

# 现代有轨电车车辆独立轮对与传统轮对 曲线导向能力分界点计算

周 橙<sup>1</sup> 池茂儒<sup>2</sup> 雷昆来<sup>1</sup> 孙代涛<sup>1</sup>

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛;

2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都// 第一作者, 工程师)

**摘 要** 采用单轮对纯滚线判别法与整车动力学仿真方法, 对现代有轨电车低地板列车采用的传统轮对与独立轮对的曲线导向性能分界点进行深入研究, 为轮对选取与导向控制提供参考。从纯滚线角度分析, 传统轮对曲线通过时趋向于纯滚线运动, 独立轮对基本处于轮对最大横移位置, 典型踏面下对应区域的线路曲线半径 100 ~ 200 m 为性能分界点。建立全传统轮对与全独立轮对的五模块现代有轨电车列车模型进行分析, 典型踏面下各项指标结果同样表明两种轮对的性能分界点为线路曲线半径 100 ~ 200 m 区域。

**关键词** 现代有轨电车; 车辆; 传统轮对; 独立轮对; 曲线通过性能; 分界点

**中图分类号** U270.331+.1

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.01.014

## Calculation of Dividing Point Between IRW and Traditional Wheelset Curve Guidance Capability for Modern Tram Vehicle

ZHOU Cheng, CHI Maoru, LEI Kunlai, SUN Daitao

**Abstract** By using single wheel pure rolling line discrimination method and whole vehicle dynamics simulation method, the dividing point of curve guidance performance between traditional wheelset and IRW for modern tram low-floor vehicle is further studied, providing reference for wheelset selection and guidance control. From the perspective of the pure roll line, the traditional wheelset tends to move toward the pure rolling line when passing the curve, and the IRW is basically at the maximum displacement position. The performance dividing point is the corresponding region with curve radius of 100 ~ 200 m under a typical profile. Five-module modern tram vehicle model with all-traditional wheelsets and all-IRWs is established for analysis. The results of each index under the typical profile also show that the performance dividing point of the two wheelsets is the line area with curve radius of 100 ~ 200 m.

**Key words** modern tram; vehicle; traditional wheelset; IRW; curve passage performance; dividing point

**First-author's address** CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., 266111, Qingdao, China

现代有轨电车为了实现 100% 低地板化, 其列车多采用独立轮对结构。独立轮对取消了刚性车轴, 左右车轮不再耦合, 具有横向稳定性好、小半径曲线通过能力较强等优点; 但同时, 独立轮对失去了传统轮对的直线对中与曲线导向能力。国外很早就对独立轮对导向原理进行了研究<sup>[1]</sup>; 国内同样有多位学者对独立轮对的蠕滑机理与导向机理进行了深入探究<sup>[2-6]</sup>, 文献<sup>[7]</sup>还指出了传统轮对在小半径曲线运行时存在自导向能力恶化的现象。

至今在相关的独立轮对动力学研究中, 虽然指出了其缺乏导向能力与传统轮对小半径曲线下导向能力恶化等现象, 但并没有对传统轮对与独立轮对性能分界进行明确分析与深入研究。本文将单轮对纯滚线分析方法与整车动力学仿真方法, 对传统轮对与独立轮对曲线导向能力分界点进行计算, 为后续关于独立轮对导向方式的设计提供参考。

## 1 传统轮对与独立轮对导向原理

传统轮对左右车轮固结在同一车轴上, 相互之间无法转动, 转速相同, 是刚性轮对; 独立轮对左右车轮可以相对独立地绕车轴旋转, 转速解耦, 车轴可以做成曲轴形式从而降低车辆地板面高度, 是现代有轨电车低地板列车的常用轮对形式。

传统轮对与独立轮在动力学性能上的主要区别就在于导向能力。铁道车辆导向主要是依靠轮轨接触力中的重力复原力、横向蠕滑力和纵向蠕滑力<sup>[11]</sup>。

轮轨的法向力由于轮轨接触面倾角所形成的水平横向分力为重力复原力。传统轮对与独立轮对均存在重力复原力, 而独立轮对增强导向能力的措施之一就是增大左右车轮的轮轨接触较差。左右车轮重力复原力合力可以表示为

$$N_y = N_{L,y} + N_{R,y} = -Q_L \tan \delta_L + Q_R \tan \delta_R \quad (1)$$

式中:

