

直线电机轨道交通牵引系统研究与试验

李 莉¹, 张瑞华², 杜玉梅², 葛琼璇², 王 珂²

(1. 北京市地铁运营有限公司 车辆部, 北京 100044;
2. 中国科学院电工研究所 电力电子与电力驱动重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 详细介绍了直线电机轨道交通牵引系统的研究方法、技术方案与综合试验, 通过试验结果及与进口产品的对比分析, 证明了研究方法与技术方案的可行性。从研究数据可以看出, 在相同的工况下, 国产化牵引系统的牵引性能、制动性能均与进口设备相当, 国产化的牵引系统具备了全面代替进口系统的能力。

关键词: 直线感应电机; 牵引系统; 制动性能; 国产化; 轨道交通

中图分类号: TM359.4; U231

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.06.021

Research and Experiment on Rail Transit Linear Motor Vehicle Traction System

LI Li¹, ZHANG Ruihua², DU Yumei², GE Qiongxuan², WANG Ke²

(1. Vehicle Department, Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The research method, the technical scheme and the comprehensive test of domestic traction system for linear motor rail transit was introduced in detail. Through the test results and the comparison with the imported products, the feasibility of the research method and the technical scheme was validated. It was shown that domestic traction system was equal to the imported device in traction and brake performance, which could replace the imported system completely.

Keywords: linear induction motor; traction system; brake performance; localization; rail transit

0 引言

直线电机轨道交通采用直线感应电机牵引、轮轨支撑, 具有爬坡能力强、受环境影响小、建设成本低等显著优点, 是城市轨道交通和城镇化建设的一种重要的交通型式。目前, 日本和加拿大对直线电机车辆牵引系统进行了大量研究并各自开发出产品, 我国广州地铁4号线、5号线、6号线、北京地铁机场线采用了直线电机轨道交通^[1-2], 大功率直线感应电机电磁计算困难, 牵引控制难度较大, 急需进行牵引系统的国产化研究。

本文主要介绍直线电机车辆牵引系统的核心设备牵引直线电机、牵引变流器和牵引控制系统的技术方案

与综合试验, 并与进口产品性能进行了对比分析, 对推进直线电机轨道交通核心设备完全国产化, 提升我国在新型轨道交通技术领域的自主创新能力有重要意义。

1 牵引直线电机

牵引直线电机采用三相直线感应电动机, 由初级及次级构成, 为单边短初级结构形式。电机的初级安装在车辆转向架上, 每台转向架悬挂2台直线电机初级, 次级安装在轨道上。电机初级由高性能硅钢片叠成的带齿槽铁心及嵌入槽中三相绕组构成, 采用三点悬挂方式固定在转向架上, 电机所产生的推力及法向力由3个悬挂端传递给车体。初级的悬挂高度可以通过偏心凸轮进行调节, 以使初级与次级之间的气隙保持在规定范围内。

牵引直线感应电机是一个非线性、强耦合的时变

系统,其励磁电感和次级电阻等重要参数随车辆速度、气隙大小等而变化,并影响着电机的牵引特性。与旋转电机结构不同,直线感应电机存在动、静态纵向端部效应、横向端部效应、边端极“半填充槽”、电磁气隙大、次级反应板的集肤效应等问题,其理论分析和特性计算更为困难和复杂。为了获得较准确的运行特性,不能忽略其结构所带来的特殊性,因此,需对等效电路进行修正^[3],采用修正系数反映电机纵向和横向边端效应、初级端部半填充槽、集肤效应等特性的影响。

①次级相电阻纵向动态端部效应修正系数:

$$K_r'(s)=\frac{sG}{2p_e\tau\sqrt{1+(sG)^2}}\frac{C_1^2+C_2^2}{C_1}$$
 (1)

②每相磁化电抗纵向动态端部效应修正系数:

$$K_x'(s)=\frac{1}{2p_e\tau\sqrt{1+(sG)^2}}\frac{C_1^2+C_2^2}{C_2}$$
 (2)

