

B 型地铁车辆永磁直驱转向架的研制及性能分析*

胡定祥¹ 金鑫¹ 马晓光¹ 沈钢² 贾小平¹ 解斛³

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司技术中心转向架研发部, 210031, 南京; 2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海; 3. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 正高级工程师)

摘要 永磁直驱转向架采用永磁电机同步抱轴安装方式直接驱动车轴。因永磁同步电机具有高效、节能、环保的特点, 永磁直驱方式避免了齿轮传动的效率损失, 节约了齿轮箱空间, 减小了车辆轴距。针对 B 型地铁车辆的实际运用要求, 研制了 80 km/h 速度级 B 型地铁车辆的永磁直驱转向架。试验表明: 与装用异步牵引系统的列车相比, 装用永磁直驱转向架的列车的牵引效率可提高约 5%, 能耗降幅可达 20% ~ 30%, 且脱轨系数、轮重减振率、轮轴横向力和垂直升稳性等动力学指标更优。

关键词 地铁; B 型车辆; 车辆转向架; 永磁直驱转向架; 能耗分析; 动力学性能对比

中图分类号 U270.33

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.007

Development of B-type Metro Vehicle Permanent Magnetic Direct Drive Bogie and Performance Analysis

HU Dingxiang, JIN Xin, MA Xiaoguang, SHEN Gang, JIA Xiaoping, XIE Hu

Abstract Permanent magnet direct drive bogie directly drives the axle by using the permanent magnet motor synchronously holding the axle. Because the permanent magnet synchronous motor has the characteristics of high efficiency, energy saving and environmental protection, the permanent magnet direct drive method avoids the efficiency loss of gear transmission, saving the gearbox space, and reducing vehicle wheel-base. According to the practical application requirements of B-type metro vehicles, a permanent magnet direct drive bogie for B-type metro vehicles with speed of 80 km/h is developed. The test shows that compared with the train equipped with asynchronous traction system, the traction efficiency of the train equipped with permanent magnet direct drive bogie can increase by about 5%, and the energy consumption can reduce by 20% to 30%. Dynamic indicators such as derailment coefficient, wheel weight vibration-damping rate, wheel axle

lateral force and vertical stability are better.

Key words metro; B-type vehicle; vehicle bogie; permanent-magnetic direct drive bogie; energy consumption analysis; dynamics performance comparison

First-author's address Bogie Research and Development Department, Technical Center, CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., 210031, Nanjing, China

B 型地铁车辆是目前国内城市轨道交通需求量最大的车型。综合考虑列车的运行安全性和磨耗经济性, 地铁正线上的最小曲线半径需不小于 250 m。若增大线路的最小曲线半径, 需拆迁大量的房屋, 导致建设成本偏高。此外, 城市轨道交通的能耗仍然较大。根据中国城市轨道交通协会发布的《2019 年中国城市轨道交通牵引能耗》, 牵引能耗在列车运营总能耗的占比达到 51.8%。因此, 在保证运行安全和经济性的同时, 降低列车的牵引能耗是城市轨道交通线路节能减排、降低全寿命周期成本所亟需解决的问题。本文对 B 型地铁车辆(80 km/h 速度级)采用永磁直驱转向架的研制方案进行研究, 以期提高列车牵引系统的经济性与节能性。

1 永磁直驱转向架的主要技术参数

与三相交流异步电机相比, 永磁同步电机具有效率高、体积小、质量轻等优点。永磁直驱转向架利用永磁电机高效率的优点, 采用抱轴安装方式直接驱动车轴, 避免了齿轮传动的效率损失, 节约了齿轮箱空间, 减小了车辆轴距, 从而使列车具有优良的小半径曲线通过性能。依据 B 型地铁车辆的运用要求, 确定永磁直驱转向架^[1-3]的主要技术参数如表 1 所示。

2 永磁直驱转向架的结构特点

如图 1 所示, 永磁直驱转向架的驱动系统采用

* 国家重点研发计划项目(2017YFB1200903)

