

轨道交通用次级分段式磁通切换永磁直线电机控制研究

马 斌¹, 徐琼璟¹, 张若微¹, 端凌立¹, 张 瑶¹, 张汀荟¹,
王昱婷¹, 朱 瑛^{2*}

(1. 南京电力设计研究院有限公司, 江苏 南京 210012;

2. 河海大学 电气与动力工程学院, 江苏 南京 211100)

Control Study of Secondary Segmented Flux-Switching Permanent Magnet Linear Motors for Railways

MA Bin¹, XU Qiongjing¹, ZHANG Ruowei¹, DUAN Lingli¹, ZHANG Yao¹,
ZHANG Tinghui¹, WANG Yuting¹, ZHU Ying^{2*}

(1. Nanjing Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210012, China;

2. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: [Objective] In recent years, secondary segmented flux-switching permanent magnet linear motor (FSPMLM) has demonstrated significant application potential in urban rail transit traction systems, owing to their simple structure, high efficiency, high power density, and low manufacturing cost. To verify the effectiveness of the traction control strategy for this type of motor under real-world power supply conditions, this paper conducts a comprehensive study involving system modeling, simulation, and experimental performance evaluation. [Methods] Firstly, a power supply model that incorporated dynamic voltage fluctuations was developed to accurately simulate the operating environment of urban rail DC traction systems. This model reflected the typical voltage variations encountered during actual operation. Next, based on the results of finite element analysis, the $d-q$ axis mathematical model of the FSPMLM was established. A magnetic field-oriented control strategy was then designed to achieve precise closed-loop speed control. Finally, the entire system was modeled and validated using Matlab/Simulink simulation tools. Additionally, a low-power experimental platform was constructed, based on a physical prototype, to obtain real measurement data and validate the simulation outcomes by comparing key performance indicators.

基金项目: 国网江苏省电力有限公司省管产业科技项目 (JC2024108)

State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Provincial Management Industry Science and Technology Project (JC2024108)

[Results] Both the simulation and experimental results showed consistent findings: the motor system achieved high control accuracy and rapid dynamic response under conditions of sudden speed variation. It also maintained low thrust fluctuation, strong system stability, and excellent dynamic and steady-state performance. These results confirmed the reliability and responsiveness of the proposed control strategy.

[Conclusion] This study confirms that the secondary segmented FSPMLM, when equipped with a vector control strategy, can achieve efficient and stable speed regulation under the voltage conditions typical of urban subway power supply systems. The approach offers a cost-effective, technically sound solution with strong engineering practicality and wide application potential in modern electrified traction systems for urban rail transit.

Key words: flux-switching permanent magnet linear motor; secondary segmented; rail transit; field-oriented control

摘 要: [目的] 次级分段式磁通切换永磁直线电机 (FSPMLM) 因其结构简单、效率高、功率密度大及制造成本低等特点, 近年来在城市轨道交通牵引系统中展现出广阔的应用前景。为验证该类电机在真实供电环境下牵引控制策略的有效性, 本文开展了系统性建模与性能评估研究。[方法] 首先, 结合城市轨道交通直流牵引系统的典型运行特性, 构建了考虑动态电压波动的供电模型, 以真实反映电机运行环境; 其次, 基于有限元分析结果, 建立了次级分段式 FSPMLM 的 $d-q$ 轴数学模型, 并设计了

磁场定向控制策略,以实现速度精确控制。最终,通过 Matlab/Simulink 仿真平台进行系统建模与验证,并基于小功率样机搭建试验平台,对关键性能指标进行实测比对。

【结果】仿真与试验结果表明,该电机系统在给定速度突变情况下控制精度高、响应速度快、推力波动小及稳定性强,具有良好的动态性能与稳态运行特性。【结论】研究表明,在地铁实际供电电压等级条件下,次级分段式 FSPMLM 搭配矢量控制策略能够实现高效、稳定的速度控制,具备良好的工程实用性与推广前景,为城市轨道交通电气化牵引系统提供了高性价比的技术方案。