$N_y$ ——法向力的水平横向分力,即重力复原力;

$Q$ ——法向力的竖向分力,即轮重;

$\delta$ ——轮轨接触角;

$N_{L,y}$ ——左车轮的重力复原力;

$N_{R,y}$ ——右车轮的重力复原力。

蠕滑力主要包括纵向蠕滑力、横向蠕滑力和自旋蠕滑力。设  $d_y$ 、 $\psi$ 、 $\varphi$  分别为轮对的横移量、摇头角、侧滚角,  $d_0$  为轮轨接触点横向距离之半,  $\lambda$  为锥度,  $f_{11}$ 、 $f_{22}$  均为 Kalker 蠕滑系数。

对于传统轮对,左右车轮转速相同,忽略自旋蠕滑,可以得到横向蠕滑力合力  $T_y$  与纵向蠕滑力矩  $M_z$  [12]:

$$T_y = 2f_{22}(\psi - \frac{\dot{d}_y}{v}) \quad (2)$$

$$M_z = -2f_{11}(\frac{\lambda d_0}{r_0} d_y + \frac{d_0^2}{v} \dot{\psi}) \quad (3)$$

式中:

$v$ ——车速;

$r_0$ ——车轮名义滚动圆半径。

传统轮对  $T_y$  主要由摇头运动产生,而  $M_z$  主要由横移运动产生。

对于独立车轮轮对,左右车轮线速度基本相同,转速差无法产生纵向蠕滑力,忽略自旋蠕滑,可得

$$T_y = 2f_{22}(\psi - \frac{\dot{d}_y}{v}) \quad (4)$$

$$M_z = -2f_{11} \frac{d_0^2}{v} \dot{\psi} \quad (5)$$

独立车轮轮对  $T_y$  同样主要由摇头运动产生,但纵向蠕滑力近似为零,难以形成有效的  $M_z$ 。

图1所示为传统轮对与独立轮对导向原理。结合式(2)~(5),从图1中可以看出两种轮对导向过程分别为:

1) 传统轮对出现如图1a)所示横移后,会产生顺时针的纵向蠕滑力矩,促使轮对出现顺时针摇头;当轮对出现如图1a)所示摇头运动后,产生横向蠕滑力促使轮对向轨道右侧运动。在运行中,横移与摇头同时出现,轮对会出现以正弦式的运动回到轨道中心线的趋势,即轮对的自动对中和曲线导向。

2) 独立轮对出现图1b)所示的横移之后,无法形成纵向蠕滑力与纵向蠕滑导向力矩,但摇头可以产生横向蠕滑力促使轮对向右运动。在这样的轮轨条件下,轮对出现横移与摇头后无法恢复,不存

