

直线电机地铁车辆牵引系统国产化应用研究^{*}

崔霆锐, 宗立明, 李 熙

(北京市地铁运营有限公司 地铁运营技术研发中心, 北京 102208)

摘 要:为解决国内直线电机(LIM)轨道交通牵引传动系统关键技术及备品备件完全依赖进口、维修维护困难、车辆运营成本高的现状,研究开发了具有完全自主知识产权的大功率强迫风冷式 LIM 牵引变流器系统。针对 LIM 特殊结构引起的边端效应等问题对传统间接磁场定向矢量控制方式进行了优化。考虑到 LIM 次级时间常数发生变化对磁场定向的影响,导致转矩控制性能下降,提出了一种基于最小电流的参数在线辨识方法。所提方法计算简单、不依赖于电机其他参数,试验台测试结果证明了该算法的准确性和有效性。在地铁实际运营线路的试验结果表明,国产化牵引变流器各项性能满足车辆技术要求,而且效率等部分指标优于原车进口牵引系。

关键词: 牵引变流器; 直线电机; 参数辨识; 矢量控制; 城市轨道交通

中图分类号: TM 359.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)04-0061-06

Localization Research on LIM Traction System of Subway Vehicle^{*}

CUI Tingrui, ZONG Liming, LI Xi

(Subway Operation Technology Center, Beijing Mass Transit railway Operation Corporation Ltd.,
Beijing 102208, China)

Abstract: Aiming at problems that the critical techniques and vehicle spare parts completely dependent on import in domestic rail transit of linear induction motor (LIM) traction drive, as well as the difficulties of repair maintenance, and the high costs of vehicle operation, a high-power, forced air-cooled LIM traction converter system was researched and developed with completely independent intellectual property rights. Against the end effect and other problems caused by the special structure of LIM, an optimal scheme of indirect field-oriented vector control was proposed. And the change of LIM secondary time constant had a great influence on the field-oriented control, which results in torque performance degradation. Therefore an online parameter identification method based on the minimum current was presented. It had advantages of simple calculation and not relying on other motor parameters. Experiment results of test bench demonstrate the accuracy and validity. The experiments results in an actual operation subway line showed that the performance of localization traction converter fully meets the vehicle technical requirements. And some indicators such as efficiency were even better than the imported one.

Key words: traction converter; linear induction motor (LIM); parameter identification; vector control; urban rail transit

0 引 言

直线电机(Linear Induction Motor, LIM)轨道交通模式相比传统轮轨运载系统具有显著优点,

例如不受黏着因素的制约、突出的爬坡能力、曲线半径小、工程造价低、噪声和振动小等^[1]。目前全世界运营和在建的 LIM 驱动轨道交通线路达 20 余条。国内包括北京地铁机场线在内的 4 条 LIM

^{*} 基金项目: 科技部“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAG13B01); 科技部“十二五”国家科技支撑计划课题(2015BAG12B02)

作者简介: 崔霆锐(1982—),女,工程师,研究方向为电力电子与电力传动。

宗立明(1981—),男,高级工程师,研究方向为机械设计制造及其自动化领域。

李 熙(1981—),男,博士后,高级工程师,研究方向为交通信息工程及控制领域。

地铁线路,其牵引传动系统均由国外引进,关键技术及备品备件完全依赖进口,造成车辆维修维护困难、运营成本较高。

为响应国务院和发改委关于“城市轨道交通车辆平均国产化率不低于 70%,牵引系统国产化率应达到 40% 以上”的号召,在借鉴国外技术的基础上,国内首次开展了具有自主知识产权的大功率强迫风冷式 LIM 牵引变流器系统研发,并在北京地铁机场线完成了静态调试及测试试验,目前正处于载客运营考核阶段。

1 控制系统技术方案

机场线原型车的加拿大 Mark-I 和 Mark-II 系统的直线牵引电机控制采用基于转差频率的开环变压变频 (Variable Voltage Variable Frequency, VVVF) 控制模式。在基速 12 m/s 以下, 保持转差频率为 5 Hz, 由于边缘效应的影响, 牵引力略有下降; 而基速以上, 初级电压不能再升高, 维持转差率不变, 初级电流频率随速度升高而升高, 电机处于近似恒功率运行, 牵引力随速度升高下降