关键词: 磁通切换永磁直线电机;次级分段式;轨道交通;磁场定向控制

0 引言

随着我国经济的持续发展,人口向大城市集聚的趋势愈发显著,未来千万级人口的超大城市数量将进一步增加。作为缓解城市交通拥堵的重要方案,城市轨道交通在“十四五”规划中被明确提出需加快建设,推动其向数字化、低碳化方向发展,以提升交通系统的可持续性与运行效率^[1-2]。

直线电机能够直接将电能转换为机械能,无需借助传统的传动装置^[3-4]。这一特性使得直线电机相较于传统的旋转电机,在应用于轨道交通时展现出更为优越的动态响应性能及更低的传输损耗^[5-7]。现今,直线电机牵引系统广泛使用的是直线感应电机(Linear Induction Motor, LIM),然而,LIM 存在着效率不高以及功率因数较低等问题^[8-10]。相比之下,直线永磁同步电机(Linear Permanent Magnet Synchronous Motor, LPMSM)则以其较低的能耗和更高的效率脱颖而出^[11-12]。但是,在长途轨道交通系统中采用 LPMSM 则面临着需在轨道上安装电枢绕组或永磁体所带来的高昂成本问题^[13]。

近期,磁通切换永磁直线电机(Flux-Switching Permanent Magnet Linear Motor, FSPMLM)因其独特的设计引起了广泛关注。此类电机的初级部分包含电枢绕组和永磁体,而次级部分则仅由磁芯构成^[14-17]。与 LIM 相比,FSPMLM 不仅提供了更佳的推力性能,而且还具备了更高的效率和功率因数^[18]。为了进一步减少次级部分的成本,有研究提出了次级分段式 FSPMLM 设计方案^[19-20]。根据图 1 的示例,该电机的永磁体与电枢绕组均

安置于初级短动子的一侧,而次级部分则由分段的导磁组件构成,这种设计有效减少了次级部分的体积,并且进一步降低了成本。因此,次级分段式 FSPMLM 以其低廉的成本、高功率密度及高效运行的特点,成为轨道交通驱动系统的一个理想选择。

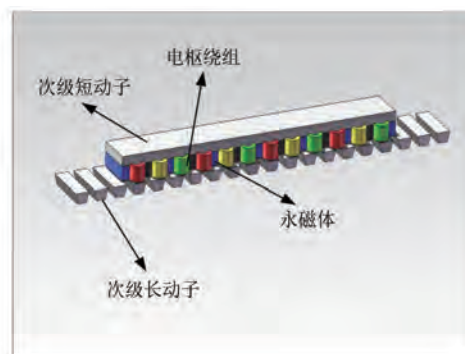


图 1 次级分段式 FSPMLM 结构

Fig. 1 Secondary segmented FSPMLM structure

在轨道交通领域,直线电机控制系统扮演着至关重要的角色。然而,当前对于次级分段式 FSPMLM 的研究主要集中在静态推力、磁性能以及材料成本等方面,而对高精度速度控制系统的探讨尚显不足。传统的应用于旋转电机的控制方案主要有矢量控制、直接转矩控制以及模型预测控制。文献[21-22]深入探讨了矢量控制的基本原理,并采用控制变量法对电机参数进行统一分析,从而对矢量控制与直接转矩控制下的电磁转矩特性及电流波形进行了系统比较。尽管两种控制策略在系统结构、控制过程、实现形式及控制效果等方面存在差异,但其理论基础一致,控制本质相同。文献[23-24]将直接转矩技术与无差拍思想结合,使得电机控制系统具有更好的动态性能和更强的抗干扰能力。文献[25-27]舍弃利用率较小的电压矢量,减小备选电压矢量数量,大大减少了传统模型预测控制的计算量,减轻了计算负担。文献[28]提出了一种基于参考电流斜率的三矢量模型预测电流控制策略,无需使用价值函数遍历所有的电压矢量,即可选择出两个有效电压矢量,并与零电压矢量以一定的占空比组合,合成输出的电压矢量能够覆盖一定范围内的任意幅值、任意相角,且该策略相较于传统模型控制显著减少了计算量。文献[29]针对轨道交通这一特定领域对比分析了三种控制方案的优