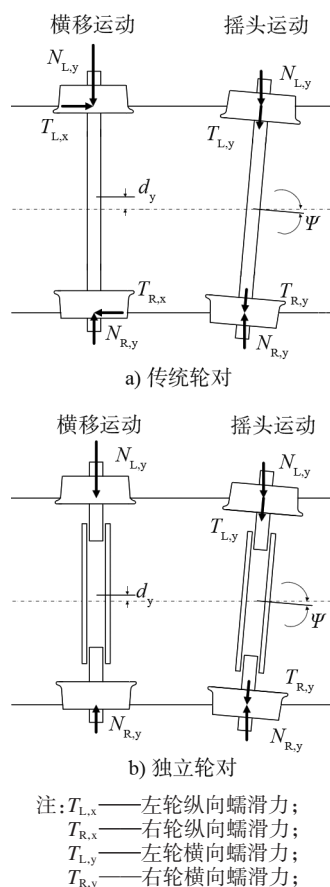


图1 传统轮对与独立轮对导向原理图

在蛇行运动,但同时失去了曲线导向能力,直线工况下也无法对中。

## 2 单轮对导向分界点理论分析

单轮对以速度  $v$  通过半径为  $R$  的曲线,曲线超高角为  $\alpha$ 。除受到轮轨力外,轮对还受到一系悬挂纵向作用力  $F_{x,f}$  与一系悬挂横向作用力  $F_{y,f}$ 。在仅考虑轮对位移的条件下,一系悬挂纵向作用合力为摇头力矩  $K_p\psi$ ,  $K_p$  为一系悬挂摇头刚度;一系横向作用合力为  $K_{p,y}d_y$ ,  $K_{p,y}$  为一系悬挂横向刚度。重力复原力  $N_y$  可以简化为  $K_r d_y$ ,  $K_r$  为简化后的重力复原刚度。设  $M$  为轮对总质量,  $g$  代表重力加速度,  $I_{\psi,z}$  为轮对摇头惯量,  $I_y$  为单个旋转车轮的点头惯量。

现以传统轮对为例,对轮对曲线通过时的受力进行分析,如图2所示。根据受力分析可以建立轮对的导向动力学方程。

结合式(2)、(3),可以得到曲线条件下传统轮对的导向方程为:

$$M\ddot{d}_y + \frac{2f_{22}\dot{d}_y}{v} - 2f_{22}\psi + (K_{p,y} + K_r)d_y = Mg(\alpha - \frac{v_2}{R}) \quad (6)$$

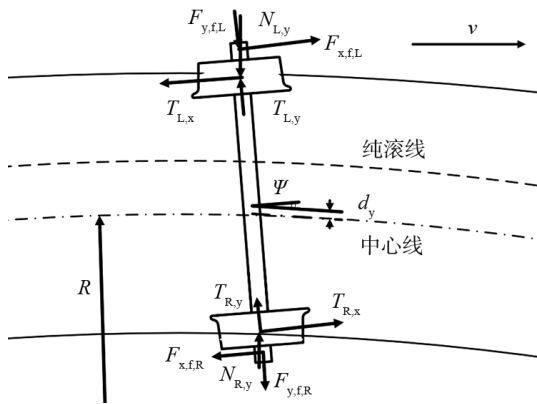


图2 单轮对曲线通过受力分析

$$I_{\psi,z}\ddot{\psi} + \frac{2f_{11}d_0\lambda}{r_0}(d_y + \frac{r_0d_0}{\lambda R}) + \frac{2f_{11}d_0^2}{V}\dot{\psi}_w + K_p\psi = 0 \quad (7)$$

考虑理想条件,当列车稳态通过曲线时,忽略惯性项 $\ddot{d}_{y,i}$ 、 $\ddot{\psi}_i$ ,横移速度项 $\dot{d}_{y,i}$ 与摇头角速度项 $\dot{\psi}_i$ 为0,当且仅当 $K_p = 0$ 的情况下,传统轮对处于纯滚线位置运动。由式(7)可以得到纯滚线位移量为

$$d_y = \frac{r_0d_0}{\lambda R} \quad (8)$$

具有一定锥度的轮对产生横移后,车轮滚动半径会发生改变。同样的转速下,当左右车轮滚动距离差可以完全弥补曲线内外轨路程差时,轮对处于纯滚线位置,此时纵向蠕滑力最小。

当轮对横移处于纯滚线以内时,会产生负向的纵向蠕滑力矩,驱使轮对负向摇头,进而产生负向的横向蠕滑力,轮对趋向于曲线外侧运动;反之,轮对横移处于纯滚线以外时,会产生正向的纵向蠕滑力矩,驱使轮对正向摇头,轮对趋向于曲线内侧运动。传统轮对最终趋向于纯滚线进行运动。

同样,对于独立轮对,只考虑主要位移因素,设 $\beta$ 为车轮转速差之半,忽略较小量,通过简化变形,可以得到独立轮对在曲线上的横移与摇头方程为:

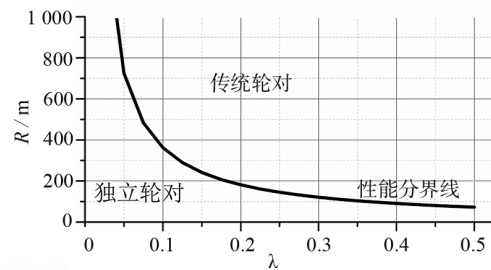
$$M\ddot{d}_y + \frac{2f_{22}\dot{d}_y}{v} - 2f_{22}\psi + (K_{p,y} + K_r)d_y = Mg(\alpha - \frac{v_2}{R}) \quad (9)$$

$$I_{\psi,z}\ddot{\psi} + \frac{2f_{11}d_0\lambda}{r_0}(d_y + \frac{r_0d_0}{\lambda R}) - \frac{2f_{11}d_0^2}{v}\dot{\psi} - \frac{2f_{11}d_0r_0}{v}\dot{\beta} + K_p\psi = 0 \quad (10)$$