明显。

1.1 优化的矢量控制技术

相比于机场线原系统的VVVF开环控制,国产化牵引变流器控制单元(Traction Control Unit, TCU)采用先进的矢量控制技术^[2-5],控制原理如图1所示。

国产牵引系统通过优化的间接磁场定向矢量控制方法,在低速起动区采用空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)方法,充分利用开关频率,尽可能地降低了VVVF逆变器输出电流的谐波含量,保证牵引传动系统工作在较低的噪声范围内;在高速区和恒功区采用9次谐波消除和3次谐波消除相结合的调制方式(9-3次SHE),最终过渡到方波输出模式,在保证牵引性能的同时有效降低了噪声和损耗,增加了系统可靠性。并针对LIM纵横向边端效应^[6-7]、集肤效应、温度等因素导致的电机参数变化问题研究了次级时间常数在线辨识算法,实时在线计算最优转差频率,达到对转矩的精准控制和提升能效的目的。

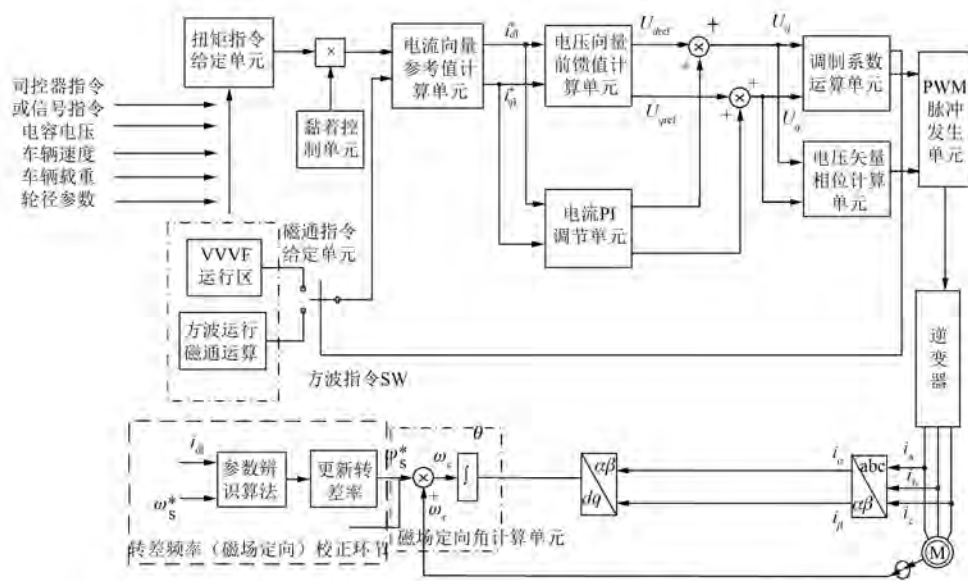


图 1 牵引控制单元控制原理图

1.2 车辆级控制功能

TCU 完成 LIM 的实时控制,同时具备完整的牵引变流系统故障保护功能、模块级的故障自诊断功能和一定程度的故障自复位功能以及部分车辆级控制功能,如图 2 所示。TCU 是组成列车通

信网络的一部分,与多功能车辆总线采用 CANOPEN 网络接口进行通信^[8]。TCU 中设置自诊断模块,具备运行数据和故障数据的记录功能,自诊断网络采用 CAN 网总线进行通信。

TCU 根据司机指令或信号指令(无人驾驶模

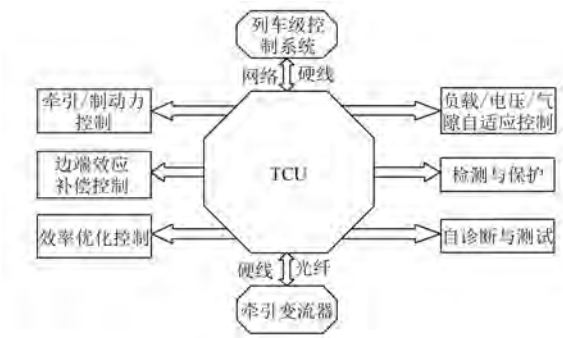


图2 TCU 车辆级控制功能框图

式 DTO) 完成对地铁列车牵引、制动特性控制和逻辑控制,实现对主电路中接触器的通断控制和牵引逆变器的起/停控制,计算列车所需的牵引、电制动力等。

2 次级时间常数在线辨识

LIM 特殊结构的边端效应、温度变化等使电机次级时间常数 T_r 发生变化,导致磁场定向有偏差,从而励磁电流分量和转矩电流分量不能实现完全解耦,因此电机动态性能降低,转矩会产生稳态误差和瞬时脉动^[9]。因此,需要对 T_r 进行在线辨识。

