

# 永磁直驱地铁列车能耗分析及验证

陈小伟 马晓光 张琳 赵正虎

(中车南京浦镇车辆有限公司技术中心, 210031, 南京)

**摘要** [目的] 地铁列车的永磁直驱技术作为一种新型的牵引方案, 在节能、降噪等方面具有一定的优势, 特对其节能效果进行研究。[方法] 通过理论分析, 探讨了永磁直驱地铁列车相对传统的异步牵引电机齿轮传动地铁列车在能耗方面的优势, 并以徐州1号线永磁直驱列车为例, 介绍了永磁直驱地铁列车的设计方案; 结合实际线路情况, 计算了永磁直驱地铁列车相对传统异步牵引电机齿轮箱传动地铁列车的节能效果; 最后通过试验验证了其优势。[结果及结论] 在节能方面, 永磁直驱牵引系统相比传统异步牵引电机齿轮箱传动系统具有较高的优势。

**关键词** 地铁; 永磁直驱; 能耗; 制动能量回馈; 再生制动  
**中图分类号** U270.33

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.05.033

## Energy Consumption Analysis and Verification of Permanent Magnet Direct Drive Metro Trains

CHEN Xiaowei, MA Xiaoguang, ZHANG Lin, ZHAO Zhenghu

(Technical Center of CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

**Abstract** [Objective] The permanent magnet direct drive technology for metro trains, as a novel traction solution, offers certain advantages in energy saving and noise reduction. Thus, it is aimed to specifically investigate its energy-saving effect. [Method] Theoretical analysis is conducted to explore the advantages of permanent magnet direct drive metro trains over (hereafter abbreviated as conventional) metro trains in terms of energy consumption. Taking the example of the permanent magnet direct drive trains on Line 1 in Xuzhou city, the design scheme of permanent magnet direct drive metro trains is introduced. Considering the actual route conditions, the energy-saving effect of permanent magnet direct drive metro train relative to conventional metro trains is calculated. Finally, the advantages are verified through experiments. [Result & Conclusion] The permanent magnet direct drive traction system has a higher advantage in energy saving compared to conventional system.

**Key words** metro; permanent magnet direct drive; energy consumption; braking energy feedback; regenerative braking

根据我国城市轨道交通能耗的相关数据统计, 地铁车辆的运营能耗约占轨道交通系统电能消耗的50%。地铁车辆的运营能耗中牵引系统能耗一般占车辆运营能耗的60%~70%<sup>[1]</sup>。因此, 降低地铁车辆的牵引系统能耗是进一步降低列车运营能耗的最有效手段。当前地铁列车所采用的牵引方式主要是传统的异步牵引电机驱动的齿轮箱传动装置, 其效率较低。相对于传统牵引电机, 永磁电机具有功率密度高、过载能力强和体积较小等优点, 欧美和日本等国家也在积极研制永磁电机牵引系统<sup>[2]</sup>, 而直驱牵引技术取消了齿轮箱和联轴节直接将牵引电机输出的力矩或力传递给轮对或构架, 其传动效率更高。因此, 永磁直驱牵引系统兼具了永磁电机和直驱牵引的双重优势, 在列车的节能降耗方面具有良好的优势。为了验证永磁直驱牵引系统地铁列车的适用性和节能效果, 徐州市城市轨道交通有限责任公司联合中车南京浦镇车辆有限公司及株洲中车时代电气股份有限公司共同在徐州地铁1号线项目中选取了一列车作为永磁直驱示范列车。

## 1 永磁直驱列车在节能方面的优势分析

### 1.1 效率优势

地铁车辆异步牵引电动机的额定效率约为0.940, 直驱式永磁电机的额定效率约为0.98<sup>[3]</sup>, 齿轮箱的传动效率不高于0.98<sup>[4]</sup>。因此, 带有齿轮箱传动的异步牵引电动机与永磁直驱式牵引电动机的综合效率对比为0.92:0.98。

综上, 永磁直驱式牵引电动机的综合效率比带有齿轮箱传动的异步牵引电动机高出约6%。

### 1.2 牵引工况节能估算

牵引工况时, 若异步牵引电动机消耗电能为100.00 kWh, 则永磁直驱式牵引电机消耗的电能为93.88 kWh。

### 1.3 制动工况节能估算

根据统计分析, 地铁车辆运行过程中, 带有齿

轮箱传动的异步牵引电动机电制动时,回馈的电能为牵引能耗的 50%<sup>[5-6]</sup>。若牵引时,异步牵引电动机消耗电能为 100 kWh,则电制动时异步牵引电动机回馈电能 50 kWh。

