学出版社,2015.

[9] 中国标准化委员会. 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范: GB 5599—1985[S]. 北京:中国质检出版社,1985.

[10] CHELI F,CORRADI R. On rail vehicle vibrations induced by track unevenness: Analysis of the excitation mechanism[J]. Journal of Sound and Vibration,2011,33(15):3744-3765.

[11] 刘彬彬,罗仁,曾京,等. 地铁直线电机车辆曲线通过仿真[J]. 城市轨道交通研究,2011(2):56-61. DOI:10.3969/j.issn.1007-869X.2011.02.012.

[12] 谷学思. 不同踏面及轮径差对高速动车组曲线通过性能的影响[D]. 北京:北京交通大学,2011.

[13] 郑凯飞,沈钢. 基于 SIMPACK 的四轴电力机车运行平稳性分析[J]. 城市轨道交通研究,2012,15(1):80-83. DOI:10.3969/j.issn.1007-869X.2012.01.018.

[14] POMBO J,AMBROSIO J,PEREIRA M,et al. Influence of track conditions and wheel wear state on the loads imposed on the infrastructure by railway vehicles[J]. Computers and Structures,2011,89(21/22):1882-1894.

[15] 杜子学,李宁,陈帅. 跨坐式单轨车辆曲线通过性能仿真分析[J]. 城市轨道交通研究,2012(7):22-25.

[16] 刘文龙,徐延海,杨吉忠,等. 悬挂式单轨车辆曲线通过性仿真研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2016,41(5):1402-1412.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 崔长彩)