针对参数辨识,目前国内外学者提出了很多方法。其中离线辨识只适用于 LIM 低速运行、动态边端效应不明显的情况。在线辨识方法中的模型参考自适应法 (Model Reference Adaptive System, MRAS) 应用较为广泛,其工作原理是检测参考模型和可调模型之间的误差信号,用于修正辨识值直至误差信号趋于零,但这种方法本身也依赖于电机其他一些参数,影响辨识精度^[10-12]。本文提出的基于最小电流的参数在线辨识方法,计算简单、不依赖电机其他参数。

2.1 基于最小电流的参数辨识算法

间接磁场定向控制下,转差频率为 ω_{sl} ,次级回路阻抗角为 ϕ_2 ,且 $\arctan\phi_2 = \omega_{sl}/T_r$,计算得到的牵引力方程如下:

$$F^* = \frac{3\pi L_m}{2\tau L_r} \psi_{d2}^* \cdot i_{q1}^* = \frac{3\pi L_m}{2\tau L_r} I_m^2 \cdot \cos\phi_2^* \sin\phi_2^* \quad (1)$$

式中:“*”——指令值(计算值);

τ ——电机极距;

L_r ——次级电感;

L_m ——励磁电感;

ψ_{d2} ——次级磁链 d 轴分量;

i_{q1} ——初级电流 q 轴分量;

I_m ——励磁电流;

ϕ_2 ——电机次级回路阻抗角。

当磁场定向正确时,初级电流夹角 γ 等于 ϕ_2 ,且 $\arctan\gamma = i_{q1}/i_{d1}$, i_{d1} 为初级电流 d 轴分量。当次级时间常数 T_r 发生变化导致阻抗角实际值 ϕ_2 不等于指令值 ϕ_2^* ,实际牵引力为

$$F = \frac{3\pi L_m}{2\tau L_r} \psi_{d2} \cdot i_{q1} = \frac{3\pi L_m}{2\tau L_r} I_m^2 \cdot \cos\gamma \sin\gamma \quad (2)$$

计算牵引力与实际值之比为

$$\frac{F^*}{F} = \frac{\sin 2\phi_2^*}{\sin 2\gamma} \quad (3)$$

根据式(3)可以推导出不同磁链角度偏差对应的牵引力变化规律,如表 1 所示。

表 1 实际牵引力随磁链角偏差变化规律

磁链角	滞后 ($\phi_2^* < \phi_2$)	超前 ($\phi_2^* > \phi_2$)
$i_{d1} > i_{q1}$	减小	增大
$i_{d1} = i_{q1}$	减小	减小
$i_{d1} < i_{q1}$	增大	减小

由表 1 可知,当初级电流励磁和转矩分量不相等时,牵引力随次级磁链角偏差递增或递减。但是当两分量相等时,无论次级磁链角有正或负的偏差,牵引力都会减小,牵引力只有在磁链角定向正确时才取最大值;换句话说,如果负载力矩恒定,只有磁链角定向正确时所需的输入电流值最小。利用这一原理,得到了一种基于最小电流的次级时间常数辨识方法,算法流程如图 3 所示。

这种辨识方法首先要保持初级励磁电流指令值 i_{d1}^* 与转矩电流指令值 i_{q1}^* 相等,其中 i_{q1}^* 由电机转速 v 计算得到。先根据式(4)给出转差频率初始值:

