DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2022.05.014

电力牵引与控制

永磁同步直驱牵引系统在徐州地铁1号线的应用

曾　云[1]，陈启会[1]，曾小凡[2]，李　科[1]

（1.株洲中车时代电气股份有限公司，湖南 株洲　412001；
2.中车株洲电力机车研究所有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：地铁列车具有启动加速度高、运行速度快、准点率高且运力大等优点，其能耗问题一直是地铁运营的主要关注点之一。如何进一步提高地铁列车节能效率成为牵引系统设计研究的重点。相比传统异步牵引系统，传动效率高、过弯能力强的永磁直驱牵引系统是轨道交通牵引传动技术的发展方向之一。对照传统异步牵引系统性能指标，基于徐州地铁1号线列车确定永磁同步直驱牵引电机的设计选型，研制了一套永磁直驱牵引系统。针对永磁直驱牵引系统的特性，采用全速范围永磁同步电机无位置控制方法以及适用于永磁直驱系统的自适应黏着控制方法来完成牵引逆变器和永磁同步直驱电动机的实时控制。装车试验表明，永磁直驱牵引系统具有电机位置辨识稳定性好、响应迅速等优点，在低黏着轨面条件下列车牵引力发挥平稳且高效。能耗对比试验表明，永磁直驱牵引系统比异步牵引系统平均节能22.7%，可以获得显著的节能效果。结构紧凑及节能高效的永磁直驱牵引系统对促进轨道交通行业进一步发展具有积极意义。

关键词：徐州地铁；永磁直驱牵引；永磁同步电机；无位置传感器；黏着控制；水冷装置；地铁列车
中图分类号：U231；TM351　　**文献标识码：**A
文章编号：1000-128X(2022)05-0094-09

Application of permanent magnet synchronous direct-drive traction system on Xuzhou metro line 1

ZENG Yun[1], CHEN Qihui[1], ZENG Xiaofan[2], LI Ke[1]

(1. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Metro trains have the advantages of high starting acceleration, high operating speed, punctuality and large carrying capacity, but energy consumption is also an important issue that needs close attention in metro operation. How to further improve the efficiency of energy conservation for metro trains has become a key point in the design of traction system. Compared with traditional asynchronous traction system, the direct-drive permanent magnet traction system with high driving efficiency and good corner-passing performance is one of the directions for the research and development of traction and transmission technology used in rail transit system. Benchmarking the performance indicators of traditional asynchronous traction system, a direct-drive permanent magnet traction system was developed based on the design and model selection of the direct-drive permanent magnet synchronous motor on the train of Xuzhou metro line 1. According to the characteristics of direct-drive permanent magnet traction system, a new full-speed range position sensorless control technique for permanent magnet synchronous motor and an adhesion control technique adapted for direct-drive permanent magnet system were used to realize real-time control of the traction inverter and direct-drive permanent magnet synchronous motor. The on-vehicle test showed that the direct-drive permanent magnet traction system has such advantages as stable motor position identification

收稿日期：2021-07-14；修回日期：2022-07-28
通信作者：曾　云（1979—），男，硕士，工程师，研究方向为城轨车辆牵引系统设计；E-mail: zengyun@csrzic.com

and fast response, and the traction force is stable and efficient with low adhesion on rail surface. The energy consumption comparison test showed that the direct-drive permanent magnet traction system was 22.7% higher than asynchronous traction system in terms of energy conservation, indicating significant energy saving performance. The direct-drive permanent magnet traction system, which is compact and energy efficient, has positive significance for promoting the further development of the rail transit industry.

Keywords: Xuzhou metro; direct-drive permanent magnet traction; permanent magnet synchronous motor; position sensorless; adhesion control; water cooling device; metro train

0　引言

从 20 世纪末开始，国外多个国家开展永磁同步牵引系统相关研究并取得了进展[1-2]。日本东芝公司为 E954/E955 系列机车研制出 355 kW 大功率永磁同步电机；德国西门子公司为城轨列车开发了 150 kW 抱轴直驱式永磁同步电机；捷克斯柯达公司针对城轨列车开发了 46.6 kW 直驱式永磁同步牵引系统[3]。

相比传统的异步电机，永磁同步电机具有损耗低、效率高、功率密度高及噪声低等显著优点，是轨道交通牵引系统技术发展方向之一。在保留永磁牵引系统既有优势的情况下，永磁直驱牵引系统取消了齿轮箱的配置。直驱模式不仅可进一步提高传动效率，而且为转向架布置节约了大量空间，能够有效缩短转向架轴距，提高转向架过弯能力，进而减小地铁线路曲线半径，进一步缩减建设成本[4]。

自 2011 年起，沈阳地铁 2 号线、长沙轨道交通 1 号线和长沙轨道交通 5 号线等多条线路应用了永磁同步牵引系统并取得良好的效果[5-6]。2020 年 8 月，基于徐州地铁 1 号线 103#列车永磁直驱牵引系统在国内城轨领域实现商业运营。本文将详细介绍永磁直驱牵引系统运用情况及实际效能。

1　永磁同步直驱系统整体架构

1.1　徐州地铁 1 号线异步牵引系统

徐州地铁 1 号线列车速度等级为 80 km/h，采用(Tc-Mp-M)+(M-Mp-Tc)的 4 动 2 拖编组形式[7]，其中 Tc 为有司机室的拖车，Mp 为有受电弓的动车，M 为无受电弓的动车。如图 1 所示，列车高压电路采用主辅分离方式，高压电器箱作为高压输入设备配置在 Mp 车，每节 Mp/M 车配置 1 台牵引逆变器，辅助逆变器设置在 Tc 车上。牵引系统主要由牵引逆变器、高压电器箱、过压吸收电阻、齿轮箱及联轴节和牵引电机等设备组成。徐州地铁 1 号线原有异步牵引系统采用 VVVF 逆变器与异步牵引电动机，逆变器采用走行风冷却方式。

1.2　徐州地铁 1 号线永磁直驱系统

如图 1 所示，本文在保持列车高压电路基本不变的前提下，采用永磁直驱牵引逆变器和永磁同步直驱电动机对等替代异步牵引系统相应设备的方式，开展永磁直驱牵引系统的应用开发。永磁直驱牵引系统与异步牵引系统的配置差异如表 1 所示，部分部件质量有所增加，但齿轮箱的取消及转向架的结构优化导致采用永磁直驱牵引系统的列车与采用异