表 1 B 型地铁车辆永磁直驱转向架的主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of permanent magnet direct drive bogie of type-B metro vehicle

| 技术参数 | 参数值 |
|----------------|------------------|
| 轨距/mm | 1 435 |
| 最高运营速度/(km/h) | 80 |
| 最高试验速度/(km/h) | 90 |
| 固定轴距/mm | 1 900 |
| 空气弹簧横向跨距/m | 1 960 |
| 轮径/mm | 740(磨损到限时为 670) |
| 场段内通过的最小曲线半径/m | 110 |
| 正线上通过的最小曲线半径/m | 250 |
| 电机扭矩/(Nm) | 7 614 |
| 电机额定效率/% | 93 |
| 转向架自重/t | 6. 3 |

永磁同步电机直接驱动车轴,利用对称式三角反力杆^[4-5]平衡牵引/制动力矩,其构架采用 H 型箱型焊接结构。其中:一系采用锥形橡胶堆定位、小轮径轮对轴箱装置;二系采用空气弹簧承载、Z 型双拉杆牵引、无扭杆结构;基础制动采用踏面制动单元制动。该型转向架具有结构简单、成本较低、曲线通过能力强、平稳性和安全性较高等优点。



图 1 采用 H 型箱型焊接结构的永磁直驱转向架

Fig. 1 Permanent magnet direct drive bogie with H-shaped box welded structure

2.1 驱动系统

永磁直驱转向架的驱动系统(见图 2)由永磁直驱电机(见图 3)和对称式三角反力杆(见图 4)组成。

永磁直驱电机为全封闭式水冷结构,冷却效率很高。如图 5 所示,永磁直驱电机由转子和定子组成。其中:转子由车轴、轴套、永磁体等构成,无励磁线圈,轴套与车轴过盈配合;定子由机壳、铁芯、线圈绕组等构成,铁芯采用冷轧硅钢片叠压而成,线圈采用扁铜线绕制,定子的两端通过轴承安装在车轴上^[6]。

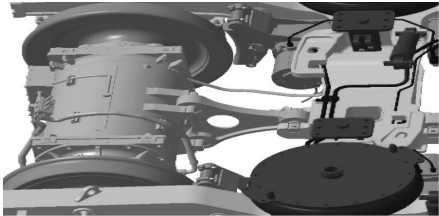


图 2 永磁直驱转向架的驱动系统

Fig. 2 Drive system of permanent magnet direct drive bogie



图 3 永磁直驱电机

Fig. 3 Permanent magnet direct drive motor



图 4 对称式三角反力杆

Fig. 4 Symmetrical triangular reaction rod

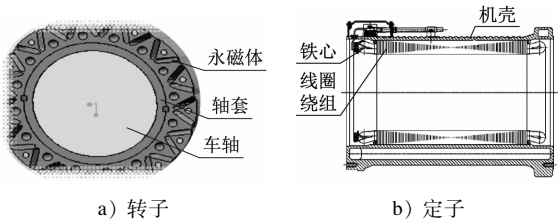


图 5 永磁直驱电机定子和转子剖面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of permanent magnet direct drive motor stator and rotor section

对称式三角反力杆设有 3 个弹性节点,其中,与构架端连接的弹性节点在纵向(列车前进方向)采用开槽设计,使得节点纵向刚度和节点偏转刚度极小但垂向(平衡牵引/制动力矩方向)刚度较大。弹性节点的垂向大刚度在电机牵引制动提供反力矩时产生的变形小,弹性节点的纵向小刚度不会对一系产生额外附加刚度。弹性节点偏转刚度极小,导致其产生的轮对附加摇头刚度也极小,同时由于三角杆式弹性支撑结构在纵向上的长度足够,可以保证轮对与构架在相对运动时电机定子与转子的相对角较小。

2.2 永磁直驱转向架构架

如图 6 所示,永磁直驱转向架构架采用全钢焊

接 H 型结构,侧梁采用 U 型结构,断面为箱形结构,横梁采用箱型结构,并设有对称式三角反力杆安装座、横向止挡和牵引拉杆安装复合座。



图 6 永磁直驱转向架构架示意图
Fig. 6 Schematic diagram of permanent magnet direct drive bogie frame