$$\omega_{sl} = \frac{1}{T_r} \frac{i_{q1}}{i_{d1}} \quad (4)$$

辨识算法起动的条件是判断电机是否处于稳态。如果电机速度稳定则通过改变转差频率,也就是次级时间常数,一维全局寻优搜索最小电机输入电流值。其算法流程如图 4 所示。

例如搜索时增加次级时间常数指令值 T_r^* ,即减小 ω_{sl} ,如果此时电机输入电流减小则说明搜索

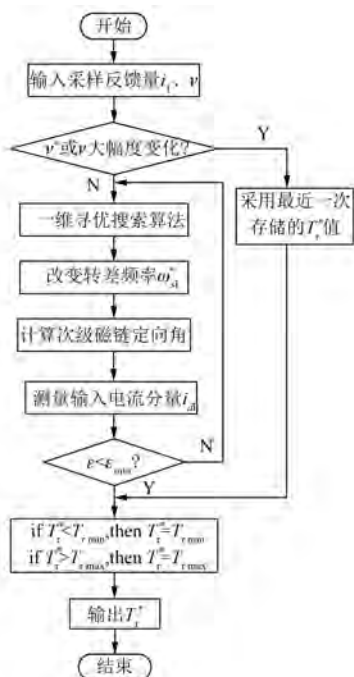
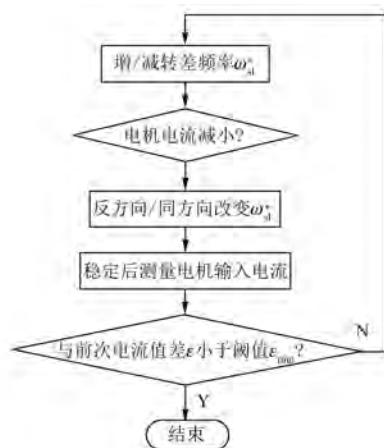
图3 基于最小电流的 T_r 辨识算法流程图

图4 一维全局寻优搜索算法流程图

方向正确,下一步继续增加 T_r^* ;反之如果电机电流变大,则下一步反方向搜索,减小 T_r^* 。如此循环直至搜索到的 i_{d1} 误差小于阈值 $\varepsilon_{\min}$,指令值 T_r^* 最终逼近实际值 T_r ,参数辨识过程结束。为预防满载过流等问题限定了辨识值 T_r^* 范围为 $[T_{r\min}^*, T_{r\max}^*]$ 。

2.2 在线辨识试验结果

为验证提出的参数辨识方法,在 LIM 轨道交通模拟试验平台进行试验。该平台由 12 kW 弧形直线感应电机、牵引力和法向力测量装置、牵引

变流器、牵引控制器及负载系统组成。为模拟次级时间常数变化,控制器内在 0.4 s 和 1.8 s 时刻分别设定指令值 T_r^* 阶跃升高和降低 50%。将观测的变量保存为数据,再将数据导入 MATLAB 软件绘制试验波形如图 5 所示。

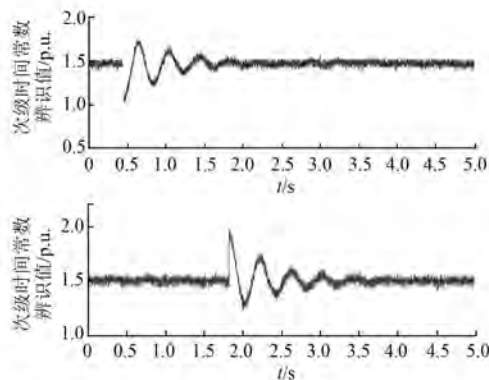


图5 参数辨识算法试验波形

电机在真实的工作环境下,次级时间常数 T_r 不会随温度等因素发生如此剧烈变化。这里的阶跃突变是一种极端情况,为了表明辨识算法的有效性。图 5 的试验结果表明次级时间常数辨识值能够快速、准确追踪真实值。

所提出的基于最小电流的参数辨识算法不仅具有良好的收敛性,而且计算简单、无需检测输入电压值,算法本身不依赖于电机其他参数,可靠性更高。

3 电气回路系统方案设计

设计研发的国产化牵引变流器为强迫风冷式,输入电压为直流 750 V,输出为三相可变频变压的交流电压。每台牵引变流器驱动每节地铁车辆的 2 台直线电机。牵引系统由高压箱和逆变柜组成。在高压柜和逆变柜之间增加一个连接器用于两者的信号传输,同时在逆变柜上增加一个测试端口便于后期运营维护。