劣,为该领域控制方案的选择提供指导。为了检验次级分段式 FSPMLM 牵引控制策略在真实轨道交通供电环境中的实用性,本研究首先模拟了实际工作条件,并构建了直流牵引供电系统的模型。然后,依据有限元分析的成果,构建了电机的矢量控制模型以进行深入分析,从而验证了该电机在实际电压等级下的动态响应能力和稳态性能。因此,本研究的目的是开发一种基于磁场定向控制(Field-Oriented Control, FOC)的次级分段式 FSPMLM 速度闭环控制系统,并对其控制性能进行深入研究。

本文围绕次级分段式 FSPMLM 的数学模型展开,首先建立理论框架,随后探讨 FOC 策略在电机速度调节中的具体实现方法;通过 Matlab/Simulink 仿真,在轨道交通实际电压等级下验证控制策略的有效性;最后结合试验数据进一步证实理论分析,并对仿真与试验的差异进行深入讨论,为模型优化和工程应用提供依据。

1 次级分段式 FSPMLM 的数学模型

1.1 三相坐标系下的数学模型

根据有限元仿真结果,次级分段式 FSPMLM 的三相永磁磁链的数学表达式可定义为

$$\begin{cases} \psi_{ma} = \psi_0 + \psi_m \cos \theta_e \\ \psi_{mb} = \psi_0 + \psi_m \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \psi_{mc} = \psi_0 + \psi_m \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ_0 、 ψ_m 分别为永磁磁链基波分量的直流分量、峰值; θ_e 为电机电子的电角度。

在理想状态下,三相自感和互感可表示为

$$\begin{cases} L_{aa} = L_{dc} + L_m \cos \theta_e \\ L_{bb} = L_{dc} + L_m \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{cc} = L_{dc} + L_m \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} M_{ab} = M_{ba} = M_{dc} + M_m \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{bc} = M_{cb} = M_{dc} + M_m \cos \theta_e \\ M_{ca} = M_{ac} = M_{dc} + M_m \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: L_{dc} 、 L_m 分别为自感基波分量的直流分量、峰

值; L_{aa} 、 L_{bb} 和 L_{cc} 为三相自感; M_{dc} 、 M_m 分别为互感基波分量的直流分量、峰值; M_{ab} 、 M_{ba} 、 M_{bc} 、 M_{cb} 、 M_{ab} 和 M_{ba} 为三相互感。

1.2 d-q 坐标系下的数学模型

1.2.1 d 轴和 q 轴的定义

当电机动子移动一个次极距时,反电势和磁链的波形为正弦波。因此,电机的 d 轴和 q 轴定义如图 2 所示。其中,d 轴为永磁磁链达到正最大值的位置,q 轴为永磁磁链为零的位置,d 轴和 q 轴之间的距离为 $1/4\tau_s$, τ_s 为定子极距。

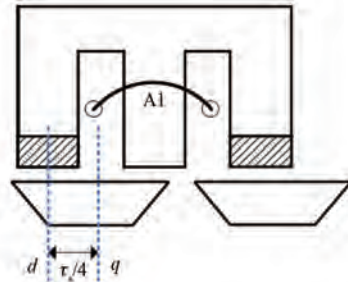


图 2 d 轴和 q 轴定义

Fig. 2 d-axis and q-axis definitions

1.2.2 d-q 轴的数学模型

坐标变换矩阵定义为

$$T_{3s/2r} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_e & -\sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

坐标变换后,d-q 轴上的永磁磁链表示为

$$\begin{bmatrix} \psi_{md} \\ \psi_{mq} \\ \psi_{m0} \end{bmatrix} = T_{3s/2r} \begin{bmatrix} \psi_{ma} \\ \psi_{mb} \\ \psi_{mc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \\ \psi_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

在 d 轴永磁体磁链 ψ_{md} 等于峰值 ψ_m 的情况下,q 轴永磁体磁链 ψ_{mq} 等于零。

d 轴和 q 轴电感可通过式(6)、式(7)计算:

$$\begin{bmatrix} L_d & L_{dq} & L_{d0} \\ L_{qd} & L_q & L_{q0} \\ L_{0d} & L_{0q} & L_0 \end{bmatrix} = T_{3s/2r} \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} T_{3s/2r}^{-1} \quad (6)$$

