

直线电机地铁车辆动力学性能 仿真研究的新方法

刘高坤¹, 张江¹, 王树森², 罗世辉¹, 马卫华¹

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031;
2. 长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062)



作者简介: 刘高坤(1989-)男, 硕士研究生, 从事机车车辆动力学研究。

摘要: 介绍了直线电机地铁车辆的特点, 简单分析了直线电机的三向电磁力。考虑到用有限元模拟电磁场得到电磁力在空间上分布的方法的复杂性, 结合工程实际需要, 基于直线电机推力控制方法, 提出一种新的方法, 即用直线电机牵引特性曲线模拟直线电机对车辆的作用。最后用SIMPACK 仿真牵引工况下直线电机地铁车辆的动力学性能。结果表明用该方法可以简单并且成功地对直线电机地铁车辆的动力学性能进行分析。

关键词: 直线电机; 地铁车辆; 牵引工况; 动力学性能; 仿真
中图分类号: U231; U260.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2015)02-0103-04
doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2015.02.025

New Method of Dynamics Performance Simulation for Metro Vehicle with Linear Motor

LIU Gaokun¹, ZHANG Jiang¹, WANG Shusen², LUO Shihui¹, MA Weihua¹

(1.Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;
2.CNR Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: The features of the metro vehicle with linear motor were introduced. Electromagnetic forces in three directions were simply analyzed. Considering the complexity of the method to obtain the electromagnetic force on the space distribution by simulating electromagnetic field with FEM, combined requirements of engineering practice, a new method was introduced based on the DTC control system which simulated the effect on the vehicle by using the measured traction performance curves of LIM. The dynamic performance of the metro vehicle with linear motor in traction condition were simulated in SIMPACK. The result showed that the new method could be simply and successfully applied to analyze dynamic performance of metro vehicle with linear motor.

Keywords: linear motor; metro vehicle; traction condition; dynamic performance; simulation

0 引言

直线电机(LIM)车辆是当今城市轨道交通装备的一种形式^[1]。目前, 拥有直线电机地铁技术的主要有加拿大庞巴迪以及日本川崎、日立3家公司, 典型的直线电机转向架为加拿大的MK I、MK II型转向架以及日本住友金属的电机架悬式转向架。从1985年加拿大多伦多开通第1条直线电机地铁至今, 直线电机技术先后在温哥华Skytrain、底特律DPM、大阪7号线、

东京12号线和吉隆坡地铁线路上运用, 且取得了较好的运营成果^[2]。我国先后开通的直线电机驱动的地铁车辆有广州4号线、广州5号线、首都国际机场线和广州6号线。

直线电机车辆的原理是固定在转向架的定子(一次线圈)通过交流电流, 产生移动磁场, 通过与固定在道床上的展开转子(二次线圈, 通常称为感应板)相互作用产生磁力(吸引和排斥), 实现轨道车辆的运行和制动。由于车载定子与地面转子是处在一个相对直线运动的弹性系统间, 车辆垂向振动直接导致气隙的变化, 这一变化又引起电磁法向力(即垂向吸附力)和纵向力(即牵引力)的变化^[3]。

车辆在电磁力作用下运行, 受多种因素影响, 如

收稿日期: 2014-09-01
基金项目: 国家自然科学基金(51005190); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0712); 四川省科技计划项目(2012GZ0103); 中国博士后基金一等资助(2013M540715)

牵引电机本身的电气特性、电机的励磁方式、电机速度控制方式、牵引逆变器等^[4]，用模拟电磁场得到电磁力的分布的方法非常复杂，不易进行实际运用。本文针对这一难点，结合工程实际需要，基于直线电机推理控制方法，提出一种新的方法，即用直线电机牵引特性曲线（牵引特性曲线和直线电机横向力曲线）模拟直线电机对车辆的作用，仿真牵引工况下直线电机地铁车辆的动力学性能。

2 直线电机车辆动力学仿真模型

某直线电机地铁车辆动力学模型主要由 1 个车体、2 个构架、4 条轮对、4 个轴箱、4 个电机吊挂梁、2 个 LIM、6 个牵引杆、10 个吊杆和 4 个横向拉杆等组成。车辆一系采用锥型橡胶弹簧，二系采用空气弹簧，并设有二系横向止挡等。模型考虑了各悬挂元件的非线性特性，图 1 为该直线电机地铁车辆的多体动力学模型。