③次级相电阻的第 2 种横向端部效应修正系数:

$$C_r(s)=\frac{sG\{Re^2[T]+Im^2[T]\}}{Re[T]}$$
 (3)

④次级磁化电抗的第 2 种横向端部效应修正系数:

$$C_x(s)=\frac{Re^2[T]+Im^2[T]}{Im[T]}$$
 (4)

⑤“半填充槽”影响是采用等效极对数 p_e 取代实际极对数 p 及初级绕组“缩减系数” α_w 进行考虑:

$$p_e=\frac{(2p-1)^2}{4p-3+\varepsilon/(mq)}$$
 (5)

$$\alpha_w=\frac{2p-1.5+\varepsilon/(2mq)}{2p-1}$$
 (6)

上述式(1)~式(6)中: τ 为极距; s 为滑差率; G 为品质因数; p_e 为等效极对数; p 为极对数; ε 为短距的槽数; q 为每极每相槽数; C_1 、 C_2 、 T 为过渡变量,是电机结构参数、滑差率、初级频率、极数、品质因数等的函数。

考虑直线感应电动机的端部效应、集肤效应及端部半填充槽等结构特点的 T 型等效电路如图 1 所示,以

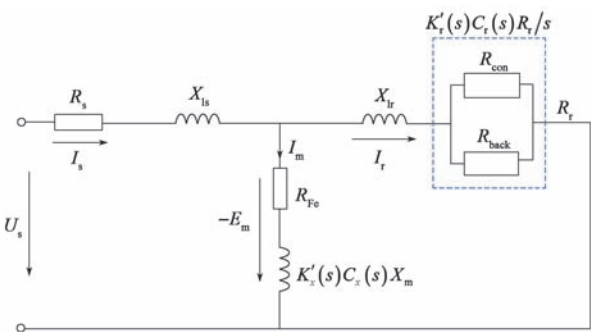


图 1 改进的 T 型等效电路

此为基础进行了牵引直线感应电机的特性计算。

国产化牵引直线电机计算的运行特性如图 2~图 3 所示(直流母线电压 750 V 时)。

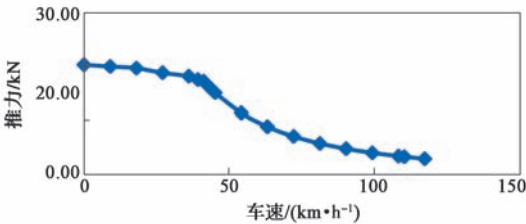


图 2 推力—速度特性

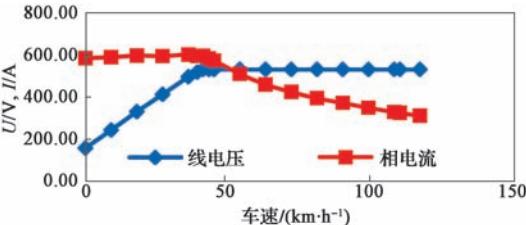


图 3 线电压、电流—速度特性

在研制了大功率牵引直线感应电机后,并对其进行了充分的试验测试,频率为 6.5 Hz 时堵转试验的结果以及与计算值的对比见图 4。可以看出计算值与堵转试验结果基本吻合,说明牵引直线电机电磁计算与电磁设计的有效性,进一步表明采用的理论方法与建立的数学模型的正确性。国产化牵引直线电机主要技术参数见表 1。

表 1 牵引直线电机技术参数表	
项目	参数值
额定电压	550 V
持续电流	400 A
启动频率	6.5 Hz
最大电流	650 A
额定功率	200 kW

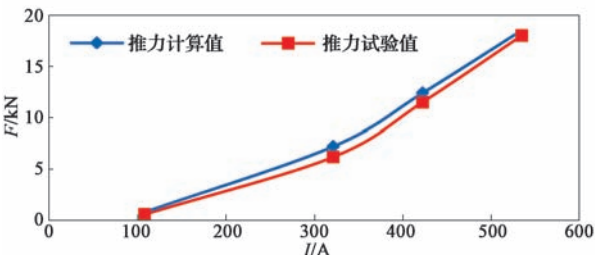


图 4 推力—电流特性(启动频率 6.5 Hz)