独立轮对缺乏纵向蠕滑力,稳态曲线通过时横向位置最终会依靠踏面达到一个各力平衡的位置,基本上都处于轮对最大横移位置。

现代有轨电车车轮对最大横移量在6 mm左右,6 mm以上时可能会出现轮缘贴靠与多点接触。

假设轮对只有横移,以6 mm为纯滚线位置,可以得到 $\lambda$ 与对应 $R$ 关系如图3所示。

图3  $\lambda$ 与 $R$ 关系

由于传统轮对始终有趋向于纯滚线运动的趋势,最大横移位置对应的纯滚线即为轮对性能分界曲线。当曲线半径大于分界曲线半径时,传统轮对性能更优;反之,独立轮对曲线通过性能更优。

采用现代有轨电车典型踏面为例,其轮轨关系如图4所示,以此分析低地板列车常用曲线半径下的纯滚线位置。轮对最大横移量为6 mm, $\lambda$ 为0.314,大于6 mm时, $\lambda$ 统一按照0.314计算。各 $R$ 与各 $\lambda$ 对应纯滚线横移量结果如表1所示。

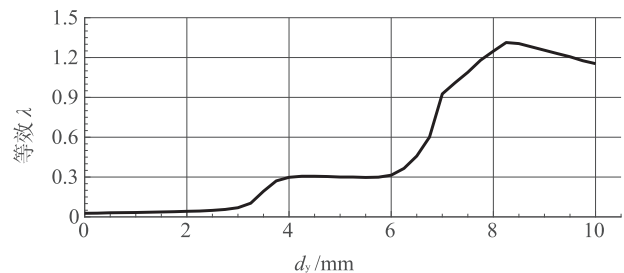


图4 轮轨关系

表1 不同曲线半径下纯滚线横移量

$R/m$	纯滚线横移量/mm	对应 $\lambda$
50	13.85	0.314
100	6.93	0.314
200	3.88	0.285
400	3.44	0.173

纯滚线所对应的最大横移位置的工况成为了传统轮对与独立轮对曲线通过性能的分界点,轮对最大横移量6 mm所对应的 $R$ 为117 m。对于 $\lambda$ 与本例相似的轮轨关系,分界点可以扩展为 $R = 100 \sim 200$  m区域。

### 3 整车导向分界点仿真分析

采用应用最为广泛的五模块浮车型式的低地板列车进行整车动力学分析。采用Simpack软件建立五模块低地板列车动力学模型。

其车体、构架考虑6个自由度,轴箱考虑点头自

由度。传统轮对考虑 6 个自由度,轴桥考虑 6 个自由度,独立旋转车轮为点头旋转自由度。传统轮对列车模型系统自由度为 96,独立轮对列车模型系统自由度为 108。建立一系、二系悬挂与车间悬挂。整车动力学模型如图 5 所示。

曲线设置为右向曲线,取  $R$  分别为 400 m、200 m、100 m 及 50 m 进行分析。对比传统刚性轮对与独立轮对在导向性能上的区别,包括一位轮对的横移量、摇头角与脱轨系数,如图 6 所示。