因列车电制动时,永磁直驱式电动机与带有齿轮箱传动的异步牵引电动机发挥同样的机械功率,因此其回馈的电能为 53.26 kWh。

#### 1.4 综合节能

综上所述,若牵引时,带有齿轮箱传动的异步牵引电动机消耗电能为 100 kWh,其电制动时可回馈电能 50 kWh,综合能耗为 50 kWh。

同等工况下,若牵引时,永磁直驱式牵引电机消耗电能为 93.88 kWh,其电制动时可回馈电能为 53.26 kWh,综合能耗为 40.62 kWh。

因此,相比带有齿轮箱传动的异步牵引电动机,永磁直驱式同步牵引电动机的节能率为 18.8%。

## 2 徐州地铁 1 号线永磁直驱列车设计方案

徐州地铁 1 号线项目配属列车均为 4 动 2 拖 6 编组 B 型车。与徐州地铁 1 号线常规列车相比,徐州地铁 1 号线永磁直驱列车动车转向架采用了电机与车轴刚性抱轴连接方式,省去了齿轮箱和联轴节;拖车转向架构架采用“交叉板式”柔性横梁结构构架,降低了扭转刚度,提高了适应线路不平顺的能力;轴距由常规的 2 300 mm 减小到 1 900 mm,轮径由常规的 840 mm 减小到 740 mm。其他结构形式类同于传统转向架,采用一系锥形橡胶堆定位、轮对轴箱装置,二系空气弹簧承载、踏面制动与目前通用的 B 型地铁转向架结构形式基本相同<sup>[7]</sup>。

与徐州地铁 1 号线永磁直驱列车牵引系统相比,徐州地铁 1 号线常规列车采用了新的逆变器,在原有逆变器的基础上增加了隔离接触器;牵引电机采用永磁直驱电机,并增加水冷装置为牵引电机提供冷却,其余部分与常规列车一致。其主电路拓扑结构如图 1 所示。除转向架和牵引系统外,永磁直驱列车其余系统设计方案同常规异步列车基本一致。

## 3 徐州地铁 1 号线永磁直驱列车线路仿真计算

根据徐州地铁 1 号线的线路条件,分别对配置

传统的异步牵引电动机带齿轮箱的列车和配置永磁同步牵引电动机直驱式列车的能耗进行线路仿真计算,其分析结果如表 1 所示。表 1 中的能耗为列车在 AW3(满座+9 人/m<sup>2</sup>,超常载荷)载荷情况下满手柄牵引/电制动运行 1 个往返时每台牵引电机的能耗。

表 1 2 种车型牵引能耗对比

Tab. 1 Comparison of traction energy consumption between two train models

项目	牵引能耗/ (kWh)	制动能耗/ (kWh)	总能耗/ (kWh)
异步牵引列车	68.50	-41.88	26.62
永磁直驱列车	66.35	-46.29	20.06
永磁直驱列车节能率/%	3.14	4.47	24.64

表 2 为不同电制动回馈率情况下的异步电机牵引系统与永磁直驱牵引系统的能耗对比。由表 2 可知:列车整个牵引系统的能耗与电制动回馈率有关,列举了在不同电制动回馈率下整列车的牵引系统能耗。表 2 的数据通过徐州地铁 1 号线线路情况进行线路仿真计算所得,其仿真计算工况为 AW3 载荷下满手柄牵引/电制动运行 1 个往返。

