

地铁永磁同步牵引系统节能技术研究

刘良杰, 陈文光, 刘 雄, 何 涛

(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 阐述了永磁同步牵引系统的技术特点和应用现状, 以长沙地铁1号线为例进行了永磁同步牵引系统能耗的线路仿真并介绍了现场节能测试情况, 针对效率和能耗与异步牵引系统进行了详细的对比与分析, 永磁牵引系统综合节能率为6.6%~36.9%, 因此, 我国应当积极推广永磁同步牵引系统在轨道交通领域的应用。

关键词: 地铁; 永磁; 牵引系统; 效率; 能耗

中图分类号: TM351; U231

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.06.004

Research on Energy Saving Technology of Metro Permanent Magnet Synchronous Traction System

LIU Liangjie, CHEN Wenguang, LIU Xiong, HE Tao

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The technical characteristics and application status of permanent magnet synchronous traction system were expounded. Takes Changsha metro line 1 as an example, the energy consumption of permanent magnet synchronous traction system was simulated and tested in field, and a detailed efficiency and energy consumption analysis compared to asynchronous traction system was made. The comprehensive energy saving rate of permanent magnet traction system was pointed from 6.6% to 36.9%, which suggested that the application of permanent magnet synchronous traction system in rail transit should be promoted actively in China.

Keywords: metro; permanent magnet; traction system; efficiency; energy consumption

0 引言

“十三五”期间我国地铁年均新增里程将达到1 000 km左右, 到2020年我国地铁里程总数有望达到9 000 km。轨道交通是能源消耗大户, 如北京地铁, 一年电能消耗达14亿kW·h, 电费约占运营成本的40%。因此发展高效牵引技术, 打造绿色轨道交通, 对于我国地铁具有非常现实的意义。

牵引系统是轨道交通车辆装备实现机电能量转换的“心脏”, 其性能在某种程度上决定了轨道交通车辆的动力品质、能耗等特性, 因而是轨道交通车辆节能升级的关键。目前轨道交通牵引系统研制者均把绿

色节能作为其未来轨道交通牵引系统技术升级与突破的核心之一。

1 永磁同步牵引系统的特点与应用现状

永磁同步电机因为转子采用永磁材料励磁, 转子没有励磁损耗, 因而具有高效率、高功率密度的技术特点。伴随着稀土永磁材料的长足发展, 以永磁同步电机为核心的永磁同步牵引系统受到了轨道交通研发人员的高度重视, 以德、法、日为代表的轨道交通装备制造强国纷纷开展永磁同步牵引系统的研制, 经过二十多年的发展已相继完成小批量考核并进入商业化推广阶段^[1]。

日本东芝已先后在地铁、城际动车组、调车机车等领域批量应用永磁同步牵引系统700多套; 法国阿

尔斯通为高速动车组等领域开发了全封闭永磁同步电机；庞巴迪研制的 MTRAC 自通风永磁同步电机已批量应用于市域列车，电机额定效率可达 97.1%；德国西门子为地铁列车开发了 Syntegra 永磁同步直驱电机，通过取消齿轮箱使转向架的轴距由原来的 2.5 m 缩短至 1.6 m。

我国是稀土永磁材料的大国，虽然在永磁同步牵引系统研究方面起步较晚，但利用后发优势发展较快。2011 年，沈阳地铁 2 号线实现了国内轨道交通永磁同步牵引系统的首次应用。随后我国先后在高速动车组、低地板有轨电车、跨座式单轨车和悬挂式空轨车等多种轨道交通车辆上实现了永磁同步牵引系统的应用，并充分体现了高效节能的技术优势。

2 列车能耗仿真与测试

2016 年，长沙地铁 1 号线永磁同步牵引系统列车（45/46 车，见图 1）成为国内首列正式投入商业运营的永磁牵引地铁列车，目前已经安全载客运营 25 万 km。因为其应用具有代表性，本文以长沙地铁 1 号线永磁同步牵引系统列车为例介绍能耗线路仿真计算与现场能耗测试情况。



