

# 轮缘厚度对地铁直线电机车辆曲线通过性能影响研究

商佳园<sup>1\*</sup>, 冯永华<sup>1</sup>, 梁海啸<sup>1</sup>, 蒲荣生<sup>1</sup>, 蔡吴斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中车青岛四方机车车辆股份有限公司技术中心, 山东 青岛

<sup>2</sup>西南交通大学机械工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年8月15日; 录用日期: 2026年1月16日; 发布日期: 2026年1月28日

## 摘要

为了研究不同LM踏面轮缘厚度对地铁直线电机车辆曲线通过性能的影响, 本文考虑直线电机的电磁力作用, 通过建立联合仿真的机电耦合直线电机车辆动力学模型, 研究分析了采用LM、LM-31、LM-29、LM-27四种不同轮缘厚度踏面的车辆通过小半径曲线时动力学性能指标及电机气隙的变化规律。研究结果表明: 直线电机车辆通过曲线时, 轮缘厚度对脱轨系数和轮轴横向力影响显著, 对轮重减载率、轮轨垂向力和电机气隙影响不大。小轮缘厚度的LM-27踏面可以降低车辆曲线通过脱轨系数约15.5%, 但会使轮轴横向力增加15%~20%。

## 关键词

地铁直线电机车辆, 轮缘厚度, 曲线通过, 联合仿真, 电磁力

# Study on Influence of Rim Thickness on Curve Passing Performance of LIM Metro Vehicle

Jiayuan Shang<sup>1\*</sup>, Yonghua Feng<sup>1</sup>, Haixiao Liang<sup>1</sup>, Rongsheng Kuai<sup>1</sup>, Wubin Cai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Technology Center of CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: August 15, 2025; accepted: January 16, 2026; published: January 28, 2026

## Abstract

In order to study the different rim thickness of LM tread on the curving performance of linear

\*通讯作者。

文章引用: 商佳园, 冯永华, 梁海啸, 蒲荣生, 蔡吴斌. 轮缘厚度对地铁直线电机车辆曲线通过性能影响研究[J]. 交通技术, 2026, 15(1): 127-135. DOI: 10.12677/ojtt.2026.151012

induction motor (LIM) metro vehicle, this paper considering the electromagnetic force of LIM, and establishing the electromechanical-coupled dynamic co-simulation model of LIM metro vehicle, analyzes the dynamic performance and air-gap changes of LIM vehicle with four tread of LM, LM-31, LM-29, LM-27 when passing small radius curve. The results show that the influence of rim thickness on the derailment coefficient and Wheel-axle lateral force is significant when LIM metro vehicle passes the curve, and has little effect on the rate of wheel load reduction, wheel-rail vertical force and air-gap of LIM. The small rim thickness LM-27 tread can reduce the derailment coefficient of LIM metro vehicle when passing curve by about 15.5%, but it will increase the lateral force of wheel-axle by 15%~20%.

## Keywords

LIM Metro Vehicle, Rim Thickness, Curve Passing, Co-Simulation, Electromagnetic Force

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着城镇化快速发展，城市轨道交通得到普遍应用。然而由于城市轨道线路条件等方面的限制，往往对城市轨道车辆有着特殊的要求。直线电机地铁车辆结合了传统轮轨车辆和磁悬浮车辆的优势，具有较好的小半径曲线通过性能和爬坡能力，而且可以在一定程度上降低隧道的工程造价[1]，自 1985 年加拿大第一条直线电机车辆开通运营以来，已经在多个国家得到应用。

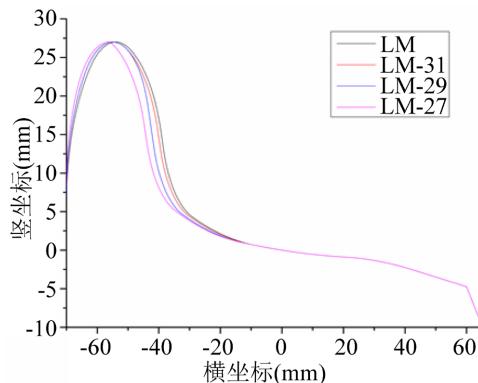
直线电机地铁车辆采用轮对进行支撑和导向、直线感应电机牵引驱动的方式，虽然不依靠轮轨黏着进行驱动，但轮轨之间的相互作用仍然对车辆的运行性能有着重要影响，一直以来备受研究者关注。熊嘉阳通过建立直线电机地铁车辆 - 轨道耦合动力学模型，研究了实测的车轮非圆化、钢轨焊接接头几何不平顺以及钢轨波磨对车辆动力学性能及电机振动的影响[2]；王晨采用动力学仿真的方法，分析计算了 LM、S1002、JM3 三种踏面轮轨匹配关系下的直线电机地铁车辆动力学性能[3]。唐宋通过安全性仿真计算、车轮镟修试验及跟踪的方式，研究了直线电机地铁车辆采用不同轮缘厚度的 LM 踏面可行性，但未考虑电机电磁力[4]。