表 2 不同电制动回馈率下 2 种车型的牵引系统能耗对比

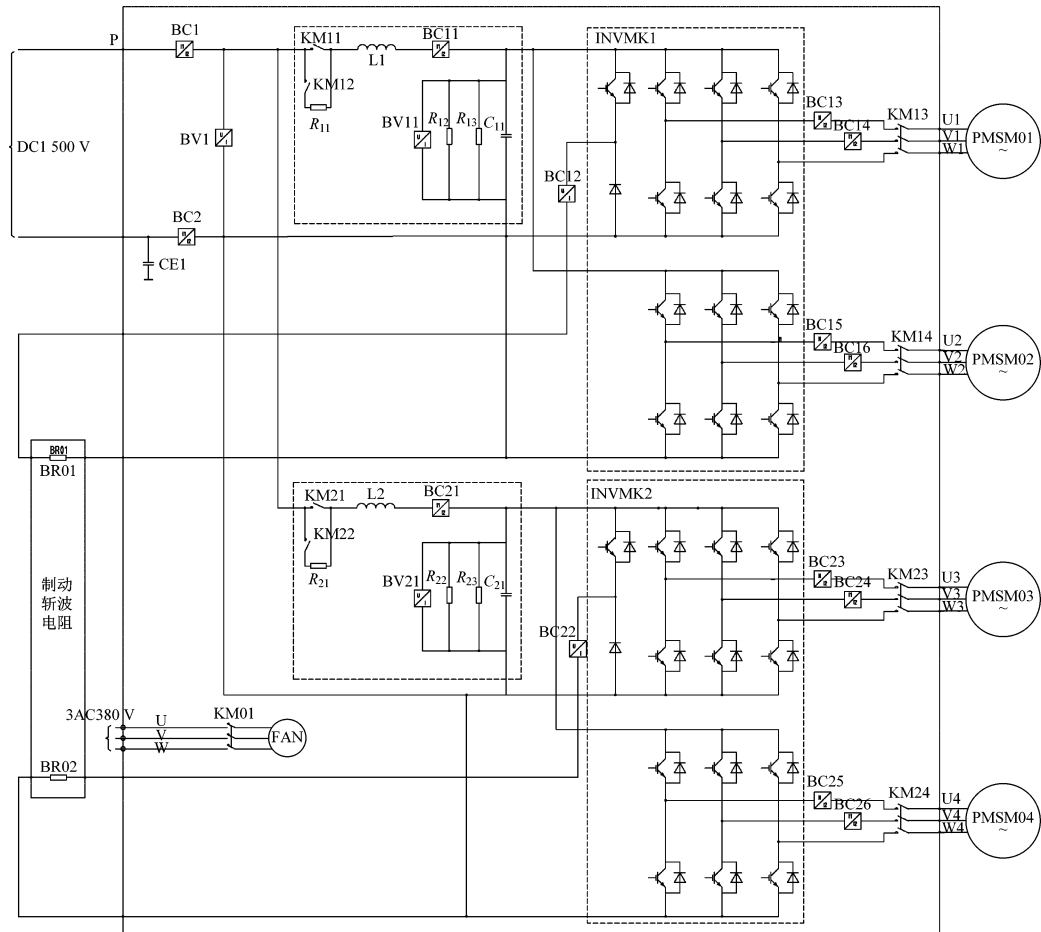
Tab. 2 Comparison of traction system energy consumption between two train models with different electric braking feedback rates

电制动 回馈率/%	异步列车 能耗/(kWh)	永磁直驱列车 能耗/(kWh)	永磁直驱列车 节能率/%
0	1 095.96	1 061.59	3.14
15	995.42	950.46	4.52
50	760.92	691.24	9.16
100	425.89	320.94	24.64

## 4 直驱列车节能效果验证

徐州地铁 1 号线永磁直驱列车完成型式试验后在正线单独进行了牵引能耗对比试验。该试验在 ATO 模式和 AW3 载荷下进行。列车牵引能耗按照列车净能耗减辅助能耗进行计算,列车上、下行过程中的牵引能耗试验结果如图 2 和图 3 所示。

由图 2 和图 3 可知:永磁直驱列车牵引能耗相对异步齿轮箱传动列车在节能方面具有一定优势。2 种车型的能耗试验数据对比如表 3 所示。徐州地铁 1 号线项目全线配置了地面能量回馈系统,因此



注:BC—电流检测传感器;BR—过压吸收电阻;BV—电压检测传感器;C—支撑电容;CE—接地电容;INVMK—逆变器斩波模块;K01—冷却风机控制接触器;KM—接触器;L—滤波电抗器;PMSM—永磁牵引电机;R—电阻;U、V、W—代表三相电源;相关数字代表序列号。

图 1 徐州地铁 1 号线永磁直驱牵引系统主电路拓扑图

Fig. 1 Main circuit topology diagram of Xuzhou Metro Line 1 permanent magnet direct drive traction system

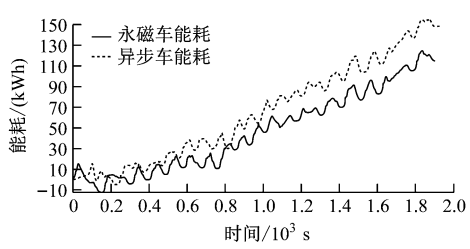


图 2 列车上行牵引能耗曲线

Fig. 2 Curve of traction energy consumption during train upward operation

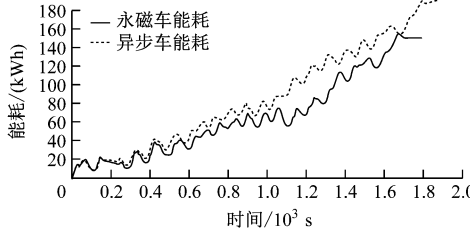


图 3 列车下行牵引能耗曲线

Fig. 3 Curve of traction energy consumption during train downward operation

其与异步齿轮箱传动列车相比,永磁直驱列车的能耗降低比例接近于电制动回馈率 100% 情况下的计算值;而试验总能耗试验值低于计算值,是由于计算过程以满手柄牵引/电制动运行模式计算,较实际 ATO 模式能耗高而引起。