2.3 其他结构

图 7 为一系悬挂装置,该装置采用锥形橡胶堆提供垂向横向与纵向刚度,结构简单,技术成熟可靠。图 8 为二系悬挂装置,该装置采用空气弹簧全承载结构,设置了横向和垂向减振器衰减振动,设置横向止挡用以限制二系产生过大的横向位移,设置了较大的空簧横向跨距,并取消了扭杆。



图 7 一系悬挂装置
Fig. 7 Primary suspension device

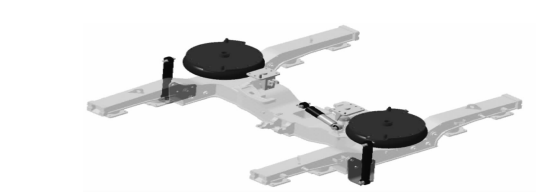


图 8 二系悬挂装置
Fig. 8 Secondary suspension device

图 9 为该转向架的中心牵引结构,该装置采用 Z 型双牵引拉杆牵引,其产生的附加横向和垂向刚度均较小,有利于提高乘客的乘坐舒适性。

如图 10 所示,基础制动的踏面制动单元先安装在过渡板上,再通过 3 个穿过侧梁的螺栓固定在侧梁上。在每根车轴的 1 个轴端上设置了 1 套轴端防滑装置,以防止列车制动时车轮打滑。



图 9 Z 型双牵引拉杆
Fig. 9 Z-type double traction rod

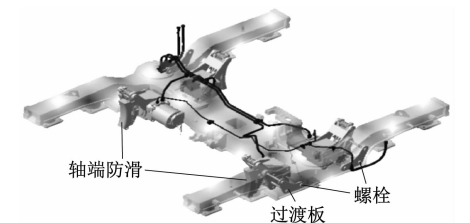


图 10 踏面制动单元安装示意图
Fig. 10 Installation diagram of tread brake unit

3 主要台架试验验证

为验证永磁直驱转向架的性能,本文对永磁直驱电机、构架等部件进行了试验验证。依据 IEC 60349-4:2012《电力牵引 铁路与道路车辆用旋转电机 第 4 部分:与电子变流器相连接的永磁同步电机》,参照对电力牵引轨道机车车辆和公路车辆用旋转电机的相关标准,对永磁直驱电机进行了冷态电阻、绝缘电阻、振动限度、空载反电动势、稳态短路、温升、热态绝缘电阻、耐压、特性、效率、噪声、超速等试验,并与牵引系统进行了配套试验。验证结果表明:各项参数均符合相关标准的要求;永磁直驱牵引系统的效率比异步牵引系统的效率约高 5% (见图 11)。

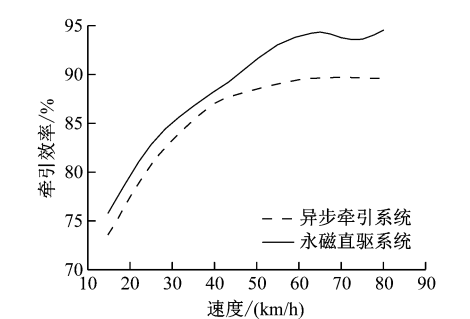


图 11 永磁直驱系统和异步牵引系统牵引效率对比
Fig. 11 Efficiency comparison of permanent magnet direct drive system and asynchronous traction system

4 主要线路试验验证

将装用永磁直驱转向架的列车与装有异步牵

引系统的列车在线路上共线运行,依据合同和相关标准开展了各项型式试验,结果表明各项性能指标均满足要求。针对永磁直驱转向架的特点,本文重点在能耗及动力学性能方面,将永磁直驱列车和异步牵引系统列车的试验数据进行对比。

4.1 能耗对比

本文在徐州地铁1号线(路窝站—徐州东站站)上进行试验测试。分别选取1列永磁直驱列车

和1列异步牵引系统列车,两列车均采用ATO(列车自动运行)往返运行一圈,测试地铁车辆在AW0(空载)、AW2(定员载荷)、AW3(超员载荷)3种载荷工况下的牵引总能耗(包括牵引能耗和辅助能耗)。