3.1 高压箱技术方案

高压箱主要组成部分如下。

(1) 输入侧电流电压检测单元,用于将直流侧模拟信号转换成数字信号给控制硬件系统。

(2) 预充电回路,为逆变柜支撑电容充电,由充电接触器、主接触器和充电电阻构成。

(3) 输入电抗器部分,是主电路一部分,与

直流回路支撑电容器组成滤波单元。用来限制直流侧滤波单元的电压、电流波动,吸收直流输入端的谐波电压,抑制逆变器对输入电源网的干扰。

(4) 输出侧滤波单元由吸收电阻、滤波电容和磁环构成,用来抑制或滤除电压、电流尖峰。

(5) 斩波电阻部分,通过斩波模块控制吸收牵引系统在制动过程中电机释放的能量。

3.2 逆变柜技术方案

逆变柜主要组成部分如下。

(1) 支撑电容部分,与线路电抗器组成滤波单元。

(2) IGBT 功率模块,集成了散热器、温度传感器、IGBT 门控单元等元器件。IGBT 元件之间及与支撑电容的连接使用低电感母排(Busbar),减少了线路上的杂散电感,降低了开关元件在快速关断过程中产生的尖峰过电压,因此这种设计的优点是省去了用于吸收过电压的缓冲电路,使电路更为简洁可靠。从牵引控制单元(TCU)到逆变器模块的 IGBT 门控单元间的信号传输采用光纤,很好地解决了高压隔离问题,并提高了抗干扰性能。

(3) IGBT 斩波模块,能够抑制因空转或其他原因引起的瞬时过电压;再生制动时,能够吸收再生制动能量,确保再生制动的稳定进行。

4 运营线路试验分析

为了考核国产化牵引变流器的性能,选择北京地铁机场线实际运营线路,在一列四车编组(+A1-B1-B2-A2+)的直线电机车辆(A1 车)上,用 1 套国产化牵引变流器系统替换 1 套进口系统,为 2 台直线电机供电,对 1 套国产化牵引变流器与 3 套进口牵引变流器同车组混用的情况进行试验。

4.1 试验方案设计

整个试验包括调试及测试两部分,如表 2 所示。调试试验主要是在列车空载情况下调试国产化牵引变流器的控制参数,使之与同车安装的进口牵引变流器输出性能一致。测试试验包括空载(AW0)和超员(AW3)两种工况,AW3 工况加载 56.8 t 沙袋模拟。

表 2 国产化牵引变流器装车试验项目

试验地点	载荷	试验内容
库内静调	AW0	(1)接口功能测试;
		(2)高压逻辑功能测试;
		(3)脉冲触发功能测试
车辆段内 低速动调	AW0	(1)速度接口测试;
		(2)低速牵引制动功能试验;
		(3)整车低速牵引制动一致性试验
	AW0	(1)0~100 km/h 牵引制动特性试验;
		(2)整车级位变化特性试验;
		(3)整车全线运行试验及温升测试
正线动调	AW0	空载特性对比:
		(1)单台国产与单台进口牵引变流器牵引制动特性对比;
		(2)单台国产加单台进口与 2 台进口牵引变流器运行特性对比
	AW3	(1)满载特性对比;
		(2)坡道起动能力测试;
		(3)故障运行能力测试

4.2 数据采集方案

牵引变流器装车试验中数据采集有两个渠道,一个是列车 CANOPEN 网络数据,优点是可以同时保存多节车的数据作为对比;另一个是国产化牵引变流器控制器(TCU)上传的自身数据,作用是当其他进口车单独牵引列车时,A1 车国产化牵引变流器仍然可以采集其速度数据,数据来源和 A1 车单独牵引时相同,这样速度及加减速度的对比更准确和更具有说服力。

4.3 试验结果

AW0 工况时,A1 车国产化牵引变流器单独牵引整车与 B1 车进口牵引变流器单独牵引整车 0~35 km/h 的加减速度对比如表 3 所示。

表 3 0~35 km/h 加减速度对比结果

主要参数	0~35 km/h 加速度		35~0 km/h 减速度	
	TCU 直接读取	CAN 网络上传	TCU 直接读取	CAN 网络上传
国产	0.375 3	0.373 7	0.378 3	0.367 3
进口	0.376 3	0.383 0	0.369 3	0.368 3
对比/%	-0.266	-2.428	+2.437	-0.272
折算后/%		-0.180		+1.765