5 结语

与传统的异步牵引电机齿轮箱传动列车相比,永磁同步牵引电机直驱列车在牵引节能方面具有较高优势,特别是配合地面能量回馈系统共同使用时,其牵引能耗可降低 20% 以上。

表 3 2 种车型能耗试验数据对比表

Tab.3 Comparison of energy consumption experimental results between two train models

项目	异步齿轮箱列车能耗/(kWh)	永磁直驱列车能耗/(kWh)	永磁直驱列车能耗降低比例/%
上行	148.1	114.6	22.6
下行	191.7	150.2	21.6
合计	339.8	264.8	22.1

## 参考文献

- [1] 刘军良, 张彦华, 马喜成, 等. 降低地铁车辆牵引能耗的措施与建议[J]. 电力机车与城轨车辆, 2016, 39(1): 75.  
LIU Junliang, ZHANG Yanhua, MA Xicheng, et al. Measures and suggestions for reducing traction energy consumption of metro vehicles[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2016, 39(1): 75.
- [2] 冯江华. 轨道交通永磁同步牵引系统研究[J]. 机车电传动, 2010(5): 15.  
FENG Jianghua. Study on the permanent magnet synchronous motor drive system of rolling stock[J]. Electric Drive for Locomotives, 2010(5): 15.
- [3] 吴冬华, 孙传铭. 基于永磁电机牵引系统高速动车组的研制[J]. 机车电传动, 2019(1): 35.  
WU Donghua, SUN Chuanming. Development of high-speed EMUs based on permanent magnet motor traction system[J].

Electric Drive for Locomotives, 2019(1): 35.

- [4] 周永刚, 陈超录, 刘雄. 地铁永磁直驱牵引系统设计方法[J]. 机车电传动, 2015(6): 34.  
ZHOU Yonggang, CHEN Chaolu, LIU Xiong. Metro permanent magnet direct-driving traction system design method[J]. Electric Drive for Locomotives, 2015(6): 34.
- [5] 刘宝林. 地铁列车能耗分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30(4): 65.  
LIU Baolin. Analysis on energy consumption of metro train[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2007, 30(4): 65.
- [6] 梁广深, 黄隆飞. 地铁 B 型车牵引能耗与再生制动节能效果分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(2): 27.  
LIANG Guangshen, HUANG Longfei. Analysis of energy consumption and renewable energy saving effect of metro B-type train[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(2): 27.
- [7] 楚永萍, 胡定祥, 周亮. 地铁车辆新型永磁直驱转向架的设计和分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(6): 17.  
CHU Yongping, HU Dingxiang, ZHOU Liang. Design and analysis of a new-type metro bogie with permanent magnet driving motors[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(6): 17.

· 收稿日期:2023-12-05 修回日期:2024-01-05 出版日期:2024-05-10  
Received:2023-12-05 Revised:2024-01-05 Published:2024-05-10  
· 通信作者:陈小伟,正高级工程师,csrxcw@163.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 162 页)

## 参考文献

- [1] 胡振恺, 雷博, 李勇琦, 等. 储能用锂离子电池安全性测试与评估方法比较[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1650.  
HU Zhenkai, LEI Bo, LI Yongqi, et al. Comparative study on safety test and evaluation methods of lithium-ion batteries for energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1650.
- [2] 张双虎, 迟彩霞, 乔秀丽, 等. 锂离子电池负极析锂问题的分析及对策[J]. 电源技术, 2023, 47(6): 709.  
ZHANG Shuanghu, CHI Caixia, QIAO Xiuli, et al. Analysis and solutions of lithium plating on anode for lithium-ion battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(6): 709.
- [3] 赵亚文, 黄彧, 张言茹. 轨道交通动力锂离子电池安全性测

试标准分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2505.

- ZHAO Yawen, HUANG Yu, ZHANG Yanru. Analysis of safety test standard of rail transit power lithium-ion battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2505.
- [4] 周礼. 电动汽车锂离子电池温度性能研究[J]. 专用汽车, 2022(5): 15.  
ZHOU Li. Study on temperature performance of lithium-ion battery for electric vehicle[J]. Special Purpose Vehicle, 2022(5): 15.

· 收稿日期:2023-11-12 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10  
Received:2023-11-12 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10  
· 通信作者:丁朝奉,高级工程师,cfding\_csr@126.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license