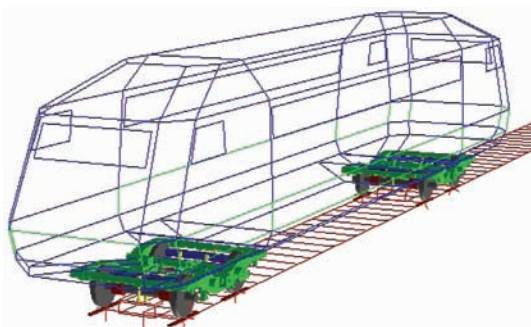


图 1 直线电机车辆的动力学模型

3 直线电机电磁力分析

本文直线电机采用单边型直线电机，次级感应板为铁铝复合结构，其感应板的宽度大于电机宽度。直线电机可以看作是旋转电机沿径向展开，旋转电机的定子对应于直线电机的初级，旋转电机的转子对应于直线电机的次级。定子中线圈产生的旋转磁场相当于直线电机初级产生的沿纵向方向的行波磁场。

从根本上来说，直线电机的初级通入三相对称正弦电流后产生正弦分布的气隙磁场。当电流交流变化时，就会产生平移的气隙磁场（行波磁场），行波磁场会在金属次级上产生感应电流，次级感应电流和气隙磁场在不同方向上的相互作用产生三向电磁力。

在纵向和法向上，感应板中的感应涡流切割行波磁场，产生一个与水平方向成一定夹角的吸引力。该力可以分解为纵向的牵引力和法向的吸引力^[5]。通过VVVF改变直线电机线圈输入端的频率和电压来改变行波磁场的速度和强度，可改变吸引力的大小与方向，从而达到控制直线电机输出力和功率的目的。

由于直线电机结构的不对称，导致电机横向边端效应的存在，使车辆在运行过程中受到一个能使车辆趋于轨道中心的横向电磁力。

由试验得到直线电机牵引工况空车状态下的纵向牵

引力和垂向力特性曲线，如图 2(a)。直线电机产生的横向力是使车辆趋于轨道中心的中力，与横向偏移量有关，文献 [6] 得到的直线电机横向力曲线如图 2(b)。

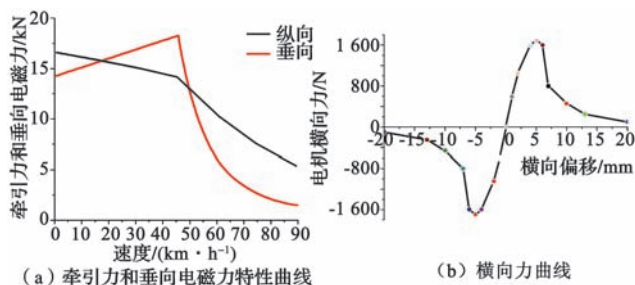


图 2 直线电机特性曲线

4 车辆运行性能分析

在 SIMPACK 中将直线电机的三向电磁力考虑为横向、垂向和纵向的 3 个力元，然后在 MATLAB 中将直线电机的三向电磁力与速度和横向偏移量的关系用函数表达，并在 SIMPACK 的表达式 Expression 中输入以上的函数关系，进行动力学仿真。

4.1 启动工况下车辆振动状况

与普通旋转电机驱动的车辆不同，直线电机产生的牵引力通过一个纵向牵引杆传递给构架，然后通过构架传递到车体。仿真过程中发现当车辆受到三向电磁力下启动时，也会受到启动冲击。

启动时（不考虑轨道不平顺激励），车辆每个直线电机牵引力由 0 逐渐增加到 14.6 kN，制动力由 14.6 kN 约 3 s 减小到 0，轮对和车体的纵向加速度如图 3。

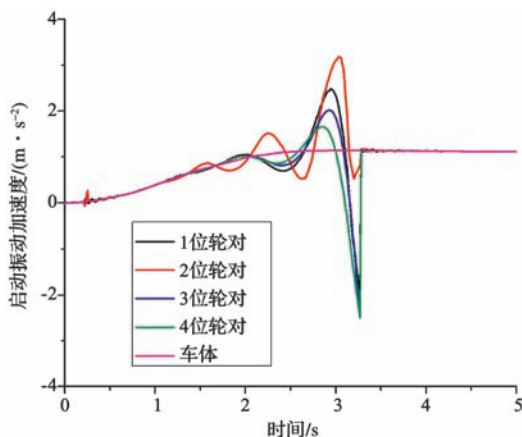


图 3 轮对和车体纵向加速度

由图 3 可以看出，启动时轮对会受到瞬时冲击，使轮对的纵向振动加速度约为 3 m/s^2 ，启动冲击经由牵引杆、空气弹簧后对车体基本没有影响，使车体能够平稳加速。

4.2 车辆动力学性能分析

考虑纵向牵引力、垂向吸引力和横向对中力同时作用时，分析在 AAR5 级谱激励下车辆的动力学性能。

4.2.1 直线运行性能

车辆在直线上运行稳定性分析评价指标为蛇行临