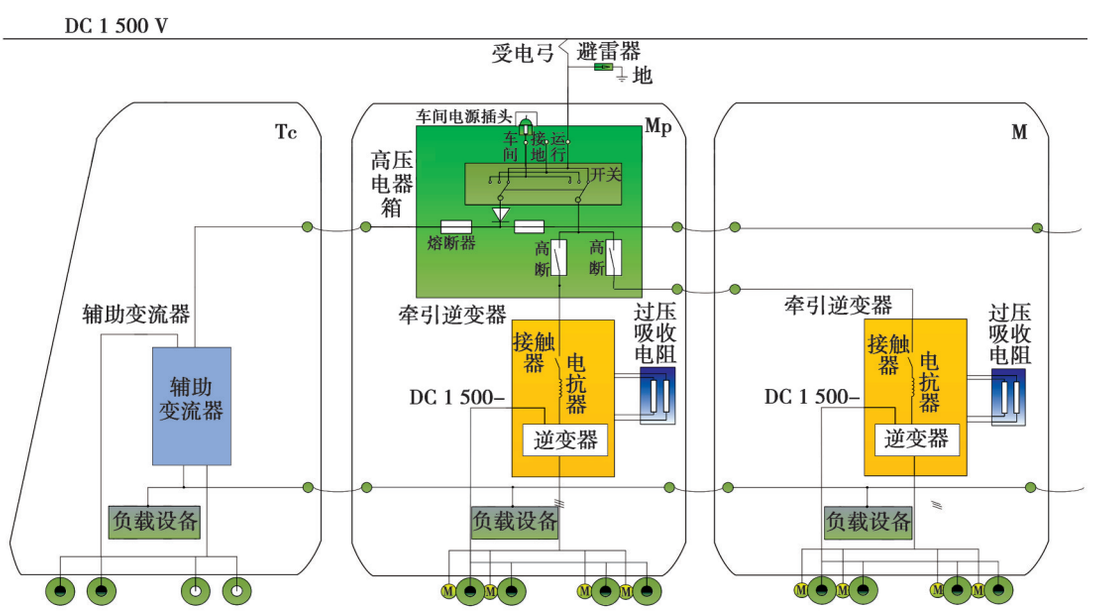


图 1　徐州地铁 1 号线列车高压电路原理图(Tc-Mp-M)

Fig. 1　Schematic diagram of high voltage circuit of Xuzhou metro line 1 train(Tc-Mp-M)

步牵引系统的列车质量基本保持不变。

永磁同步直驱电动机增加用于冷却的水冷装置，同时在保持列车车下布局基本不变的前提下（异步牵引系统设备车下布局如图2所示），逆变器和异步电机既有位置分别安装永磁直驱牵引逆变器和永磁同步直驱电动机，具体位置如图3所示。

2 永磁直驱牵引系统关键技术

永磁同步电机控制通常基于位置反馈进行闭环控制，该控制方式需要安装位置传感器，但对于永磁直驱牵引系统而言，位置传感器安装和调试困难且在恶

表1 异步牵引系统和永磁直驱牵引系统主要部件配置表

Table 1 Configuration table of main components of asynchronous traction system and direct-drive permanent magnet traction system

部件名称	异步牵引系统	永磁直驱牵引系统
高压电器箱	数量：2 外形尺寸：2 145 mm×700 mm×620 mm； 质量：470 kg；额定输入电流：1 400 A	数量：2 外形尺寸：2 145 mm×700 mm×620 mm； 质量：470 kg；额定输入电流：1 400 A
牵引逆变器 (车控)	数量：4 外形尺寸：2 005 mm×1 380 mm×632 mm； 质量：930 kg；额定输出功率：1 000 kW	数量：0
牵引逆变器 (轴控)	数量：0	数量：4 外形尺寸：2 270 mm×1 996 mm×624 mm； 质量：1 060 kg；额定输出功率：1 000 kW
三相异步 牵引电机	数量：16 外形尺寸：656 mm×510 mm×593 mm； 质量：590 kg；额定功率：190 kW； 额定转速：1 800 r/min；额定转矩：1 008 N·m	数量：0
永磁同步 直驱 牵引电机	数量：0	数量：16 外形尺寸：1 274 mm×650 mm×507 mm；质量：1 050 kg； 额定功率：190 kW；额定转速：320 r/min； 额定转矩：5 670 N·m
水冷装置	数量：0	数量：4 外形尺寸：1 820 mm×710 mm×565 mm； 质量：300 kg；冷却容量：46 kW
过压吸收 电阻箱	数量：4 外形尺寸：766 mm×578 mm×543 mm； 质量：70 kg；额定功率14.4 kW	数量：4 外形尺寸：766 mm×578 mm×543 mm； 质量：70 kg；额定功率：14.4 kW
齿轮箱及 联轴节	数量：16 外形尺寸：883 mm×304 mm×655 mm； 质量：385 kg；传动比：6.687 5	数量：0

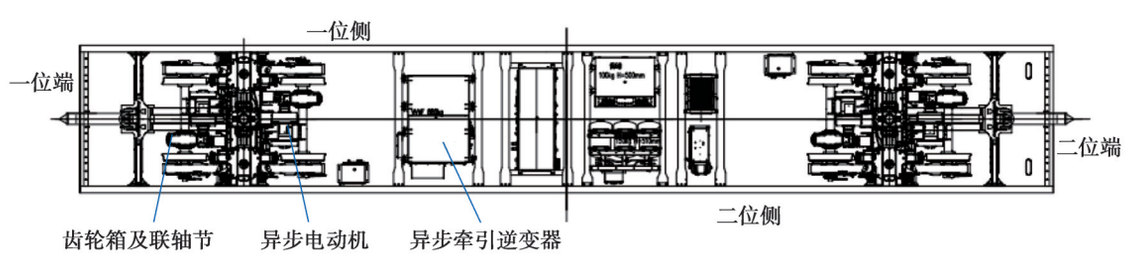


图2 异步牵引逆变器及异步电动机车下安装布局图

Fig. 2 Installation layout diagram of asynchronous traction inverter and asynchronous electric motor