车辆在曲线上行驶时，轮缘经常会接触到钢轨，轮缘是保持车辆沿钢轨运行防止车辆脱轨的重要组成部分。车辆在实际运行中，存在着轮缘磨耗的现象，使轮缘厚度发生变化。直线电机地铁车辆相比其它地铁车辆，线路曲线半径更小，更容易发生轮缘贴靠，因此有必要研究不同轮缘厚度对直线电机地铁车辆曲线通过性能的影响。本文基于我国正在运营的某直线电机地铁车辆，考虑电机电磁力的作用，通过 Simpack 软件建立多体动力学仿真模型，采用 Simpack 和 Matlab/Simulink 联合仿真的方法研究分析了四种不同轮缘厚度的 LM 踏面对直线电机地铁车辆曲线通过安全性的影响，为后续车轮轮缘的镟修设计和车辆实际运营中通过轮缘厚度评估安全性提供一定的理论支撑。

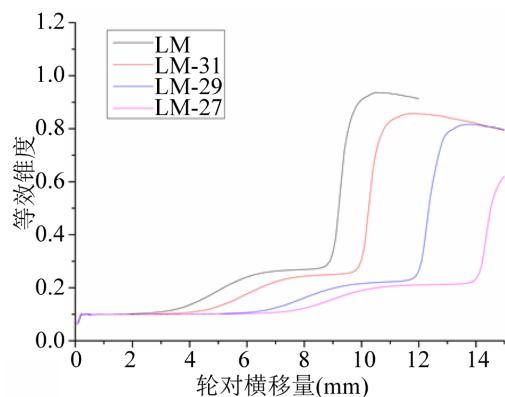
## 2. 四种不同轮缘厚度的 LM 踏面几何分析

本文所采用的四种不同轮缘厚度的 LM 踏面外形如图 1 所示，其轮缘厚度分别为 32 mm、31 mm、29 mm、27 mm，轮缘厚度 32 mm 的踏面即常见的 LM 踏面，其它三种踏面记为 LM-31、LM-29、LM-27。四种踏面由于轮缘厚度的不同，其等效锥度随轮对横移量的变化因此也会不同，等效锥度随轮对横