图 1 长沙地铁 1 号线永磁同步牵引系统列车

表 3 永磁牵引列车与异步牵引列车运营能耗统计数据

项目	运行总里程 / km	HMI 牵引能耗 / (kW·h)	HMI 再生能量 / (kW·h)	HMI 辅助能耗 / (kW·h)	HMI 总能耗 / (kW·h)	能耗记录仪记录的 总能耗 / (kW·h)
异步牵引系统列车能耗总和	359 525	5 981 209	2 765 497	1 059 783	4 275 495	4 031 721
异步牵引系统列车每公里平均能耗	—	16.64	7.69	2.95	11.89	11.21
永磁牵引系统列车能耗总和	90 540	1 218 934	775 525	238 366	681 775	713 064
永磁牵引系统列车每公里平均能耗	—	13.46	8.57	2.63	7.53	7.88
永磁牵引系统列车节能率	—	19.1%	—	—	—	29.7%

注：总能耗=牵引能耗-再生能量+辅助能耗；永磁牵引系统列车节能率=(异步牵引系统列车能耗-永磁牵引系统列车能耗)/异步牵引系统列车能耗。

根据统计数据可以得出，与异步牵引系统列车相比，永磁牵引系统列车牵引能耗低，而反馈的再生能量高，因此列车总能耗相对较低。正常运营的永磁牵引系统列车牵引工况能耗节能率为 19.1%，总能耗（能耗记录仪数据）节能率为 29.7%。

2.3 第三方能耗测试

2017 年 10 月 9 日至 19 日，具有权威资质的国家铁路产品质量监督检验中心对长沙地铁 1 号线列车进行了能耗测量试验，选取 1 列永磁同步牵引系统列车

2.1 能耗线路仿真分析

长沙地铁 1 号线一期工程南起尚双塘站，北至开福区政府站，全长 23.55 km，共设 20 座车站，平均站间距 1 122 m。

分别将永磁同步牵引系统与异步牵引系统的参数代入线路仿真系统中，按照长沙地铁 1 号线的线路条件进行仿真计算（牵引网压 DC 1 500 V，电制动网压 DC 1 650 V），得到表 1、表 2 的能耗数据。

表 1 AW0 工况下永磁牵引系统与异步牵引系统列车能耗仿真对比

能量回馈条件	旅行速度 / (km·h ⁻¹)	异步牵引列车 / (kW·h·km ⁻¹)	永磁牵引列车 / (kW·h·km ⁻¹)	节能率 / %
无能量回馈	39.65	17.45	16.50	5.44
100% 能量回馈	39.65	5.70	4.02	29.47

表 2 AW2 工况下永磁牵引系统与异步牵引系统列车能耗仿真对比

能量回馈条件	旅行速度 / (km·h ⁻¹)	异步牵引列车 / (kW·h·km ⁻¹)	永磁牵引列车 / (kW·h·km ⁻¹)	节能率 / %
无能量回馈	39.63	22.70	21.24	6.43
100% 能量回馈	39.63	7.64	5.59	26.83

根据计算结果得出再生能量充分回馈条件下永磁牵引系统列车节能率可接近 30%。

2.2 地铁运营公司能耗统计

从 2016 年 8 月至 2017 年 8 月，长沙地铁运营公司选取正常运营的 4 列异步牵引系统列车和永磁牵引系统列车进行能耗跟踪统计，每天记录列车运营里程和能耗，并进行对比分析。

能耗统计期间，永磁牵引系统列车和异步牵引系统列车均按同一正常运行图运行，列车运营条件及地面能馈装置模式、列车控制模式、环境因素等均保持一致。

通过对能耗数据统计分析，得出统计结果如表 3。

和 2 列异步牵引系统列车进行能耗测量。具体测量数据如表 4 所示。

表 4 永磁同步牵引系统列车较异步牵引系统列车平均节能率 %

日期	关闭地面能馈装置		日期	开启地面能馈装置	
	正常运营	空载		正常运营	空载
10 月 11 日	18.41	13.96	10 月 12 日	35.10	29.60
10 月 17 日	22.73	15.25	10 月 16 日	35.93	38.20
平均值	20.57	14.61	平均值	35.52	33.90