2 牵引变流器

直线电机轨道交通采用每台牵引变流器向本车的 2 台直线电机供电的方式。牵引变流器输入电压为直流 750 V,输出为三相可变频变压的交流电。国产化牵引变流器主电路采用二电平电压型直—交逆变电路,如图 5 所示。主要包括直流进线环节、直流电容环节、过压斩波电路、三相逆变功率电路、牵引控制单元和电压、电流传感器以及风机、电源等辅助设备。

国产化驱动变流器的基本技术参数如表 2。

国产化牵引变

表 2 牵引变流器技术参数表

项目	参数
输入电压	额定 DC 750 V (500~900 V 范围波动)
容量	1.3 MVA
额定输出电流	2×400 A
输出频率范围	0~75 Hz
最高开关频率	1 000 Hz

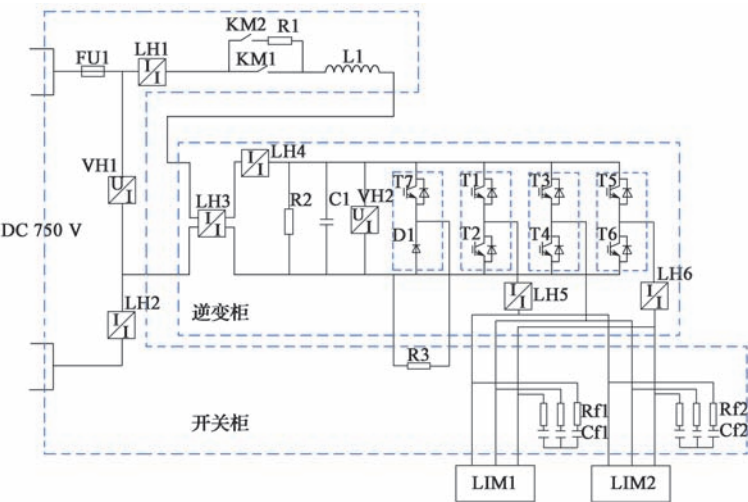


图 5 国产化牵引变流器主电路原理图

流器逆变输出电流有效值 1 320 A（峰值 1 866 A）时，长时间稳定运行，试验波形如图 6 所示。

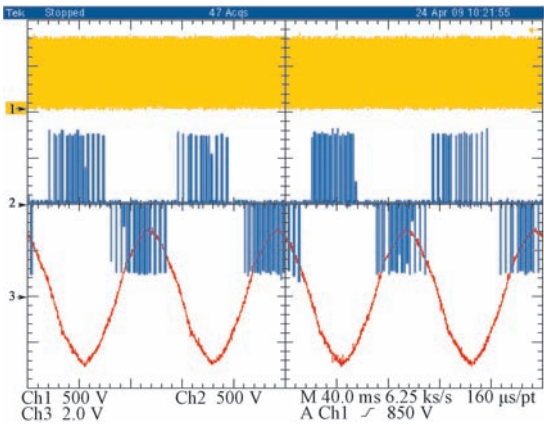


图 6 逆变器输出电压电流试验波形

3 牵引控制策略及其功能特点

由于电机特性及数学模型的差异，直线感应电机磁场定向控制与旋转感应电机有所不同，由于边端效应的存在，加大了牵引控制的难度，此外，由于直线感应电机机械气隙较大，致使电机运行效率较低^[4]。