移量的变化如图 2 所示。



**Figure 1.** Comparison of four types of wheel tread profiles  
**图 1.** 四种车轮踏面外形比较

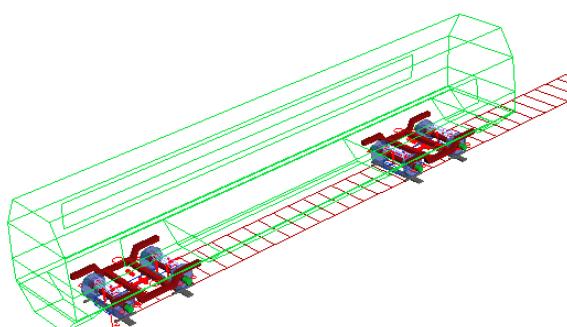


**Figure 2.** Conicity of four types of wheel tread profiles  
**图 2.** 四种车轮踏面锥度

### 3. 建立直线电机地铁车辆联合仿真模型

#### 3.1. 直线电机地铁车辆多体动力学模型

基于我国正在运营的某直线电机地铁车辆的参数，利用 Simpack 软件建立的多刚体动力学模型如图 3 所示。



**Figure 3.** Multibody dynamics model of a linear motor metro vehicle  
**图 3.** 直线电机地铁车辆多体动力学模型

该模型由 1 个车体、2 个构架、4 个轮对、8 个轴箱、8 个支撑箱、4 个均衡梁、2 个直线电机等多个刚体组成，模型拓扑图如图 4 所示。车体、构架、均衡梁和电机有 6 个独立自由度，轮对有纵向、横移、摇头和旋转 4 个自由度，轴箱和支持箱只有一个绕车轴旋转的自由度，整个系统共 86 个自由度。车辆一系采用橡胶堆定位，二系使用较大横向跨距的空气弹簧悬挂，并安装有横向液压减振器、横向止挡和牵引拉杆等，模型中充分考虑各悬挂件的非线性。钢轨采用 CN60 型钢轨，建立了车轮踏面分别为 LM、LM-31、LM-29、LM-27 的动力学模型。考虑轮轨接触几何关系非线性特性，由 Kalker 简化理论计算轮轨间作用力。车辆系统的动力学方程可以表示为

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F(\dot{y}, y, t) \quad (1)$$

式中  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵； $y$  为系统的状态变量； $t$  为时间； $F(\dot{y}, y, t)$  为车辆系统中的非线性力。

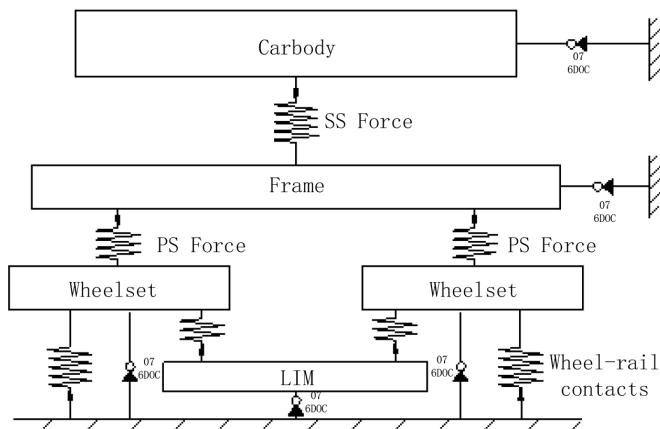


Figure 4. Topology of the vehicle multibody dynamics model

图 4. 车辆多体动力学模型拓扑图

### 3.2. 机电电磁力模型

直线感应电机相当于将传统旋转电机沿径向剖分展开，转子(即感应板)安装在轨道上，定子(即初级)固接在车辆上随车辆一起运动。直线感应电机的铁芯和线圈绕组是开断的，由此产生的各种边端效应是直线感应电机所必须考虑的。运用等效电路对直线感应电机进行分析，考虑磁场气隙、边端效应、次级感应板的导磁非线性，采用相应的修正系数进行修正，不仅可以使问题得到简化，而且可以满足计算精度的要求。

直线电机会产生纵向、垂向和横向三个方向的电磁力，其中横向电磁力较小[5]，相对于电机的质量可以忽略不计。由于本文不分析车辆纵向动力学，不考虑牵引和制动工况，故纵向电磁力不作考虑。垂向电磁力由吸引力和排斥力组成。垂向吸引力由气隙磁场储能形成，其大小与有效励磁电流的平方、励磁电感成正比。垂向排斥力是由初级电流与次级感应板上的涡流电流相互作用产生的。根据场路复量功率相等的原则，建立考虑边端效应影响的 T 型等值电路[6]-[8]，可推导出垂向电磁力的表达式为：

$$F_z = K_a L_m I_m^2 \left[ 1 - \frac{(1-e^{-Q})(3-e^{-Q})}{2Q} \right] - \frac{\mu_0 I_2^2 l}{2\pi\sigma_e} \quad (2)$$