如表2所示,试验结果表明,与异步牵引系统列车相比,永磁直驱列车的牵引总能耗可减少20%~30%。

表2 永磁直驱列车和异步牵引系统列车的能耗对比结果

Tab.2 Comparison results of energy consumption of permanent magnet direct drive train and asynchronous traction system train

| 载荷工况 | 上行列车的牵引总能耗/(kWh) | | | | 上行列车的 能耗减少 幅度/% | 下行列车的牵引总能耗/(kWh) | | | | 下行列车的 能耗减少 幅度/% | 上下行平均 能耗减少 幅度/% |
|------|------------------|--------------|-----------|--|-----------------------|------------------|--------------|-----------|--|-----------------------|-----------------------|
| | 永磁直 驱列车 | 异步牵引 系统列车 | 能耗减 少值 | | | 永磁直 驱列车 | 异步牵引 系统列车 | 能耗减 少值 | | | |
| AW0 | 96.3 | 144.6 | 48.3 | | 33.4 | 114.4 | 144.5 | 30.1 | | 20.8 | 27.1 |
| AW2 | 109.7 | 139.1 | 29.4 | | 21.1 | 127.7 | 157.6 | 29.9 | | 19.0 | 20.0 |
| AW3 | 122.5 | 154.7 | 32.2 | | 20.8 | 157.1 | 196.6 | 39.5 | | 20.1 | 20.4 |

注:路窝站至徐州东站站为上行,徐州东站站至路窝站为下行;能耗减少值=异步牵引系统列车的列车牵引总能耗-永磁直驱列车的列车牵引总能耗;能耗减少幅度=(能耗减少值/异步牵引系统列车的列车牵引总能耗)×100%。

4.2 动力学性能对比

动力学试验结果表明:在AW0、AW3两种载荷工况下,对于空气弹簧有气和无气两种情况,装用永磁直驱转向架的列车在正线运行时的安全指标均满足GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》和合同的要求,平稳性指标达到优等级。

如图12~15(皆在AW0工况下),装用永磁直驱转向架的动车的动力学试验指标(包括脱轨系数、轮重减振率、轮轴横向力和垂向平稳性指标等)均优于装用异步牵引系统转向架的动车。

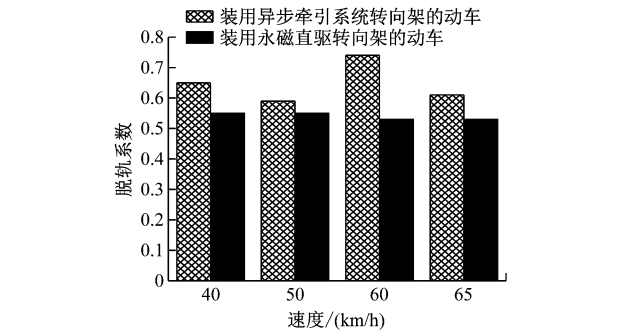


图12 永磁直驱列车和异步牵引系统列车的脱轨系数对比
Fig. 12 Comparison of derailment coefficients between permanent magnet direct drive trains and asynchronous traction system trains

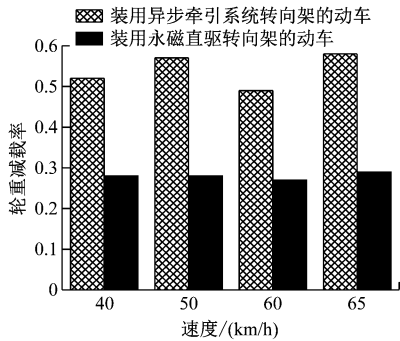
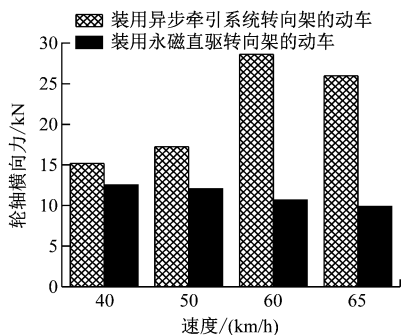


图13 永磁直驱列车和异步牵引系统列车的轮重减载率对比
Fig. 13 Comparison of wheel load reduction ratio between permanent magnet direct drive train and asynchronous traction system train