图 6 a)、b)分别为  $R = 400$  m、 $R = 200$  m 曲线通

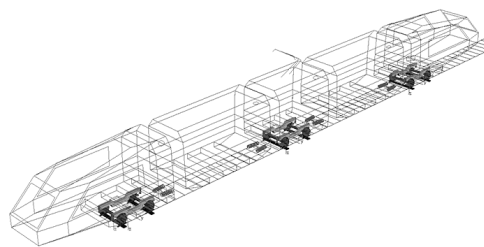
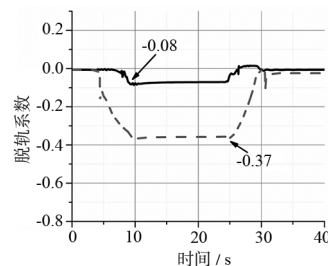
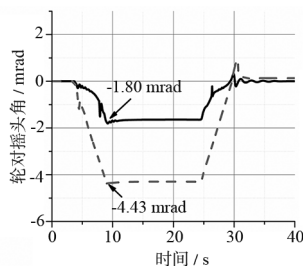
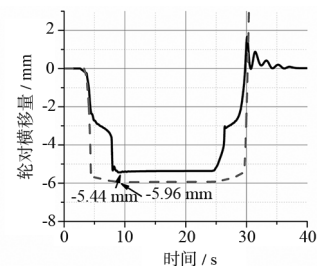
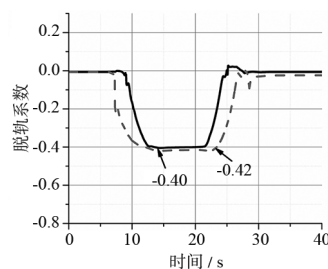
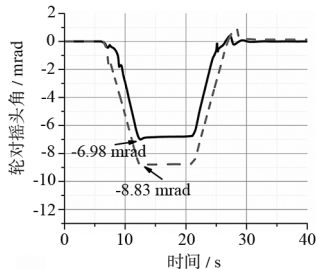
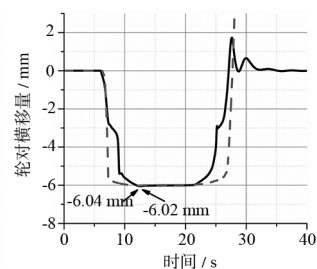


图 5 现代有轨电车低地板列车动力学模型

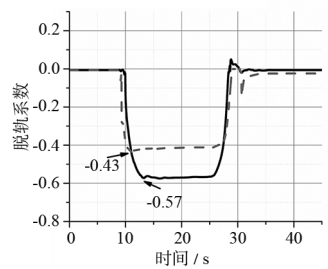
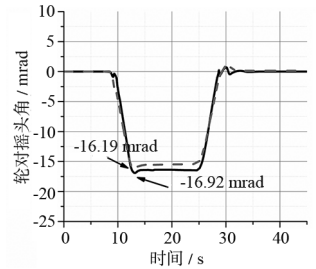
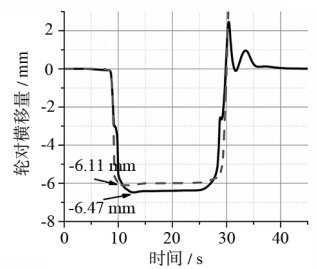
过性能对比。可以看到,虽然传统轮对的曲线通过能力优于独立轮对,但随着曲线半径的减小,两者导向



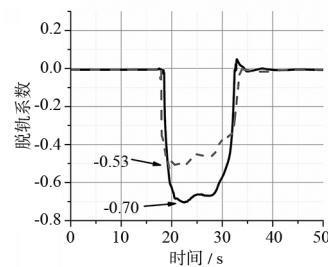
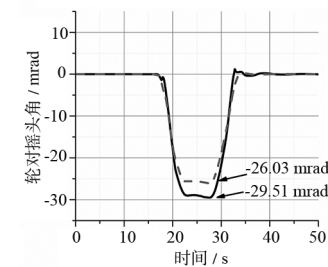
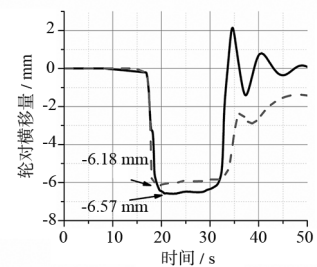
a)  $R = 400$  m 时导向能力对比



b)  $R = 200$  m 时导向能力对比



c)  $R = 100$  m 时导向能力对比



d)  $R = 50$  m 时导向能力对比

注:——为传统轮对;---为独立轮对。

图 6 传统轮对与独立轮对的列车导向能力对比

(下转第 87 页)