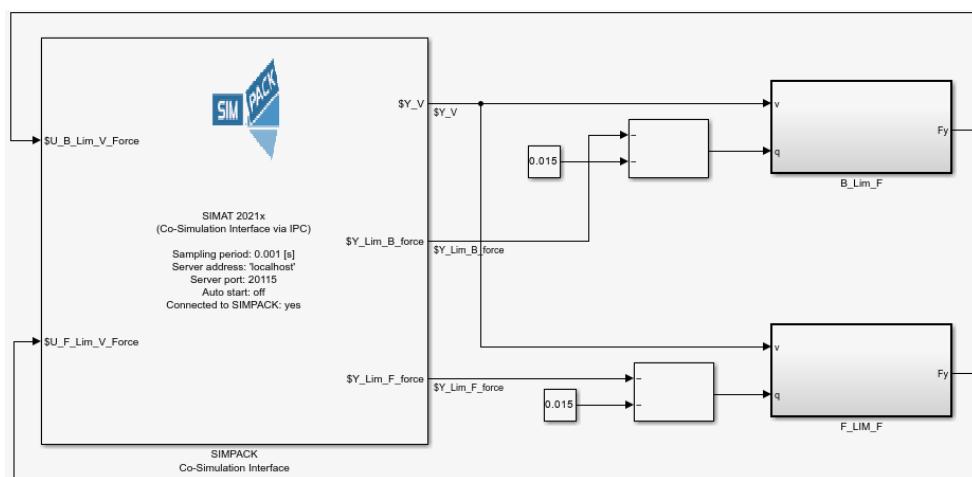
式中  $K_a$  为吸引力常数， $K_a = \frac{3}{2\sigma_e}$ ，其中  $\sigma_e$  为电机的等效电磁气隙； $L_m$  为励磁电感； $I_m$  为励磁电流； $Q$

为与电机参数、电机瞬时速度有关的参数,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $I_2$  为等效电路次级电流,  $l$  为初级绕组线圈串联总长度。

根据电机的参数和等效电路, 可得到直线电机的垂向电磁力。由式(2)可知电机的垂向电磁力与直线电机的气隙、车辆运行速度有关。在本文模型中, 将垂向电磁力以随动力元的方式作用到直线电机上。

### 3.3. 联合仿真模型

直线感应电机处于弹性悬挂系统中, 电机的振动会引起电机气隙的变化, 气隙和车辆运行速度影响着电机的垂向电磁力, 进一步引起电机的振动, 电机的振动会传递到轮对和构架上。为了考虑气隙、车辆运行速度和电机垂向电磁力的这种时变关系, 本文采用了 Simpack 与 Matlab/Simulink 联合仿真的方法, Simpack 封装模型输出直线电机气隙和车辆运行速度, 由 Matlab/Simulink 输入实时电磁力, 联合仿真模型如图 5 所示。



**Figure 5.** Co-simulation model of Simpack and Matlab/Simulink

**图 5.** Simpack 与 Matlab/Simulink 联合仿真模型

## 4. 直线电机地铁车辆曲线通过仿真结果分析

### 4.1. 曲线工况设置

车辆曲线通过性能不仅与车辆自身结构参数有关, 还与曲线半径、超高、缓和曲线以及车辆通过曲线速度等相关。曲线一般由直线 + 缓和曲线 + 圆曲线 + 缓和曲线 + 直线组成, 本文为了比较四种不同轮缘厚度的 LM 踏面对直线电机地铁车辆曲线通过性能的影响, 设置的曲线工况及曲线通过速度如表 1 所示。选择美国五级谱作为轨道激励。

**Table 1.** Curve negotiation condition settings

**表 1.** 曲线工况设置

半径(m)	超高(mm)	缓和曲线长(m)	圆曲线长(m)	顺坡率‰	车速(km/h)	欠超高(mm)
R200	0	15	100	0	10	5.9
					20	23.6
					30	53.1
					40	94.4
					50	147.5

## 4.2. 车辆曲线通过性能分析

车辆曲线通过性能一般指脱轨安全性，主要通过脱轨系数和轮重减载率来评价。评价车辆的曲线通过性能时，除了主要的脱轨系数和轮重减载率之外，有时还会关注轮轴横向力和轮轨垂向力。由于直线电机地铁车辆的特殊性，本文还分析了直线电机气隙的变化规律。