经过计算,得到:

$$\begin{cases} L_d = L_{dc} - M_{dc} + \frac{1}{2}(L_m + 2M_m)\cos(3\theta_e) \\ L_q = L_{dc} - M_{dc} - \frac{1}{2}(L_m + 2M_m)\cos(3\theta_e) \\ L_{dq} = L_{dq} = -\frac{1}{2}(L_m + 2M_m)\sin(3\theta_e) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: L_m 和 M_m 的数值较小,对建模结果影响有限,故在本文中予以忽略,以简化模型分析。

次级分段式 FSPMLM 的 d 轴和 q 轴磁链可定义为

$$\begin{cases} \psi_d = \psi_m + L_d i_d + L_{dq} i_q \\ \psi_q = L_q i_q + L_{dq} i_d \end{cases} \quad (8)$$

电机在 d 轴和 q 轴的电压方程为

$$\begin{cases} u_d = d\psi_d/dt - \omega_e \psi_q + R i_d \\ u_q = d\psi_q/dt + \omega_e \psi_d + R i_q \end{cases} \quad (9)$$

式中: ω_e 为电角速度; R 为定子电阻。

将式(7)和式(8)代入式(9),得电压方程为

$$\begin{cases} u_d = -\omega_e \psi_q + R i_d \\ u_q = \omega_e \psi_d + R i_q \end{cases} \quad (10)$$

基于式(10),次级分段式 FSPMLM 的电磁推力可表示为

$$F_e = 3/2[(-\omega_e \psi_q) i_d + (\omega_e \psi_d) i_q]/v = \frac{3\pi}{\tau_s} \psi_m i_q + \frac{3\pi}{\tau_s} i_d i_q (L_d - L_q) = F_{pm} + F_r \quad (11)$$

式中: F_e 为电磁推力; F_r 为磁阻推力; v 为电机定子速度; F_{pm} 为永磁体产生的推力。

由于次级分段式 FSPMLM 的 d 轴和 q 轴电感几乎相同,因此磁阻推力可以忽略,其动力学方程可以表示为

$$F_e = M \cdot pv + Dv + F_L + F_C \quad (12)$$

式中: M 为运动系统的总质量; p 为微分算子; D 为粘性摩擦因数; F_L 为负载力; F_C 为摩擦力。

2 次级分段式 FSPMLM FOC 系统

图3展示的次级分段式 FSPMLM FOC 系统框图中,标示了多个关键参数与控制组件。图中, v_{ref} 为给定的指令速度; i_d^* 、 i_q^* 和 i_d 、 i_q 分别为 d 轴、 q 轴上的指令电流值和实际电流值; S_a 、 S_b 和 S_c 为逆变器的开关信号,用于控制电机的运行状态与电压输出,从而实现电机速度与电流的精确调节。

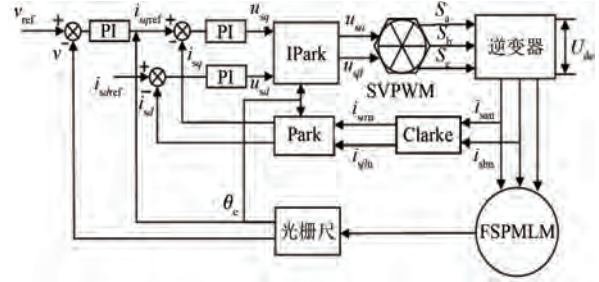


图3 次级分段式 FSPMLM FOC 系统

Fig. 3 Secondary segmented FSPMLM FOC system

整个控制系统由多个部分组成,包括速度环、电流环、坐标变换、空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)、逆变器以及光栅尺和次级分段式 FSPMLM。这些组件协同工作,确保电机能够按照预定的指令运行。定子位置 θ_e 和速度 v 可以由光栅尺测量获得,光栅尺输出的编码信号经 dSPACE 系统处理后,可转换为连续的位置信号与速度信号,从而为控制系统提供精确的状态反馈,保障控制策略的实时性与准确性。