注：数据来源于国家铁路产品质量监督检验中心〔2017〕GTJ(JL)字第 W1213 号《长沙地铁 1 号线永磁同步牵引系统列车能耗测试报告》。

根据该检测报告可以看出, 在长沙地铁 1 号线正常运营工况下, 地面能馈装置关闭时的平均节能率为 20.57%, 开启时为 35.52%。

3 节能分析

3.1 电机效率对比

永磁同步牵引电机采用永磁材料励磁, 与异步牵引电机相比不存在转子励磁损耗, 电机总损耗相比异步牵引电机降低约 50%, 因此永磁同步牵引电机的效率明显高于异步牵引电机。图 2 为永磁同步牵引电机与异步牵引电机在最大牵引特性包络线下的全速度范围效率对比, 永磁同步牵引电机额定工作点效率较异步牵引电机提高约 5%, 低速区效率优势更加明显, 低速区工作点效率提高量甚至超过 10%。

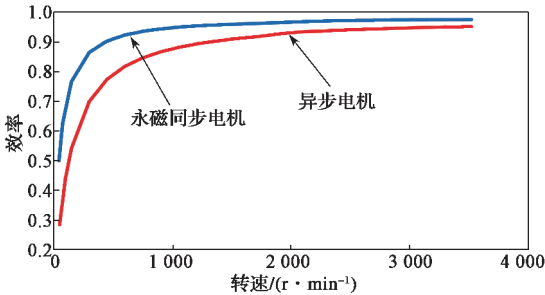
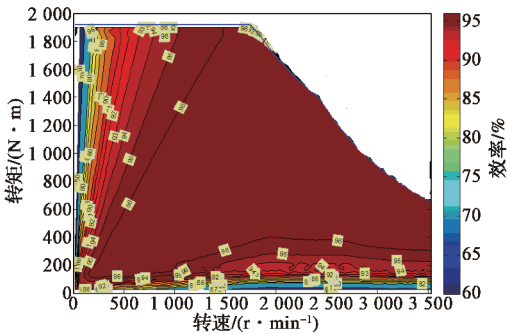
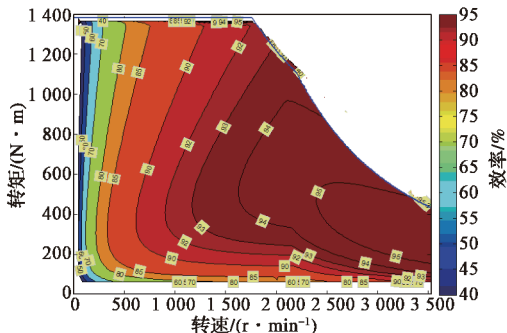


图 2 永磁同步牵引电机与异步牵引电机效率对比

图 3 为永磁同步牵引电机与异步牵引电机的效率 MAP, 表征电机全运行工况下的效率高低。图 3 中深红色区域代表高效区。由图 3 可知, 永磁同步牵引电机高效区域面积远大于异步牵引电机。



(a) 永磁同步牵引电机



(b) 异步牵引电机

图 3 电机效率 MAP

地铁运行站间距短, 列车频繁启停, 牵引电机经常运行于低速低效区域内, 永磁同步牵引电机全工况范围内的高效特性可以体现更加显著的节能效果。

3.2 系统节能分析

以具有典型代表意义的站间距 1 200 m 的平直道为例进行仿真计算, 在额定网压、定员载荷、100% 级位牵引 / 制动特性下运行一次, 异步牵引系统与永磁同步牵引系统的输入电功率 - 时间图如图 4 所示。