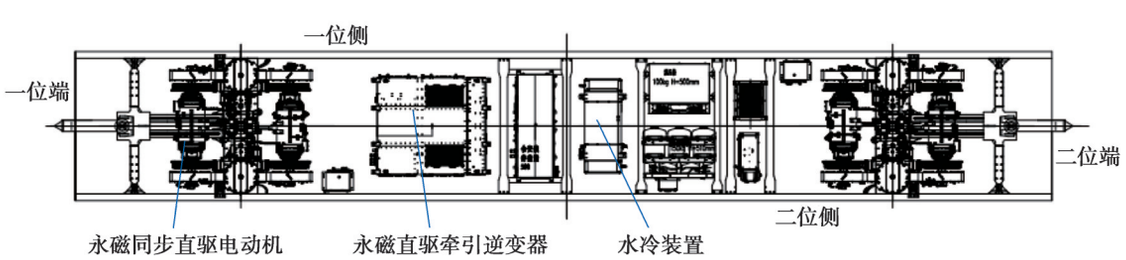


图3 永磁直驱牵引逆变器、水冷装置及永磁同步直驱电动机车下安装布局图

Fig. 3 Installation layout diagram of direct-drive permanent magnet traction inverter, water cooling device and direct-drive permanent magnet synchronous electric motor

劣的电磁环境下易受电磁干扰导致位置信号跳变。此外，因永磁直驱牵引系统取消了齿轮箱，轮轨扰动直接传递至电机端，造成速度振荡；在轴端牵引力相同的情况下，直驱电机给定转矩远大于齿轮箱传动系统牵引电机，以上情况均加大了永磁直驱牵引系统黏着控制的技术难度。因此，为确保永磁直驱牵引系统的顺利应用，需攻克永磁同步无位置控制技术以及与永磁直驱系统特性匹配的黏着利用控制技术[8]。

2.1　永磁同步无位置控制策略

研究提出一种永磁同步电机无位置控制方法，该方法在低速段采用基于电机凸极脉冲注入的位置估计策略，高速段采用基于永磁电机电磁关系的位置估计策略，同时通过高低速平滑过渡处理来实现全速范围无位置控制，控制框图如图 4 所示[9-13]。

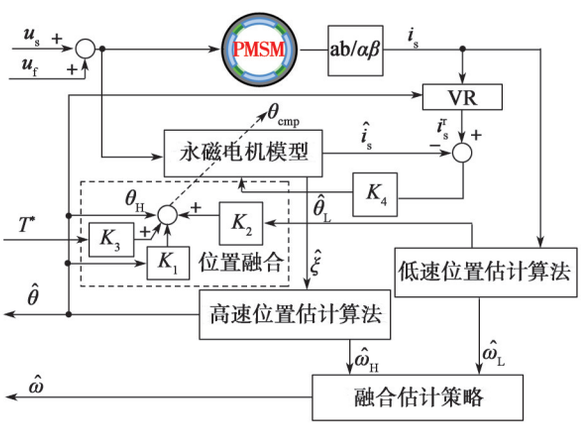


图 4　永磁同步无位置控制框图

Fig. 4　Block diagram of position sensorless control of permanent magnet synchronous motor

扩展反电势观测法是基于永磁电机电磁关系实现位置估算的代表性方法。

永磁电机电压方程为

$$\begin{bmatrix}u_d\\u_q\end{bmatrix}=R\begin{bmatrix}i_d\\i_q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}pL_d & -L_q\omega_e\\L_q\omega_e & pL_d\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_d\\i_q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\(L_d-L_q)(\omega_e i_d-\dot{i})+\phi_f\omega_e\end{bmatrix}\tag{1}$$

式中：u_d、u_q 分别为直轴电压和交轴电压；i_d、i_q 分别为直轴电流和交轴电流；R、L_d、L_q、ϕ_f 分别为电机定子电阻、直轴电感、交轴电感、反电势常数；ω_e 为转子角速度；p 为微分算子。

将式(1)变换到 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系为

$$\begin{bmatrix}u_\alpha\\u_\beta\end{bmatrix}=R\begin{bmatrix}i_\alpha\\i_\beta\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}pL_d & (L_d-L_q)\omega_e\\-(L_d-L_q)\omega_e & pL_d\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_\alpha\\i_\beta\end{bmatrix}+\lambda\begin{bmatrix}-\sin\theta_e\\\cos\theta_e\end{bmatrix}\tag{2}$$

式中：$\lambda=(L_d-L_q)(\omega_e i_d-\dot{i}_q)+\phi_f\omega_e$；$\theta_e$ 为转子位置角；$\dot{i}_q$ 为 i_q 的微分值。

设定 $\bar{e}_{\alpha\beta}=\begin{bmatrix}\bar{e}_\alpha\\\bar{e}_\beta\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\lambda\sin\theta_e\\-\lambda\cos\theta_e\end{bmatrix}$，为扩展反电势，对其进行观测就可以得到永磁体的位置角和速度。

由式(2)可得：

$$\left.\begin{aligned}(pL_d+R)i_\alpha&=u_\alpha-(L_d-L_q)\omega_e i_\beta+\lambda\sin\theta_e\\(pL_d+R)i_\beta&=u_\beta-(L_d-L_q)\omega_e i_\alpha-\lambda\cos\theta_e\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

将 u_α、u_β、i_α、i_β 输入给扩展反电势观测器得到[13]：

$$\left.\begin{aligned}(pL_d+R)\bar{i}_\alpha&=u_\alpha-(L_d-L_q)\bar{\omega}i_\beta+\frac{K_P s+K_I}{s}(i_\alpha-\bar{i}_\alpha)\\(pL_d+R)\bar{i}_\beta&=u_\beta+(L_d-L_q)\bar{\omega}i_\alpha+\frac{K_P s+K_I}{s}(i_\beta-\bar{i}_\beta)\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

式中：$\bar{i}_\alpha$、$\bar{i}_\beta$、$\bar{\omega}$ 为估算量；K_P、K_I 分别为比例、积分参数。

通过式(4)，将电流的估算值与实测值进行比较后送入比例积分调节器形成闭环，以获取反电动势。扩展反电动势包含转子的位置及转速信息，利用电压锁相环从而实现位置辨识功能[13]。