采用 $i_d=0$ 控制时,电机的永磁磁链保持恒定不变。此时推力 F_e 与 i_q 成正比关系,通过调节 i_q 即可实现最大转矩电流比控制效果。具体推力表达式需结合电机参数确定,如式(13)所示:

$$F_e = \frac{3\pi}{\tau_s} \psi_m i_q \quad (13)$$

因此,在闭环矢量控制系统中,通过控制 i_d 和 i_q ,可以获得次级分段式 FSPMLM 的最佳电磁性能。

3 仿真模型与结果

3.1 仿真模型

为实现次级分段式 FSPMLM 在轨道交通实际电压等级下的高效控制,需结合实际运行工况,建立电机的数学模型,从而为后续研究电机控制策略提供基础。本文选取广州地铁四号线作为典型应用场景,综合其直流牵引供电系统的电压特性、线路结构及空间约束等因素,设计了满足要求的次级分段式 FSPMLM,具体参数如表1所示。

如图4所示,基于 Matlab/Simulink 构建了次级分段 FSPMLM 的仿真模型。该模型包括次级分段式 FSPMLM 本体模块、逆变器模块、控制器模块、运动与负载模块、速度控制器模块以及

SVPWM 模块。

表 1 次级分段式 FSPMLM 参数

Tab. 1 Secondary segmented FSPMLM parameters	
参数名称	参数值
τ_s/mm	172
ψ_m/Wb	0.99
L_{dc}/mH	4.8
R/Ω	0.041 5
M/kg	717
$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	9.17
I_{rms}/A	292

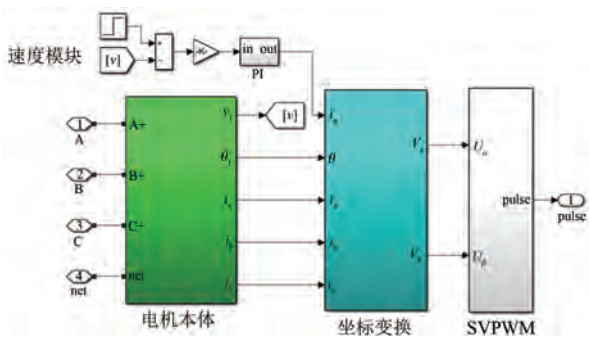


图 4 次级分段式 FSPMLM FOC 仿真模型

Fig. 4 Simulation model of secondary segmented FSPMLM FOC

3.2 仿真结果

为评估电机在轨道交通电压等级下的带载性能,进行了仿真分析。将电机初始速度设置为 5 m/s,施加 5 000 N 负载,电流限幅 412 A,配置 10 000 μF 的电容器。仿真结果如图 5 所示,从启动到电机达到预定速度仅需 0.21 s,且在稳定状态下,速度偏差仅为 0.005 m/s。

电机启动时相电流达 412 A,电磁推力为 22 850 N,直流电压波动后稳定于 1 500 V。0.7 s 时将目标速度提升至额定 9.17 m/s,0.875 s 完成跟踪,稳态速度误差<0.1%。

当电机进入稳定运行阶段后,可以观察到相电流的峰值稳定在 90 A 左右,相应的电磁推力保持在 5 000 N,足以支持负载的持续运转。这一系列仿真结果证明了次级分段式 FSPMLM 即使在负载条件下也能保持出色的动态响应和稳定性。