国产化牵引控制采用了高性能的磁场定向控制方法如图 7 所示。分别控制 I_{ds} 和 I_{qs} 实现了励磁与牵引力的解耦控制，可得到稳定的牵引力输出。

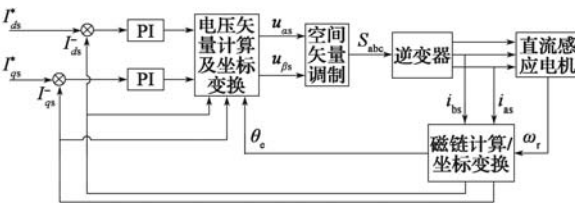
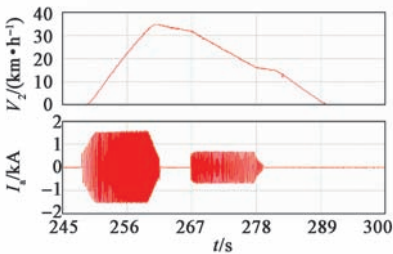


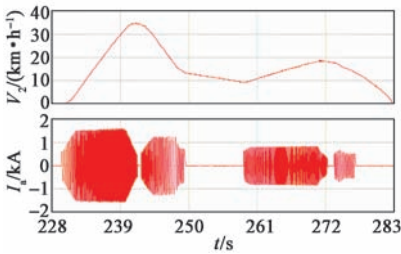
图 7 磁场定向控制框图

国产化的直线电机轨道交通牵引控制系统针对牵引直线感应电机特点加入了参数在线辨识和边缘效应补偿控制策略，边缘效应对控制特性的影响由磁链补偿环节和力矩补偿环节得以消除。为了验证改进后的控制策略对控制效果的影响，在同样的运行工况下，加速度设定值一致，分别对改进前后的控制效果进行

了对比试验。图 8 是实测的控制策略改进前后的速度及电流曲线，可以看出控制策略改进后，动态响应比改进前显著提高，数据的对比分析见表 3 所示。



(a) 控制策略改进前



(b) 控制策略改进后

图 8 控制效果对比图

图 9 所示为最高速度为 0~100 km/h 的牵引制动全过程试验波形（从上至下分别为速度、相电流、母线电压、母线电流波形）。从图中可以看出在直线电机车辆启动、牵引、惰行、制动运行全过程中直流电压、直流电流及变流器输出电流均保持稳定，牵引及电制

表 3 不同控制策略下
试验结果对比表

控制策略	加速时间 /s	最大级位平均 加速度/(m·s ⁻²)
改进前	9.57	0.883
改进后	8.82	0.995

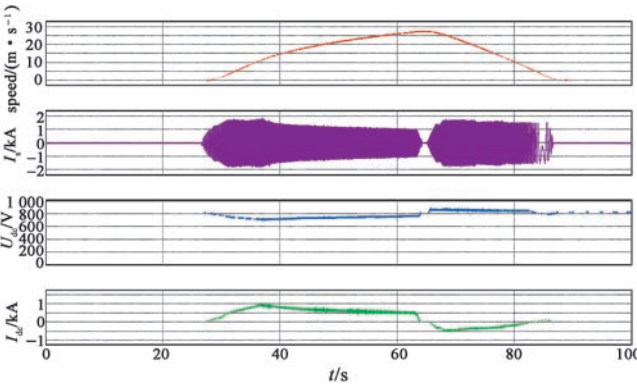


图 9 0~100 km/h 牵引制动运行试验波形

4 运行试验结果

国产化牵引系统已经完成了运行试验，最高运行速度达 100 km/h。为了与进口产品进行对比分析，在 1 列 4 车编组的直线电机车辆上，用 1 套完全国产化的牵引系统替换 1 套进口系统，对 1 套国产化牵引系统与 3 套进口牵引系统同车混用的情况进行试验，以验证国产化牵引系统对进口产品的替换性。

国产化牵引系统单独牵引整列车与进口牵引系统单独牵引整列车0~20 km/h的加速度对比如表4所示, 20~0 km/h的减速度对比如表5所示, 加减速度的对比分析见表6所示。从表中数据可以看出, 在相同的工况下, 国产化牵引系统的牵引性能、制动性能均与进口设备相当, 国产化的牵引系统具备了全面代替进口系统的能力。