永磁电机低速位置估计方法一般是借助凸极效应来实现。脉动高频电压注入示意如图 5 所示，d 轴和 q 轴为实际的转子坐标轴，θ_r 为实际的转子位置角。d^* 轴和 q^* 轴为估计的转子坐标轴，θ_r^* 为估计的转子位置角，估计的转子位置角和实际转子位置角之间的偏差为 γ，其中 $\gamma=\theta_r^*-\theta_\gamma$。

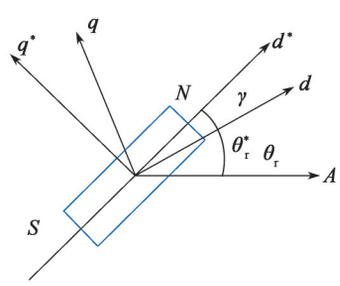


图 5　脉动高频电压注入示意图

Fig. 5　Schematic diagram of pulsating high frequency voltage injection

在估计的转子位置方向上注入脉动电压

$$u_c=U_c\cos(\omega_c t)\tag{5}$$

式中：U_c 为高频电压幅值；ω_c 为高频分量的频率。

由于转子凸极影响，产生的电流中会出现与转子位置有关的信息，产生的电流可以表示为正序电流分量 i_p 和负序电流分量 i_n 之和，即

$$i_c^s=i_p+i_n\tag{6}$$

式中：

$$i_p=\frac{-\mathrm{j}u_c}{4\omega_c L_d L_q}\left[(L_d+L_q)\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_c t+\theta_r^*)}-(L_d-L_q)\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_c t+\theta_r^*-2\gamma)}\right]\tag{7}$$

$$i_n=\frac{-\mathrm{j}u_c}{4\omega_c L_d L_q}\left[-(L_d+L_q)\mathrm{e}^{\mathrm{j}(-\omega_c t+\theta_r^*)}+(L_d-L_q)\mathrm{e}^{\mathrm{j}(-\omega_c t+\theta_r^*-2\gamma)}\right]\tag{8}$$

为提取位置误差信息，需要对载波电流解调，将

式(7)和式(8)乘以 $e^{-j(\omega_c t+\theta_r^*)}$ 后可得：

$$i_p e^{-j(\omega_c t+\theta_r^*)}=\frac{-ju_c}{4\omega_c L_d L_q}[(L_d+L_q)-(L_d-L_q)e^{j(2\theta_r-2\theta_r^*)}] \tag{9}$$

$$i_n e^{-j(\omega_c t+\theta_r^*)}=\frac{-ju_c}{4\omega_c L_d L_q}[(L_d-L_q)e^{j(-2\omega_c t-2\gamma)}-(L_d+L_q)e^{j(-2\omega_c t)}] \tag{10}$$

式(10)中的高频分量通过低通滤波予以处理，最终只剩下式(9)中的电流信号，将式(9)变为

$$i_p e^{-j(\omega_c t+\theta_r^*)}=\frac{u_c}{4\omega_c L_d L_q}\{-(L_d-L_q)\sin(2V\Delta\theta_r)-j[(L_d+L_q)-(L_d-L_q)\cos(2V\Delta\theta_r)]\} \tag{11}$$

式中：$\Delta\theta_r=\theta_r-\theta_r^*$。

从式(11)的实部可以看出，在位置偏差较小的时候，实部会近似于0，将该实部通过一个位置锁相环便能得到位置信息。

2.2 基于永磁直驱系统的自适应黏着控制

非直驱传动系统电机以齿轮箱作为缓冲，轮轨扰动对电机速度的影响较小；徐州地铁1号线永磁直驱牵引系统取消了齿轮箱，轮轨振动直接传递到电机端，导致电机转速扰动较非直驱传动系统更为明显。直驱传动系统和非直驱传动系统的电机加/减速度对比如图6所示。对图6的波形比较可知，直驱电机加/减速度波动大于非直驱电机加/减速度。此外，在牵引力相同的情况下，直驱电机给定转矩数倍于齿轮箱传动系统电机，给黏着利用控制力矩调节带来困难。

针对永磁直驱系统的上述问题，提出一种如图7所示的自适应黏着利用控制方法[14]，该方法通过对工况、力矩、速度及加速度信息进行模糊规则处理，通过模糊逻辑对加速度阈值和蠕滑控制相关参数进行实时自适应调整，及时准确判断当前空转/滑行情况，进而合理调整黏着力矩减载幅度。

同时，为解决直驱系统电机转速扰动大的问题，提出的自适应黏着利用控制方法根据永磁直驱牵引系统速度波动情况，采用多重组合滤波算法，以滤除轮轨振动给直驱电机转速造成的扰动，及时快速调整黏着实际力，避免因黏着实际力减载不及时导致空转/滑行趋势进一步恶化。

2.3 永磁直驱牵引电机

根据电机功率公式 $P=T\times n/9550$，功率相同的电机转速越低，输出转矩越大。采用直驱模式，牵引电机额定转速由 1 800 r/min 降至 320 r/min；在保持额定功率 190 kW 不变的情况下，永磁同步直驱电动机额定转矩增至 5 670 N·m，数倍于异步电机。