从表 3 中可以看出,单台国产化牵引变流器

牵引整车与单台进口牵引变流器牵引整车 0~35 km/h 加减速速度基本相同, 加速度略小, 小 0.180%; 减速度略大, 大 1.765%。

整车 AW0 工况下列车以正常运营速度按照机场线运行图全线运行, 运行速度曲线如图 6 所示, 整车全线运行电压电流波形如图 7 所示。

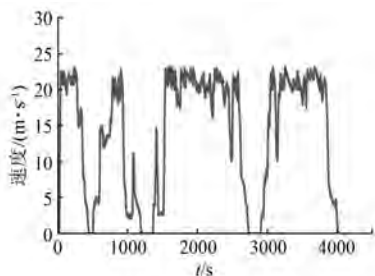
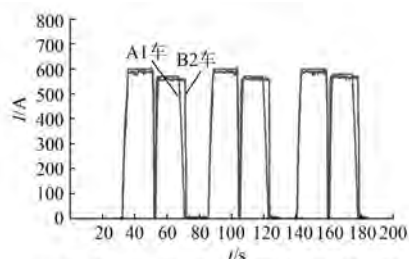
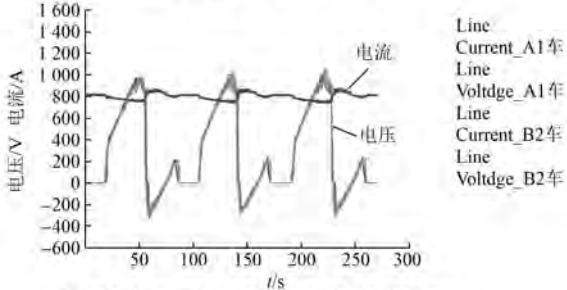


图 6 整车全线运行速度曲线



(a) 国产与进口牵引变流器交流侧输出电流



(b) 国产与进口牵引变流器直流侧电压电流

图 7 整车全线运行电压电流波形

由图 7 可知, 国产与进口牵引变流器电压电流波动趋势一致、取值近似, 没有出现过流等异常现象。AW0 工况全线运行时国产与进口变流器直流平均功率及交流输出电流平均值的对比如表 4 所示。

由表 4 可以看出, 在平均交流输出电流相近的基础上, 国产系统直流侧平均功率更小, 说明国产化牵引变流器的效率略高。

表 4 全线运行国产与进口变流器效率对比

平均值	直流电流/A	直流电压/V	直流功率/W	交流电流/A
国产	50.4	812.3	40.9	85.1
进口	57.7	815.6	47.1	84.4
对比/%			-15.159	0.829

救援模式定义为 1 台国产化牵引变流器与 2 台进口牵引变流器共同牵引 AW3 工况的整列车 (模拟 1 台牵引变流器故障), 按照正常运营速度在机场线正线全线运行。图 8 为救援模式下 A1 和 B1 车 4 台电机的温度曲线。图 8 中曲线起始段不一致的原因主要是 4 台电机在救援模式试验前的运行工况不一致。

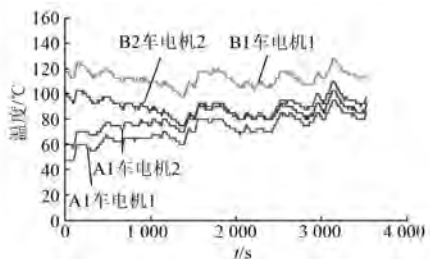


图 8 救援模式下 4 台牵引电机的温度曲线

温度曲线表明国产化牵引变流器对电机的温升效应略优于进口电机。

试验期间国产化牵引变流器运行稳定无故障。试验结果表明, 国产与进口牵引变流器各项性能基本相当, 能够满足车辆基本技术条件要求, 而且效率等部分指标国产优于原车进口系统, 可以实现国产化替代。

5 结 语

在借鉴国外先进技术的基础上, 研发了具有完全自主知识产权的大功率强迫风冷式 LIM 牵引变流器。采用优化的间接磁场定向控制, 降低了损耗和噪声, 增加了系统可靠性。同时针对 LIM 边端效应对磁场定向的影响, 提出了一种参数在线辨识方法, 试验平台结果验证了算法的有效性。在北京地铁机场线进行的静态试验, 充分表明国产化牵引变流器性能满足车辆基本技术要求, 技术参数与原车进口系统相当, 效率等部分指标优于原系统, 可以实现对进口产品的替代。