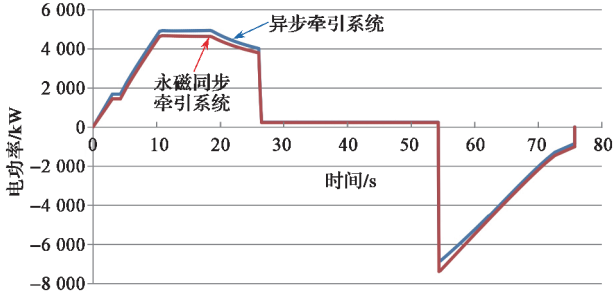


图 4 牵引系统输入电功率 - 时间图

永磁同步牵引系统与异步牵引系统在平直道仿真电能对比如表 5 所示。

表 5 牵引系统平直道仿真电能

项目	牵引电能 / (kW·h)	电制动再生电能 / (kW·h)	再生率 /%
异步牵引系统	30.24	21.38	70.7%
永磁同步牵引系统	28.25	22.65	80.2%
比例 (永磁 / 异步)	0.934	1.059	-

图 5 为永磁同步牵引系统与异步牵引系统对比的功率流程图。根据上述平直道仿真的数据结果, 利用功率流程图可分析永磁同步牵引系统的节能情况。

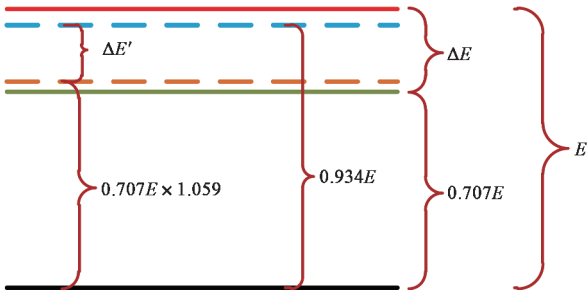


图 5 牵引系统功率流程图

如图 5 所示, 假设异步牵引系统的牵引能耗为 E , 总能耗为 ΔE , 根据表 5 可知异步牵引系统的电制动再生率为 0.707, 因此异步牵引系统的再生电能为 $0.707E$, 所以其总能耗为

$$\Delta E = E - 0.707E = 0.293E$$

假设永磁同步牵引系统的总能耗为 $\Delta E'$, 根据表 5 可知永磁同步牵引系统牵引工况下所需电能为异步牵引系统的 93.4%, 电制动工况下所需电能为异步牵引系统的 105.9%, 因此永磁同步牵引系统的总能耗为

$$\Delta E' = 0.934E - 0.707E \times 1.059 \approx 0.185E$$

相比异步牵引系统, 永磁同步牵引系统的总能耗节能率为

$$\frac{\Delta E - \Delta E'}{\Delta E} = \frac{0.293E - 0.185E}{0.293E} = \frac{0.108E}{0.293E} = 0.369$$

表明永磁牵引系统综合节能率为 6.6% (无电制动再生) ~36.9% (全电制动再生)。(下转第 41 页)