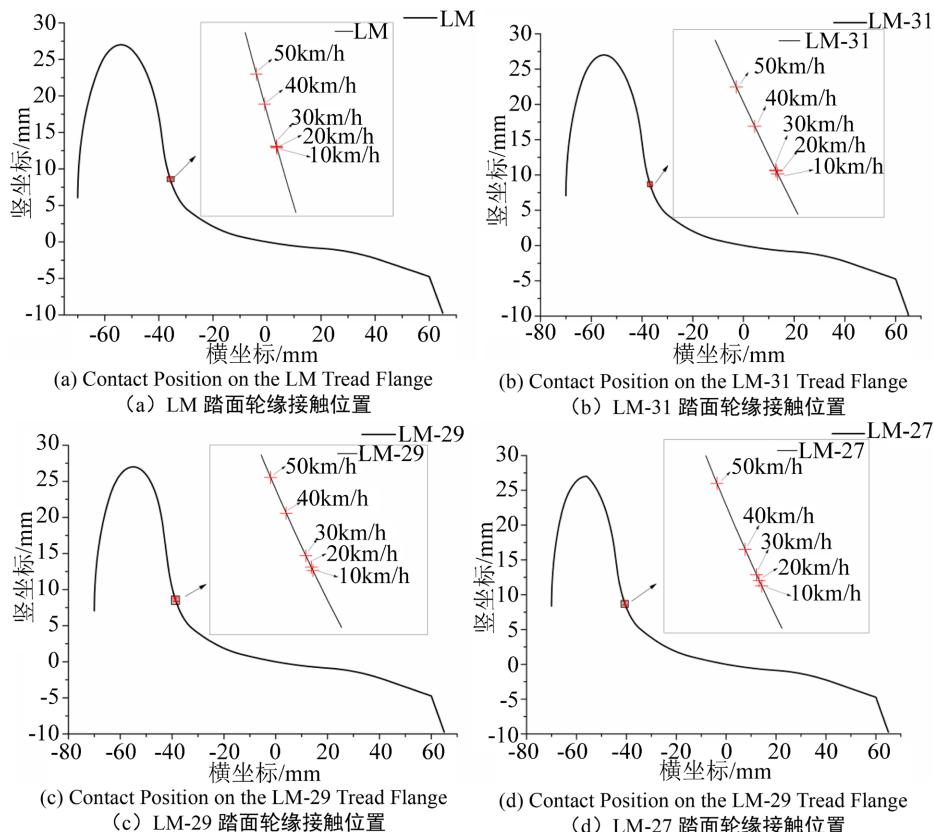
### 4.2.1. 脱轨系数

脱轨系数定义为轮轨横向力  $Q$  和垂向力  $P$  的比值，用于评定车轮轮缘是否爬上轨头而发生脱轨。我国 GB/T 5599-2019 规定，当曲线半径  $250 \text{ m} \leq R \leq 400 \text{ m}$  时，客车脱轨系数限值为 1.0，当曲线半径  $R > 400 \text{ m}$  时，客车脱轨系数限值为 0.8，没有考虑跳轨脱轨。此外，轮轨瞬时冲击钢轨也可能造成车轮跳上钢轨而发生脱轨。国外一些国家规定，当轮轨横向作用力的作用时间小于 0.05 s 时，脱轨系数可适当放宽为：

$$\frac{Q}{P} \leq \frac{0.04}{t} \quad (3)$$

式中， $t$  为轮轨横向作用力作用时间。

由上述可知，非轮缘接触和瞬时接触轮缘的脱轨系数指标若按照 GB/T 5599-2019 评价脱轨安全性是偏保守的。在分析脱轨系数时，应关注轮轨横向力的作用时间和轮轨接触位置。



**Figure 6.** Flange contact position during curve negotiation for LM treads of different thicknesses  
**图 6.** 不同厚度 LM 踏面曲线通过时轮缘接触位置

由表 1 可知，车辆以不同速度运行时，都是在欠超高的情况下通过曲线的。采用 LM 踏面不同轮缘

厚度的直线电机地铁车辆以不同速度通过小半径曲线时，轮轨接触位置如图 6 所示。可知，车辆在通过曲线时，均发生了轮缘贴靠，随着速度的增加，轮缘接触点逐渐上升。

四个轮对最大脱轨系数变化规律如图 7 所示。由图 7 可知，不存在脱轨系数超标的情况，故不用再考虑轮轨横向力的作用时间。无论车辆以低速还是较高速度通过小半径曲线时，采用 LM 踏面的车辆脱轨系数都是最大的，随着轮缘厚度的增加，车辆的脱轨系数也随之增加，而随着车辆曲线通过速度的增加，脱轨系数变化不大，采用轮缘不同厚度 LM 踏面的车辆的脱轨系数变化趋势保持一致。不同轮缘厚度对脱轨系数的影响比较明显，在相同速度下，采用 LM 踏面车辆脱轨系数相比于采用 LM-27 踏面增大均在 15.5% 左右。