根据电机转矩公式：$T\propto D_{i1}^2\times L$（$D_{i1}$ 为定子内径，L

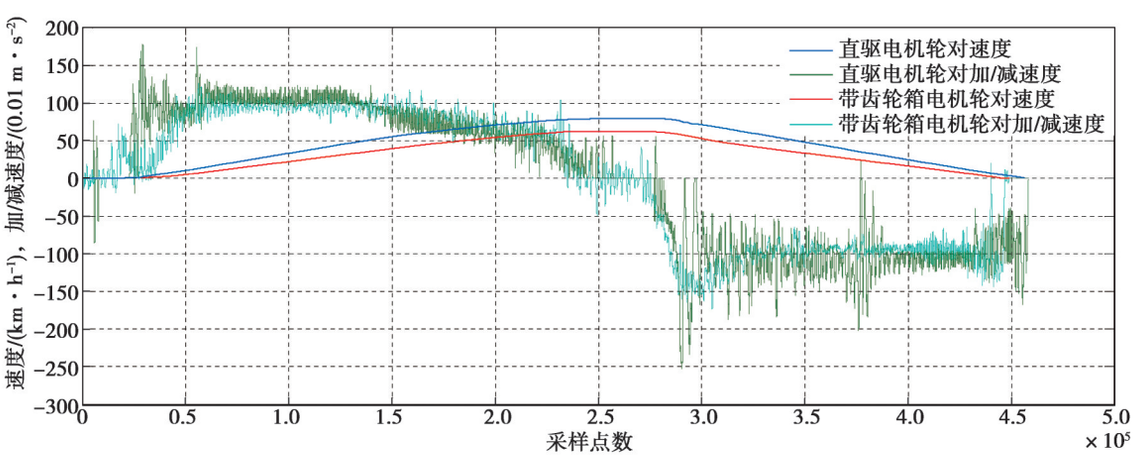


图6 直驱系统和齿轮箱传动系统的电机加/减速度波形

Fig. 6 Motor acceleration/deceleration waveforms of direct-drive system and gearbox transmission system

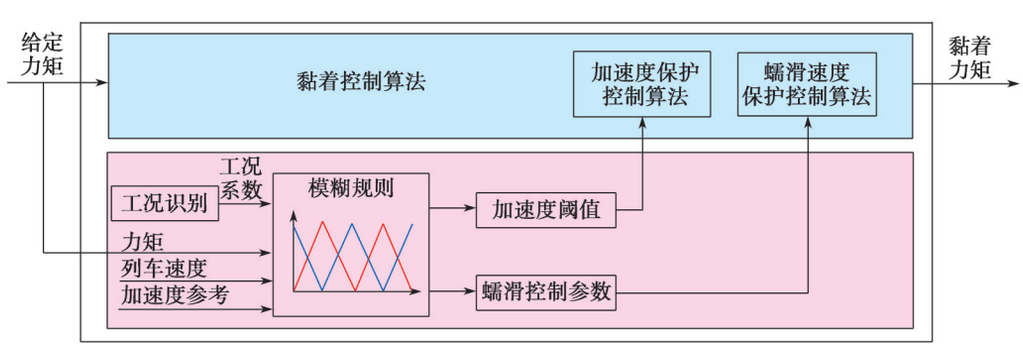
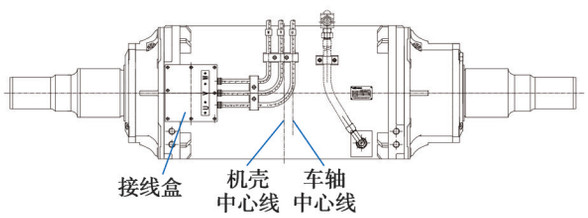


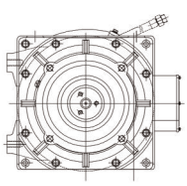
图7 黏着力自适应调整框图

Fig. 7 Block diagram of adhesion adaptive adjustment

为铁芯长度），即电机有效体积与电机转矩成正比。提高电机转矩，则需增大电机有效体积。相比于异步电机，永磁同步直驱电动机径向尺寸和轴向尺寸均有所增大，但增加幅度受转向架安装空间限制，图 8 为永磁同步直驱电动机外形图。



（a）主视图



（b）侧视图

图 8　徐州地铁 1 号线永磁同步直驱电动机外形图

Fig. 8　Outside view of direct-drive permanent magnet synchronous motor of Xuzhou metro line 1

增加极对数是直驱电机实现大转矩的重要途径。由电机转速公式 $n=60f/p$，通过较低的转速 n 和已知电频率 f 合理选取直驱电机极对数。在电机外径不变的情况下，增加极对数且保持定子磁通密度水平不变，则多极电机的定子轭部厚度减小，增加电机定子内径 D_{i1}，同时缩短电机铁芯长度 L。

选择合理的极槽配合，缩短定子线圈的节距，进而减小线圈端部长度。电机极数与线圈长度的关系如图 9 所示，增加直驱电机极数一方面减小定子线圈的质量，另一方面减少电机长度尺寸。

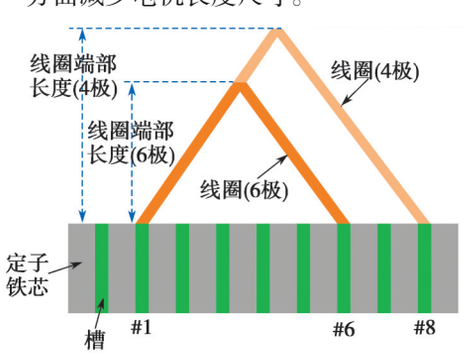


图 9　电机极数与线圈长度关系示意图

Fig. 9　Schematic diagram of the relationship between number of motor poles and coil length

3　试验验证

3.1　永磁同步无位置控制技术试验

本文提出的永磁同步直驱电机无位置控制方法在低速段主要基于转子的凸极效应进行位置观测，观测精度受电机交轴、直轴电感的影响；电机交轴、直轴电感与电机交轴、直轴电流有关，尽管直轴电感随直轴电流变化不大，但交轴电感通常会随交轴电流变化而较大地变化，具体试验测试如图 10 所示。

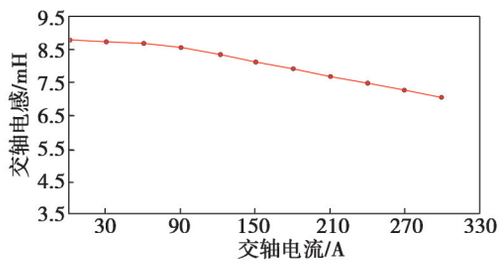


图 10　交轴电感随交轴电流变化图

Fig. 10　Schematic diagram of quadrature inductance varying with quadrature current

交轴电感的变化影响磁场凸极特性，从而影响无位置观测精度。受电流影响后实际的转子磁场凸极特性如图 11 所示。图 11 中实线的 NS 极为实际转子位置，虚线的 N′S′ 极为受电流影响后实际的转子磁场凸极特性，转子磁场凸极特性和转子实际位置存在明显差别。