为了验证小功率电机 $i_d=0$ 矢量控制仿真分析的正确性,加工了一台原理样机用于试验验证。基于有限元仿真得到原理样机的参数如表 2 所

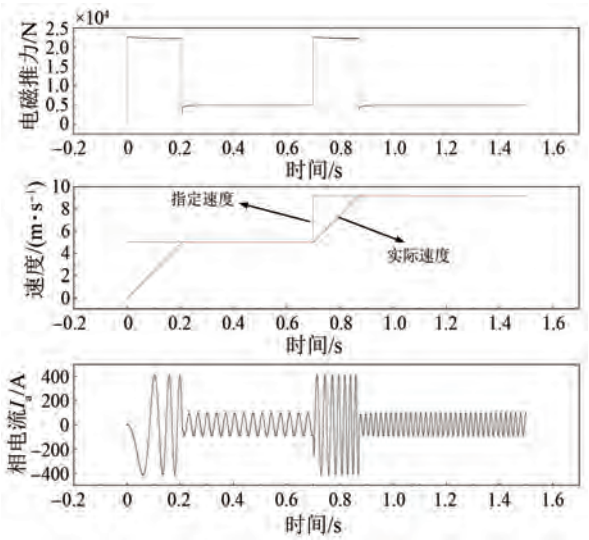


图 5 次级分段式 FSPMLM 仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms of secondary segmented FSPMLM

示,并建立了电机矢量控制模型并深入分析。

表 2 原理样机参数

Tab. 2 Parameters of the principle prototype	
参数类型	参数值
τ_s/mm	27.4
ψ_m/Wb	0.028 28
L_{dc}/mH	1.75
R/Ω	0.3
M/kg	7.75
$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2
I_{peak}/A	11

在仿真模型中,采用三相调压器与整流桥相连的系统得到直流电源。该电源经过储能电容器进行滤波和稳压处理,确保了直流母线电压的稳定性。空载状态时,监测到直流母线电压稳定在 50 V,对电机进行仿真测试,并将初始给定速度设为 1 m/s,仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知,电机启动瞬间相电流达到峰值 11 A,推力也达到最大值 106 N,仅用 0.08 s 电机就加速至目标速度,表明电机具备优秀的动态响应特性。电机进入稳态后,速度保持恒定,误差可忽略不计。此时相电流峰值稳定在 3 A,反映了定位力与摩擦阻力的综合影响。

为了进一步检验电机在速度突变时的控制性能,在 1 s 时将给定速度从 1 m/s 阶跃至 0 m/s,电

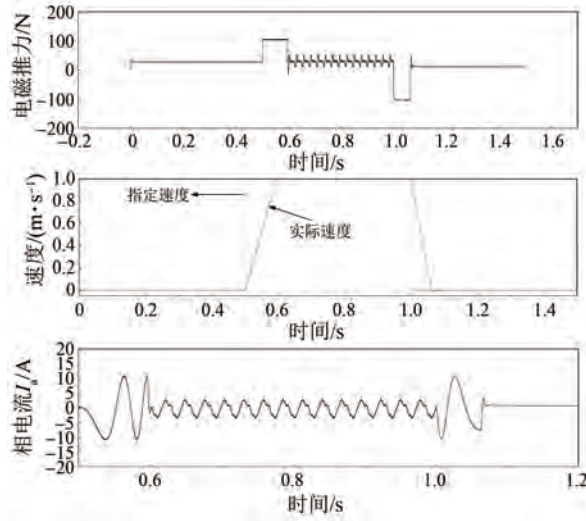


图6 次级分段式 FSPMLM 样机仿真波形

Fig. 6 Simulated waveforms of secondary segmented FSPMLM prototype

机仅用 0.08 s 即完成速度跟踪,稳态误差 $<0.1\%$ 。该结果验证了电机在速度突变时兼具快速响应与高精度控制能力,充分展示了电机在速度突变时的可靠性和精确度。

4 试验验证

为深入研究电机控制性能,本研究在实验室环境下进行,利用已构建的直线电机平台对原型机进行了实际测试,旨在验证其性能指标。试验平台如图 7 所示。试验过程中,设置采样周期为 100 μs ,并将直流母线电压调整至 50 V。受限于试验条件无法加载,试验时电机为空载状态,并将目标速度设定为 1 m/s,试验结果如图 8 所示。