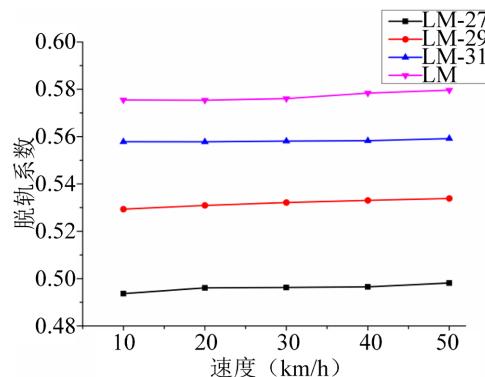


Figure 7. Derailment coefficient

图 7. 脱轨系数

#### 4.2.2. 轮重减载率

由脱轨系数超标引起的轮对脱轨的原因是由于横向力  $Q$  大而垂向力  $P$  小造成的，而在实际运用中还发现，在横向力并不很大而一侧车轮严重减载的情况下也有脱轨的可能。因此，轮重减载率也是脱轨安全性考核的一项重要指标，其计算公式为

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\frac{P_2 - P_1}{2}}{\frac{P_2 + P_1}{2}} = \frac{P_2 - P_1}{P_2 + P_1} \quad (4)$$

式中  $P$  为左右车轮平均轮轨垂向力即轮重， $\Delta P$  为轮重减载量。

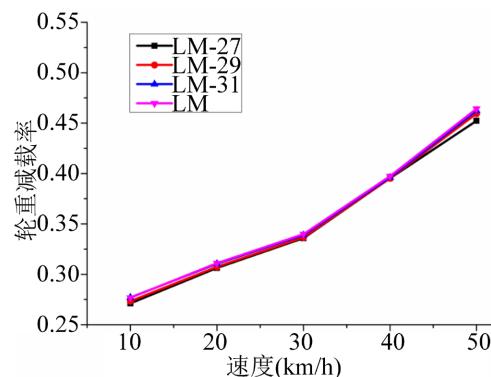


Figure 8. Wheel load reduction rate

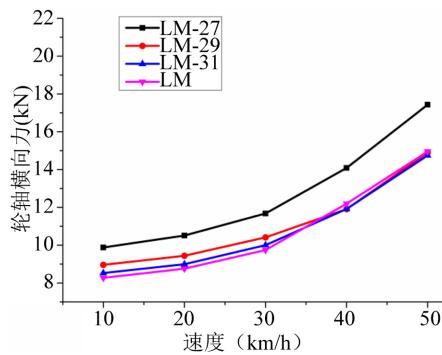
图 8. 轮重减载率

采用不同轮缘厚度 LM 踏面的直线电机地铁车辆以不同速度通过小半径曲线时，轮重减载率最大值变化规律如图 8 所示。可知，轮缘厚度不同对轮重减载率影响不大，尤其在低速时基本没影响，速度较高时，较薄轮缘厚度的轮重减载率越小。同时可以看出，速度对直线电机地铁车辆通过小半径曲线轮重减载率较大，速度增大，轮重减载率变化比较明显。

由脱轨系数和轮重减载率的变化规律可知，较小的轮缘厚度可以在一定程度上提高直线电机地铁车辆的曲线通过性能。

#### 4.2.3. 轮轴横向力

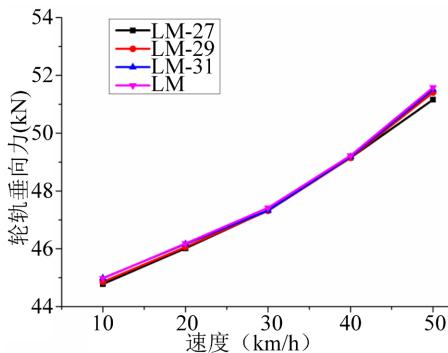
采用不同轮缘厚度的车辆以不同速度通过小半径曲线时，轮轴横向力的变化规律如图 9 所示。由图 9 可知，薄轮缘厚度对轮轴横向力的影响比较大，直线电机地铁车辆以同一速度通过曲线时，LM-27 踏面相比于 LM 踏面轮轴横向力增大在 15%~20% 之间，但 LM-29、LM-31、LM 三个踏面对轮轴横向力的影响并不显著，当车辆低速通过曲线时，随着轮缘厚度的增加，轮轴横向力逐渐减小，而较高速度通过时三者的区别不太大。同时可知，速度对轮轴横向力的影响比较明显。