由图12~14可看出,与异步牵引系统列车相比,永磁直驱转向架列车的脱轨系数小0.05~0.21,轮重减载率小0.22~0.30,轮轴横向力小3~18 kN。

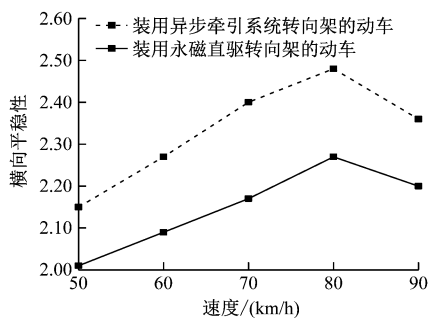
由图15可看出,相较于异步牵引系统列车,永磁直驱转向架列车在横向平稳性、垂向平稳性上更优。在80 km/h运行速度下,永磁直驱转向架列车的横向平稳性降低了约0.25,垂向平稳性降低了约0.10。



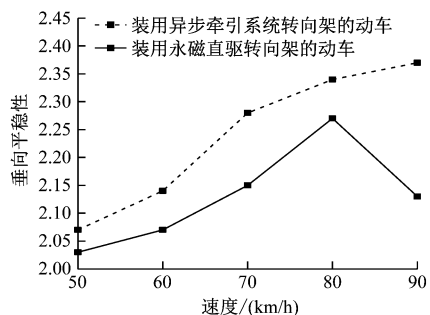
注:基于 310 m 最小曲线半径进行计算对比。

图 14 永磁直驱列车和异步牵引系统列车的轮轴横向力

Fig. 14 Axle lateral force of permanent magnet direct drive train and asynchronous traction system train



a) 横向平稳性



b) 垂向平稳性

注:在直线段上进行计算对比。

图 15 永磁直驱列车和异步牵引系统列车的横向、垂向平稳性对比

Fig. 15 Comparison of lateral and vertical stability of permanent magnet direct drive train and asynchronous traction system train

5 结语

B 型地铁车辆采用永磁直驱转向架既结合了具

有节能环保特点的永磁同步电机技术,还实现了车辆的小轴距,提升了列车在曲线段的通过能力。与采用异步牵引系统的列车相比,采用永磁直驱转向架的列车牵引系统效率约高 5%,列车节能幅度为 20%~30%。而且,装用永磁直驱转向架的地铁列车的曲线通过安全性指标更优,可适应更小的正线曲线半径,有利于降低线路的规划难度、减少线路的建设成本。

参考文献

- [1] 楚永萍,唐永明,冯遵委,等. 柔性直驱式转向架:CN 102963388 B[P]. 2015-06-24.
CHU Yongping, TANG Yongming, FENG Zunwei, et al. Flexible direct drive bogie: CN 102963388 B[P]. 2015-06-24.
- [2] 楚永萍,唐永明,冯遵委,等. 一种直驱式转向架结构:CN 102963387 B[P]. 2015-06-24.
CHU Yongping, TANG Yongming, FENG Zunwei, et al. A direct drive bogie structure: CN 102963387 B[P]. 2015-06-24.
- [3] 胡定祥,楚永萍,赵旭东,等. 电机抱轴安装式永磁直驱转向架:CN 204956480 U[P]. 2016-01-13.
HU Dingxiang, CHU Yongping, ZHAO Xudong, et al. Axle-mounted permanent magnet direct drive bogies with electric motors: CN 204956480 U[P]. 2016-01-13.
- [4] 金鑫,胡定祥,孙海东,等. 轨道车辆转向架电机用三角支撑装置:CN 204956481 U[P]. 2016-01-13.
JIN Xin, HU Dingxiang, SUN Haidong, et al. Triangle support device for rail vehicle bogie motors: CN 204956481 U[P]. 2016-01-13.
- [5] 金鑫,胡定祥,孙海东,等. 三角支撑架:CN 303569849 S[P]. 2016-01-27.
JIN Xin, HU Dingxiang, SUN Haidong, et al. Triangular support frame: CN 303569849 S[P]. 2016-01-27.
- [6] 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(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(6): 17.

(收稿日期:2021-10-28)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821