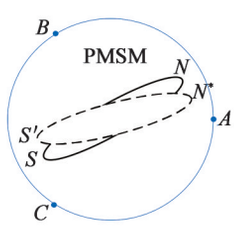


图 11　受电流影响后实际的转子磁场凸极特性

Fig. 11　Actual salient pole characteristics of rotor magnetic field after being affected by current

本文提出的永磁同步直驱电机低速无位置控制方法在高速段的位置估计与转子凸极无关，但在高低速段进行无位置控制算法模式切换时因为位置观测的误差导致力矩抖动，该种抖动在直驱电机中显著增大。为解决力矩模式切换位置观测不一致引起的偏差，对低速无位置估计的位置进行位置补偿，如图 12。位置偏差补偿与交轴电流相关，通过试验数据拟合为式(12)。电机力矩抖动见图 13 和图 14。

$$\theta_c = 0.066 i_q \tag{12}$$

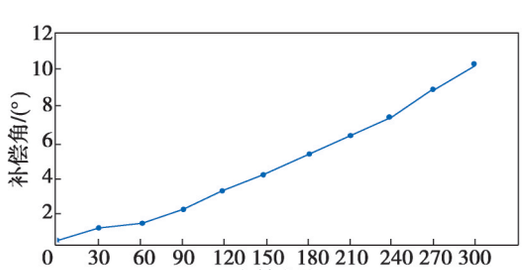


图 12　补偿角随交轴电流变化图

Fig. 12　Variation diagram of compensation angle with quadrature axis current

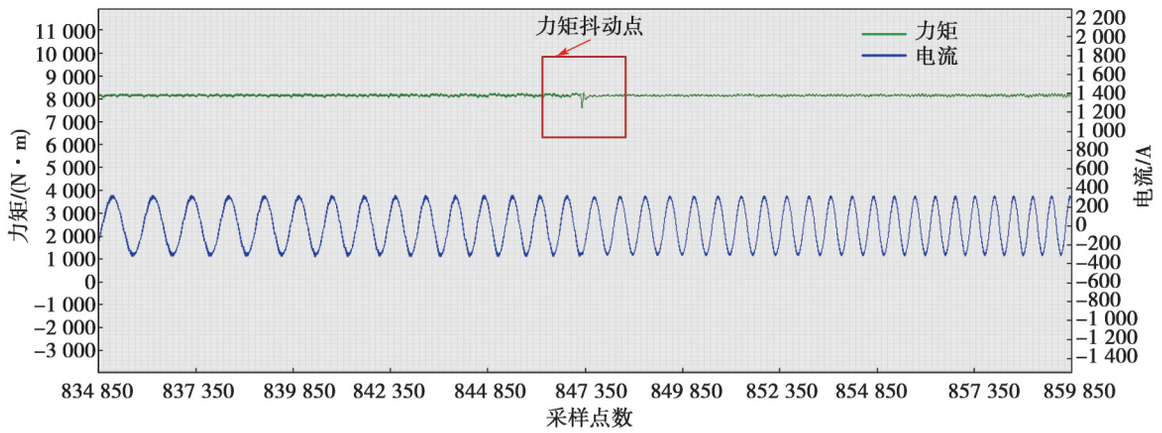


图 13　无过渡点平滑切换处理时力矩和电流(力矩有明显抖动)波形

Fig. 13　Torque and current waveforms during smooth switching without transition point (obvious jitter on torque)

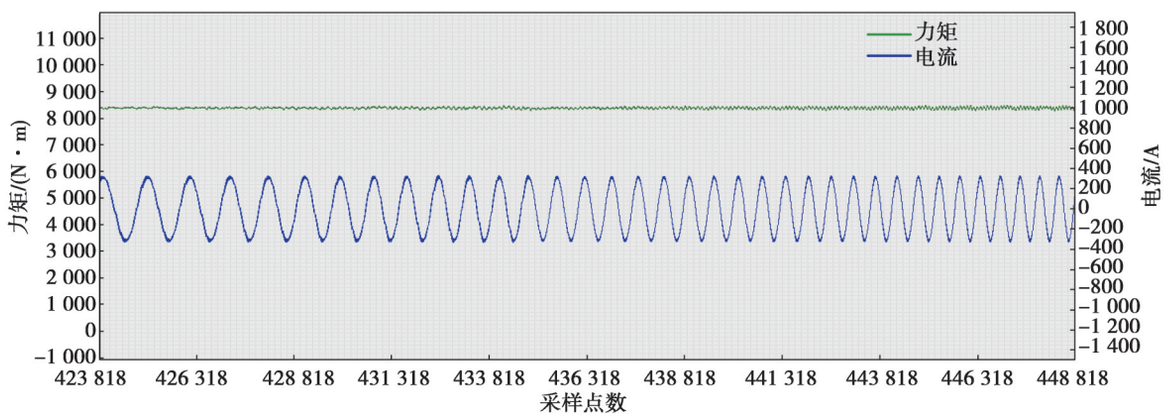


图 14　过渡点平滑切换处理时力矩和电流波形

Fig. 14　Torque and current waveforms during smooth switching with transition point

永磁直驱牵引系统采用直驱方式，车体对电机力矩抖动敏感，使用传统无位置控制技术时试验波形如图 13 所示，在低–高速过渡点存在明显的车体抖动；采用本文方法的试验波形如图 14 所示，低–高速切换过程中力矩抖动现象已消失，工况切换过渡平缓，车体无顿挫感。