**Figure 9.** Wheel-axle lateral force  
**图 9.** 轮轴横向力

#### 4.2.4. 轮轨垂向力

不同轮缘厚度对轮轨垂向力的影响如图 10 所示。可知，轮缘厚度对轮轨垂向力影响不大，速度较高时，薄轮缘踏面相比于厚轮缘踏面轮轨垂向力小。



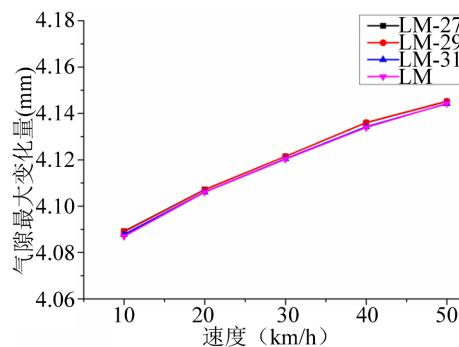
**Figure 10.** Wheel-rail vertical force  
**图 10.** 轮轨垂向力

#### 4.2.5. 直线电机气隙

气隙是直线电机地铁车辆中很重要的参数，气隙过大会导致电机的效率和功率因素较低，气隙过小

会使直线电机和感应板发生刷蹭，影响行车安全。因此，有必要分析不同轮缘厚度对直线电机地铁车辆通过小半径曲线时气隙的影响规律。

直线电机地铁车辆以不同速度通过曲线时，气隙随轮缘厚度的变化规律如图 11 所示。由图 11 可知，不同轮缘厚度对气隙的影响不大，气隙随车辆曲线通过速度的增加而有所增大。



**Figure 11.** Maximum air gap variation for different flange thicknesses  
**图 11.** 不同轮缘厚度气隙最大变化量

## 5. 结论

考虑直线电机的电磁力作用，本文利用动力学联合仿真模型分析比较了不同轮缘厚度的 LM 踏面对直线电机地铁车辆小半径曲线通过动力学的影响，得出的结论如下：

- (1) 采用 LM-27、LM-29、LM-31、LM 这 4 种踏面的直线电机地铁车辆在以不同速度通过曲线时，均发生了轮缘贴靠。随着运行速度的增加，轮缘贴靠位置上升，由此通过脱轨系数来评价脱轨安全性是合理的。
- (2) 直线电机地铁车辆通过曲线时，轮缘厚度对脱轨系数和轮轴横向力影响比较显著，对轮重减载率和轮轨垂向力影响较小。轮缘厚度的减小会使脱轨系数减小约 15.5%，轮轴横向力增加 15%~20%，而轮重减载率和轮轨垂向力在车辆在低速时基本无变化，以较高速度通过曲线时有所差异，薄轮缘厚度的车辆轮重减载率和轮轨垂向力相对较小。
- (3) 不同轮缘厚度的直线电机地铁车辆通过曲线对直线电机气隙基本无影响。

## 参考文献

- [1] 郑琼林, 赵佳, 樊嘉峰. 直线电机轮轨交通牵引传动系统[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
- [2] 熊嘉阳, 曹亚博, 吴磊, 等. 轮轨纵向几何不平顺对直线电机地铁车辆动态行为的影响[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(6): 1074-1081.
- [3] 王晨, 罗世辉, 马卫华, 等. 考虑垂向电磁力的直线电机车辆的轮轨匹配关系研究[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(2): 110-114.
- [4] 唐宋, 赵锐. 广州地铁 LM 型车轮踏面奇数轮缘厚度等级镟修研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(4): 32-37.
- [5] 刘高坤. 电磁力对直线电机地铁车辆动力学性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [6] 邓江明, 陈特放, 唐建湘, 等. 单边直线感应电动机动态最大推力输出的滑差频率优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 123-130+194.
- [7] Faiz, J. and Jagari, H. (2000) Accurate Modeling of Single-Sided Linear Induction Motor Considers End Effect and Equivalent Thickness. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36, 3785-3790. <https://doi.org/10.1109/20.908365>
- [8] 郑惠超. 直线电机推力与垂向力解耦的矢量控制研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2009.