一个整体,并由独立的安防集成平台统一进行管理。GB/T 38311—2019 针对相关的通信协议与接口做出规定,从技术上根本解决了以上问题,提高了设备的互通性和兼容性,为执行标准强制性条文建立了技术基础。因此,在贯彻 GB/T 38311—2019 的同时,对于城市轨道交通各类安全防范系统的技术要求也应执行。

#### 4 结语

安防联网平台是城市轨道交通范围内公共安全状态监视的核心,是技术防范设施设备管理的核心,是公共安全事件发生后进行联动控制的核心,是进行安防事件处置决策和应急指挥的核心。对于设备厂家而言,通过制定统一的通信协议与接口,可明确指定音视频编解码格式。GB/T 38311—2019 可提高设备互联互通性和兼容性,避免二次转换,大幅提升效率,有利于行业的健康发展和产业的集体升级。对

于地铁运营方和地铁公安而言,GB/T 38311—2019 可使其进行统一管理和资源共享,便于日常运营和应急指挥,同时还可减少运维资源和资金投入。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.城市轨道交通安全防范系统技术要求:GB/T 26718—2011[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.城市轨道交通公共安全防范系统工程技术规范:GB 51151—2016[S].北京:中国计划出版社,2016.
- [4] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.城市轨道交通安全防范通信协议与接口:GB 38311—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.

(收稿日期:2020-07-28)

(上接第 68 页)

性能逐渐接近。

图 6 c)、d) 为  $R = 100\text{ m}$ 、 $R = 50\text{ m}$  曲线下两种轮对的曲线通过性能对比。此时轮对的最大横移量已经不足以满足纯滚线的要求,传统轮对趋向于曲线外侧运动,而独立轮对对自然形成的转速差反而会减弱这种趋势,从而表现出更优的导向性能。随着曲线半径的减小,独立轮对的优势更加明显, $R = 50\text{ m}$  时脱轨系数小了 0.2 左右。

在脱轨系数对比下,两种轮对的性能分界点更加接近  $R = 200\text{ m}$  的曲线。造成这种差异的原因在于轮对并非自由轮对,会受到列车悬挂及姿态的影响,使传统轮对进行曲线导向时更加艰难,从而导致分界点会趋向于更大半径的曲线。

由以上分析可知,虽然整车导向性能分界半径上与单轮对纯滚线结果略有差异,但所得到的分界点仍然为  $R = 100 \sim 200\text{ m}$  区域。

#### 4 结论

1) 传统轮对通过曲线时始终趋向于纯滚线运动,而独立轮对由于缺乏导向力会处于最大横移量位置。假设轮对处于最大横移量位置,可以得到传统轮对与独立轮对的性能分界线。采用典型踏面进行分析,纯滚线对应最大横移量位置时为传统轮对与独立轮对曲线通过性能的分界点,为曲线  $R = 100 \sim$

200 m 区域。

2) 建立现代有轨电车低地板列车模型,对不同曲线工况下传统轮对与独立轮对的整车条件下的导向能力进行分析。在典型踏面下,虽然整车导向性能分界半径上与单轮对纯滚线结果略有差异,但所得到的分界点仍然为  $R = 100 \sim 200\text{ m}$  区域。

#### 参考文献

- [1] FREDERICH F. Dynamics of a bogie with independent wheels[J]. Vehicle System Dynamics, 1989, 19(sup1): 217-232.
- [2] 陈泽深.独立车轮转向架的导向原理(1)[J].铁道机车车辆, 1998(4): 1.
- [3] 陈泽深.独立车轮转向架的导向原理(2)[J].铁道机车车辆, 1999(1): 16.
- [4] 池茂儒.耦合轮对车辆动力学性能的研究[D].成都:西南交通大学,2003.
- [5] 李芾,黄运华,傅茂海.车轮耦合方式发展及其导向机理[J].机车电传动,2006(2): 1.
- [6] 黄运华,李芾,张丽平,等.独立旋转车轮轮轨接触蠕滑特性分析[J].铁道学报,2003(2): 18.
- [7] 金学松,刘启跃.轮轨摩擦学[M].北京:中国铁道出版社,2004.
- [8] 翟婉明.车辆——轨道耦合动力学模型[M].北京:科学出版社,2006.
- [9] 王福天.车辆系统动力学[M].北京:中国铁道出版社,1994.

(收稿日期:2020-04-26)