试验表明，本文永磁同步无位置控制方法位置辨识稳定性好、响应快且实际运行可靠。

3.2　自适应黏着利用控制技术试验

图 15 为直驱牵引系统自适应黏着控制方法湿轨控制效果。试验数据表明，在低黏着轨面条件下运行黏着力调节波动幅度小，整体黏着利用效率较高。

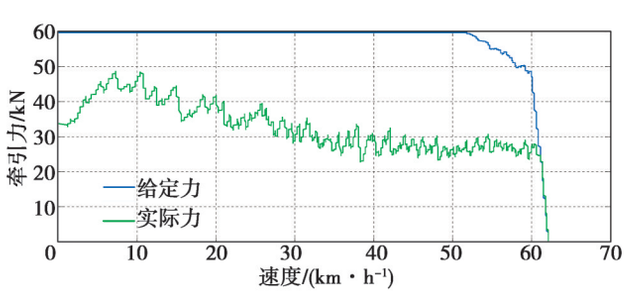


图 15　直驱牵引系统黏着控制效果图

Fig. 15　Renderings of direct-drive traction system adhesion control

3.3　整车牵引性能试验

列车牵引平均加速度和电制动平均减速度是评判牵引系统综合性能的关键指标，徐州地铁 1 号线列车牵引加速度与电制动减速度设计指标如下：

① 超员(AW3)载荷下，在平直干燥轨道、车轮半磨耗状态、额定电压时，列车从 0 加速到 40 km/h，给定最大牵引级位平均加速度不小于 1.0 m/s^2；列车从 0 加速到 80 km/h，给定最大牵引级位平均加速度不小于 0.6 m/s^2。

② 超员(AW3)载荷下，在平直干燥轨道、车轮半磨耗状态、列车在最高运行速度 80 km/h，从给定电制动指令到停车时，列车从 80 km/h 减速到 0 的平均减速度不小于 1.0 m/s^2。

1）牵引加速试验

牵引加速试验波形如图 16 所示，0~40 km/h 加速度为(40.03/3.6)/(13.8−2.96)≈1.026 m/s^2，0~80 km/h 加速度为(80.06/3.6)/(29.2−2.96)≈0.848 m/s^2。

2）电制减速试验

电制动减速试验波形如图 17 所示，80~0 km/h 减速度为(81.87/3.6)/(55.72−33.23)≈1.011 m/s^2。

如图 16 和图 17 所示，永磁直驱牵引系统性能满足徐州地铁 1 号线列车的牵引/电制动能力设计指标。

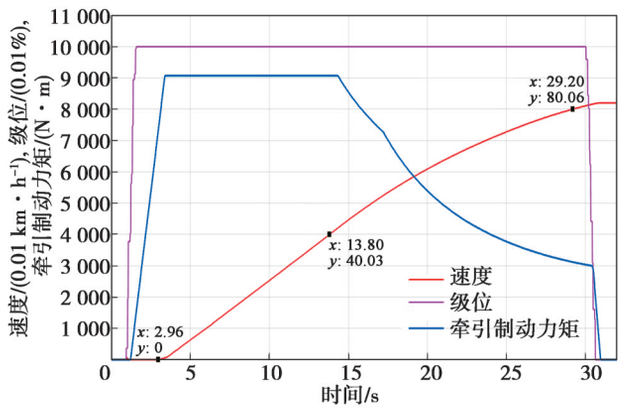


图 16　永磁直驱牵引列车加速度曲线

Fig. 16　Acceleration curve of train with direct-drive permanent magnet traction

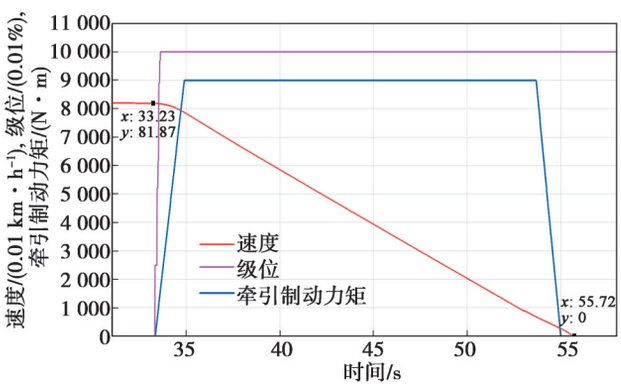


图 17　永磁直驱牵引列车减速度曲线

Fig. 17　Deceleration curve of train with direct-drive permanent magnet traction

3.4　能耗试验

基于徐州地铁 1 号线，在空载、定员、超员不同载荷工况下进行异步牵引系统与永磁直驱牵引系统的能耗对比试验[15]，试验均采用 ATO 自动驾驶模式，能耗对比试验数据如表 2 所示。其中牵引电机能耗表示牵引能耗减去电制动再生反馈能量，辅助系统能耗表示空调、照明、水冷装置等车载设备的能耗，计算总能耗为牵引电机与辅助系统的总能耗。

上述能耗是通过牵引系统自带传感器采集的电压与电流计算所得，而实测总能耗为第三方电度表实测所得。试验列车的运行方向为：上行表示路窝站→徐州东站，下行表示徐州东站→路窝站。节能百分比是采用永磁牵引系统的列车相对于采用异步牵引系统的列车的节能效果，如（161.7−162.3）/161.7≈−0.4%，正值表示永磁直驱牵引系统此项能耗低于异步牵引系统，负值表示永磁直驱牵引系统此项能耗高于异步牵引系统。

将不同载荷工况总能耗试验数据取平均数，如表 3 所示。

结果表明，在空载、定员、超员不同载荷工况下，永磁直驱牵引系统能耗效率均优于异步牵引系统。其中，牵引系统计算总能耗永磁直驱牵引系统比异步牵引系统平均节能 22.0%，实测总能耗永磁直驱牵引系统比异步牵引系统平均节能 22.7%。

表 2　列车能耗对照表

Table 2　Comparison of train energy consumption

载荷工况	运行方向	能耗名称	异步列车能耗/（kW·h^{-1}）	永磁列车能耗/（kW·h^{-1}）	节能百分比/%
空载	上/下行	牵引能耗	161.7	162.3	−0.4
		电制动再生能耗	53.0	112.3	−111.9
		牵引电机能耗	108.7	50.0	54.0
		辅助系统能耗	26.7	40.7	−52.4
		计算总能耗	137.7	94.0	31.7
		实测总能耗	138.2	98.0	29.1
定员	上/下行	牵引能耗	202.7	189.3	6.6
		电制动再生能耗	95.7	129.7	−35.5
		牵引电机能耗	107.0	59.7	44.2
		辅助系统能耗	25.7	46.7	−81.7
		计算总能耗	135.0	110.0	18.5
		实测总能耗	140.9	116.7	17.2
超员	上/下行	牵引能耗	277.0	342.5	−23.6
		电制动再生能耗	154.0	254.0	−64.9
		牵引电机能耗	123.0	88.5	28.0
		辅助系统能耗	32.0	42.0	−31.3
		计算总能耗	160.0	134.5	15.9
		实测总能耗	181.5	142.0	21.8