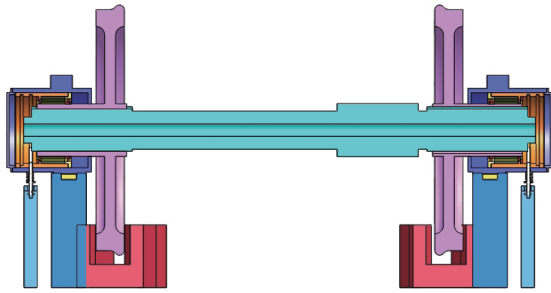


图 12 车轮到达新的轨距

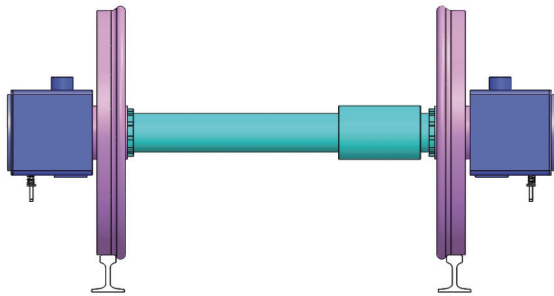


图 13 车轮在新的轨距位置锁紧并完成加载

4 结语

本文详细分析了变轨距锁紧机构和轮对变轨距的实现过程, 同时提出了相应的地面变轨装置的方案。

通过分析表明, 该变轨距轮对能够完成轮对内侧距的自动变换。其具体结构还有待研究工作的不断优化和完善, 特别是相关部件强度校核需要后续详细的分析和计算。

参考文献:

- [1] 李芾, 黄运华, 傅茂海. 变轨距转向架的发展及其可行性研究[J]. 铁道机车车辆, 2002(5): 1-5.
- [2] 黄运华, 李芾. 铁道车辆轮对变轨距技术研究[J]. 铁道车辆, 2002, 40(7): 8-10.
- [3] 黄运华. 变轨距转向架国内外调研报告[R]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [4] 黄运华, 李芾, 傅茂海. 新型变轨距客车转向架结构及动力学性能[J]. 西南交通大学学报, 2003(6): 668-672.
- [5] TOKUDA Noriaki. Development of gauge change bogies[J]. QR of RTRI, 2003, 44(3): 110-113.
- [6] 黄运华. 基于独立旋转车轮的变轨距转向架研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003: 9-10.
- [7] 黄运华, 李芾, 傅茂海. 变轨距转向架方案及其动力学特性研究[J]. 铁道学报, 2002, 24(6): 24-29.
- [8] 刘寅华. 变轨距货车转向架及其性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006: 29-30.

作者简介: 徐忠宣(1982-), 男, 工程师, 主要从事轨道车辆研究工作。

(上接第 25 页)

永磁同步牵引系统相较于异步牵引系统的节能率随电制动再生回馈率的提升而增加。因为永磁电机的效率无论牵引工况还是电制动工况均优于异步电机, 牵引工况时永磁同步牵引系统能耗低于异步牵引系统, 而电制动工况时永磁同步牵引系统的再生能量也多于异步牵引系统。当回馈率较低时, 再生制动产生的电能消耗于车载斩波电阻上, 永磁同步牵引系统的节能优势无法充分体现。长沙地铁 1 号线安装有地面回馈装置, 列车电制动再生能量能够充分被接触网吸收, 再生回馈率接近 100%, 因此永磁同步牵引系统的节能优势能够得到充分体现。由表 5 长沙地铁 1 号线的现场能耗测试数据可知, 再生制动能量充分回馈的情况下, 永磁同步牵引系统综合节能可以达 30% 以上。

4 结语

由以上分析可见, 将永磁同步牵引系统应用于轨道交通车辆可有效降低牵引能耗, 实现节能减排。

永磁同步牵引电机采用的永磁材料主要为钕钴或钕铁硼等稀土材料, 我国是世界上稀土材料储藏的第一大国, 丰富的稀土资源使得我国非常适合永磁同步牵引系统的发展与应用。

综上, 我国应当积极推动永磁同步牵引系统在轨道交通车辆的批量推广应用, 加快轨道交通行业节能减排技术的发展。

参考文献:

- [1] 冯江华. 轨道交通永磁同步牵引系统研究[J]. 机电传动, 2010(5): 15-21.
- [2] 陈致初, 李益丰, 符敏利. 永磁同步牵引电动机的特殊性[J]. 大功率变流技术, 2012(3): 25-30.
- [3] 刘可安, 许峻峰, 文字良, 等. 地铁车辆用永磁同步牵引电动机地面试验研究[J]. 大功率变流技术, 2012(3): 20-24.

作者简介: 刘良杰(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事轨道交通交流传动系统的研究工作。