表4 0~20 km/h 加速度对比 m/s²

序号	国产牵引系统	进口牵引系统
第1次	0.380	0.381
第2次	0.395	0.390
第3次	0.376	0.385
平均值	0.384	0.385

表5 20~0km/h 减速度对比 m/s²

序号	国产牵引系统	进口牵引系统
第1次	0.369	0.370
第2次	0.381	0.372
第3次	0.375	0.368
平均值	0.375	0.370

表6 0~20 km/h 加减速速度对比结果 m/s²

系统	0~20 km/h 加速度	20~0 km/h 减速度
国产牵引系统	0.384	0.375
进口牵引系统	0.385	0.370
对比	-0.26%	+1.35%

在AW2工况下, 车辆0~100 km/h的平均加速度为0.543 m/s², 0~55 km/h的平均加速度为1.02 m/s², 指标均满足车辆基本技术条件加速度要求。

为了试验列车的爬坡能力, 在46‰坡道处, 对列车

AW3工况下的爬坡能力进行了试验, 列车0~10 km/h速度范围内, 平均加速大于0.50 m/s², 直线电机轨道交通有很强的爬坡能力。

图10是同车运行的国产化牵引系统与进口牵引系统的电流对比图, 各曲线从上到下依次为: ①列车速度; ②国产化电机1电流; ③国产化电机2电流; ④进口电机1电流; ⑤进口电机2电流。从图10中可以看出, 国产化牵引系统与进口系统电流特性一致, 进一步说明了国产化设备具有对进口产品的替代性。

5 结语

本文主要介绍了国产化直线电机轨道交通牵引系统的研究方法、技术方案与综合试验, 并将试验结果与进口系统进行了对比分析, 证明了国产化牵引系统研究方法与技术方案的可行性以及国产化设备对进口产品的替代性, 有利于推进直线电机轨道交通核心设备完全国产化, 提升我国在新型轨道交通技术领域的自主创新能力。

参考文献:

[1] 黄书荣, 徐伟. 轨道交通用直线感应电机发展状况综述 [J]. 新型工业化, 2015(5): 15-21.

[2] 游高祥. 广州地铁6号线直线电机车辆技术及与4号线和5号线车辆的区别 [J]. 机车电传动, 2012(3): 49-53.

[3] 龙退令. 直线感应电动机的理论和电磁设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[4] 王珂. 轨道交通直线感应电机特性分析与直接牵引力控制策略研究 [D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2009.

[5] Liu Q, Zhang R H. Performance comparison of control methods for high speed long primary double-sided linear induction motor [J]. IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, 2014(10): 1308-1312.

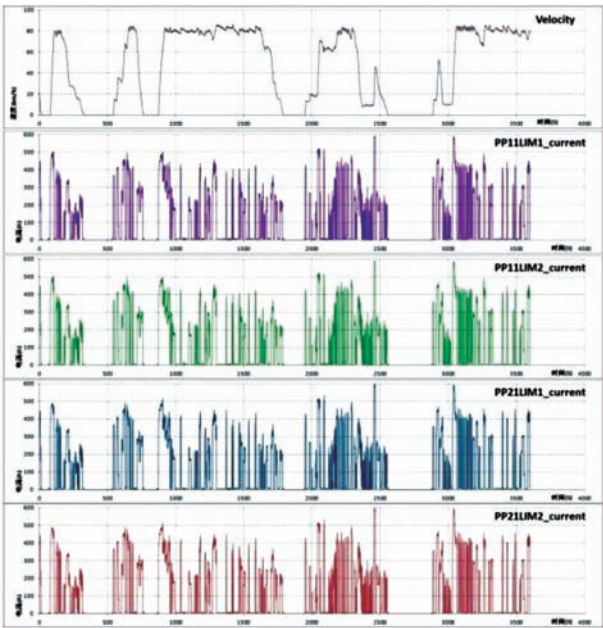


图10 直线电机电流曲线



作者简介: 李莉(1967-), 女, 高级工程师, 从事地铁车辆维修、运营及技术管理工作。