(下转第 89 页)

Ansys 仿真结果与试验数据的对比,表明其误差在可接受范围内。Ansys 仿真软件可以比较可靠地对电机模态进行仿真模拟。

电机内部电磁力谐波如果激起电机定子系统共振,会引发较大噪声。将电磁力谐波频率与电机定子系统固有频率进行对比,两者各阶频率并不在共振频率范围之内,避免了电机电磁噪声的加剧,验证了电机结构设计的合理性。

【参考文献】

- [1] 诸自强,陈永校.电机定子固有频率及其模态的有限元法分析[J].电工技术学报,1987,2(4): 39-45.
- [2] 陈永校,诸自强,应善成.电机噪声的分析与控制[M].杭州:浙江大学出版社,1987.
- [3] 谢颖,王严,吕森,等.小型异步电机模态计算与试验分析[J].电工技术学报,2015,30(16): 1-9.
- [4] 代颖,崔淑梅,宋立伟.车用电机的有限元模态分析[J].中国电机工程学报,2011,31(9): 100-104.
- [5] LONG S A, ZHU Z Q, HOWE D. Vibration

behaviour of stators of switched reluctance motors[J]. IEEE Proceedings of Electric Power Applications, 2001, 148(3): 257-264.

- [6] 吴建华.基于物理模型开关磁阻电机定子模态和固有频率的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(8): 109-114.
- [7] 孙剑波,詹琼华,黄进.开关磁阻电机的定子模态分析[J].中国电机工程学报,2005,25(22): 148-152.
- [8] 管兵.异步电机定子模态分析及定转子槽配合对其噪声的影响[J].电机与控制应用,2012,39(9): 43-47.
- [9] 史忠震,张卫,陈强,等.直流电动机定子有限元模态分析[J].微特电机,2014,42(5): 14-16.
- [10] VERDYCK D, BELMANS R, GEYSEN W, et al. Acoustic model for a permanent magnet machine: modal shape and magnetic forces [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994(6): 1625-1631.

收稿日期: 2018-01-03

(上接第 66 页)

该研究成果打破了国外相关技术垄断,填补了国内 LIM 轨道交通牵引传动领域的空白。

【参考文献】

- [1] 周建乐,韩志卫,张雄飞,等.直线电机车辆的技术创新现状及应用展望[C]//青岛:城市轨道交通管理和技术创新研讨会,2014: 79-94.
- [2] 阮毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [3] PUCCI M. State space-vector model of linear induction motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2014, 50(1): 195-207.
- [4] 李永东.交流电机数字控制系统[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [5] 王成元.现代电机控制技术[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [6] ACCETTA A, CIRINCIONE M, PUCCI M, et al. Neural sensorless control of Linear Induction Motors by a full-order Luenberger observer considering the end effect [J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2014, 50(3): 1891-1904.
- [7] LIU J Q, LIN F, YANG Z P, et al. Field Oriented

Control of Linear Induction Motor Considering Attraction Force & End-Effects [C] // Proceeding of Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2006), 2006: 1-5.

- [8] 程宁子,李耀华,张瑞华,等.基于 CANopen 协议的城市轨道交通直线电机车辆通信网络研究与实现[J].城市轨道交通研究,2012,15(9): 67-71.
- [9] 陈振锋,钟彦儒,李洁,等.转子电阻变化对电力牵引感应电机起动转矩的影响[J].电工技术学报,2011,26(6): 12-17.
- [10] 王高林,杨荣峰,张家皖,等.一种感应电机转子时间常数 MRAS 的在线辨识方法[J].电工技术学报,2012,27(4): 48-53.
- [11] 樊扬,瞿文龙,陆海峰,等.基于转子磁链 q 轴分量的异步电机间接矢量控制转差频率校正[J].中国电机工程学报,2009,29(9): 62-66.
- [12] MAITI S, CHAKRABORTY C, HORI Y, et al. Model reference adaptive controller-based rotor resistance and speed estimation techniques for vector controlled induction motor drive utilizing reactive power [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(2): 594-601.

收稿日期: 2017-09-05