表 3　列车能耗汇总表

Table 3　Summary of train energy consumption

能耗名称	空载	定员	超员	平均
计算总能耗	31.7%	18.5%	15.9%	22.0%
实测总能耗	29.1%	17.2%	21.8%	22.7%

4　结语

对标传统异步牵引系统，永磁直驱牵引系统在徐州地铁 1 号线获得充分的应用与验证。为克服永磁同步直驱电机位置传感器调试安装困难且在恶劣电磁环境下易受干扰等缺陷，一种低−高速模式切换的永磁同步电机无位置传感器控制方法获得应用；针对取消齿轮箱后电机速度扰动加剧且直驱系统电机给定力矩数倍于传统异步牵引系统的特性，采用一种适用于直驱牵引系统的自适应黏着控制方法。通过装车试验表明，本文提出的永磁同步电机无位置控制方法位置辨识稳定且响应快，完全能够取代有位置传感器控制方案，同时，针对永磁直驱牵引系统特性优化的自适应黏着控制策略带来平滑高效的牵引品质。

相比于传统的异步电机，永磁同步电机效率提高 3% ~5%，在徐州地铁 1 号线现有运行模式下，综合节

能 10% 以上。结构紧凑及节能高效的永磁直驱牵引系统对促进轨道交通市场进一步发展具有积极意义。

参考文献：

[1] 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): 15-21.
FENG Jianghua. Study on the permanent magnet synchronous motor drive system of rolling stock[J]. Electric Drive for Locomotives, 2010(5): 15-21.

[2] 许峻峰, 冯江华 . 永磁同步传动系统的应用概况[J]. 大功率变流技术, 2010(1): 38-43.
XU Junfeng, FENG Jianghua. Application status of permanent magnet synchronous drive system[J]. High Power Converter Technology, 2010(1): 38-43.

[3] 陈萍, 罗情平 . 国外永磁同步牵引系统的发展与应用[J]. 国外铁道车辆, 2017, 54(5): 14-18.
CHEN Ping, LUO Qingping. Analysis of the development and application of the permanent magnet synchronous traction system at abroad[J]. Foreign Rolling Stock, 2017, 54 (5): 14-18.

[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): 34-37.
ZHOU Yonggang, CHEN Chaolu, LIU Xiong. Metro permanent magnet direct-driving traction system design method [J]. Electric Drive for Locomotives, 2015(6): 34-37.

[5] 冯江华 . 轨道交通永磁同步牵引系统的发展概况及应用挑战[J]. 大功率变流技术, 2012(3): 1-7.
FENG Jianghua. Development overview and application challenges of permanent magnet synchronous traction system for rail transit[J]. High Power Converter Technology, 2012(3): 1-7.

[6] 刘可安 . 城市轨道交通永磁同步牵引系统[J]. 铁路技术创新, 2011(5): 11-15.
LIU Kean. Permanent magnet synchronous traction system for Urban Rail Transit[J]. Railway Technical Innovation, 2011(5): 11-15.

[7] 解培金, 刘卓, 闫磊, 等 . 沈阳地铁二号线车辆永磁同步牵引系统[J]. 大功率变流技术, 2012(3): 8-11.
XIE Peijin, LIU Zhuo, YAN Lei, et al. Permanent magnet synchronous traction system for the vehicles of Shenyang metro line 2[J]. High Power Converter Technology, 2012 (3): 8-11.

[8] 冯江华 . 轨道交通永磁电机牵引系统关键技术及发展趋势[J]. 机车电传动, 2018(6): 9-17.
FENG Jianghua. Key technology and development trend of permanent magnet motor traction system for rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(6): 9-17.

[9] 郑汉锋, 许峻峰, 张朝阳, 等 . 永磁同步电机高速弱磁控制比较分析[J]. 机车电传动, 2016(3): 5-9.
ZHENG Hanfeng, XU Junfeng, ZHANG Chaoyang, et al. Comparison and analysis of high-speed flux weakening control for PMSM[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016(3): 5-9.

[10] 黄佳德, 曾小凡, 许峻峰, 等 . 永磁同步电机全速度无位置传感器控制策略分析与应用[J]. 机车电传动, 2016(3): 10-14.
HUANG Jiade, ZENG Xiaofan, XU Junfeng, et al. Analysis and application of whole speed range sensorless control strategy for PMSM[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016 (3): 10-14.

[11] 周兴祥 . 永磁同步电机无位置传感器控制技术在天津地铁的应用研究[J]. 机车电传动, 2020(3): 12-17.
ZHOU Xingxiang. Application of sensorless control technology of permanent magnet synchronous motor in Tianjin metro[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(3): 12-17.

[12] 文宇良, 郑汉锋, 黄佳德, 等 . 永磁同步电机方波控制技术探讨[J]. 机车电传动, 2018(6): 26-32.
WEN Yuliang, ZHENG Hanfeng, HUANG Jiade, et al. Discussion of square wave control technology for permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(6): 26-32.

[13] 文宇良, 张朝阳, 刘雄, 等 . 基于无位置传感器的永磁同步电机带速度重新投入控制算法研究[J]. 大功率变流技术, 2012(3): 39-42.
WEN Yuliang, ZHANG Chaoyang, LIU Xiong, et al. Calculation research of re-starting with speed for PMSM based on the sensor-less[J]. High Power Converter Technology, 2012 (3): 39-42.

[14] 梁波, 彭辉水, 刘雄 . 地铁车辆永磁同步牵引系统粘着控制研究[J]. 大功率变流技术, 2012(3): 17-19.
LIANG Bo, PENG Huishui, LIU Xiong. Research on adhesion control of the permanent magnet synchronous motor for metro vehicle traction[J]. High Power Converter Technology, 2012(3): 17-19.

[15] 刘良杰, 陈文光, 刘雄, 等 . 地铁永磁同步牵引系统节能技术研究[J]. 机车电传动, 2018(6): 23-25.
LIU Liangjie, CHEN Wenguang, LIU Xiong, et al. Research on energy saving technology of metro permanent magnet synchronous traction system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(6): 23-25.