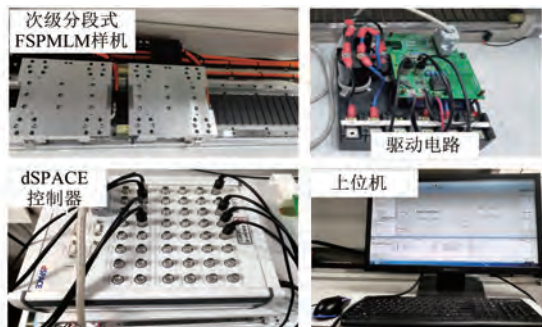


图7 试验平台

Fig. 7 Experimental platform

由图 8 可知,电机能够在 0.11 s 加速至设定目标速度 1 m/s,并在之后保持稳定运行。在稳态运行阶段,实际速度曲线与指令速度曲线高度

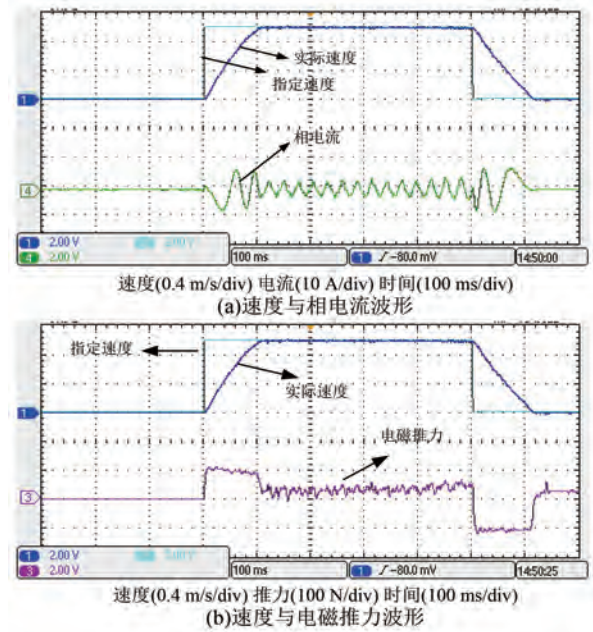


图8 给定速度 1 m/s 试验波形

Fig. 8 Experimental waveforms for a given speed of 1 m/s

一致,几乎无明显偏差,表明系统具有良好的速度跟踪能力。

电机加速过程中,A 相电流显著上升至峰值 8.5 A;进入稳态运行后,相电流峰值显著下降至 3 A。同时,电磁推力在稳速运行过程中呈现小幅波动,表明系统运行稳定,推力输出受控。

为进一步验证控制策略的有效性,本文对仿真结果与试验数据进行了对比分析。在目标速度 1 m/s 工况下,仿真与试验的加速时间分别为 0.08 s 和 0.11 s,差异主要源于实际控制系统的执行延迟、摩擦阻力等非理想因素。两者均展现出良好的动态响应特性。

需要指出,在试验稳态运行过程中,尽管系统处于空载状态,A 相电流仍维持在 3 A 左右,未降至 0。这一现象主要归因于次级分段式 FSPMLM 自身存在定位力和摩擦阻力,需要持续的电磁推力以维持平衡。图 8(b) 所示的电磁推力波形也验证了稳态下电磁推力并非为零,而是基本等同于电机静态定位力及摩擦阻力,进一步印证了模型的准确性与控制策略的合理性。

5 结语

综上所述,次级分段式 FSPMLM 以其低成本、高功率密度和高效率等优势,在地铁实际电压

等级条件下的牵引控制策略依然有效, 适合应用于轨道交通系统。仿真与试验结果均表明, 该电机适用于 FOC, 并具有显著的工程应用价值。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

马斌、徐琼璟、张若微进行了方案设计、内容总结与论文撰写, 端凌立、张瑶进行了试验研究, 张汀荟、王昱婷、朱瑛参与了论文的审核与修改所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Ma Bin, Xu Qiongjing and Zhang Ruowei. The experiment was conducted by Duan Lingli and Zhang Yao. The manuscript was revised by Zhang Tinghui, Wang Yuting and Zhu Ying. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告解读 [J]. 城市轨道交通, 2024, (4): 15-17.
Interpretation of the annual statistical and analytical report on urban rail transit 2023 [J]. China Metros, 2024, (4): 15-17.
- [2] 韩宝明, 李卓一, 靳雨馨, 等. 2024 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述 [J]. 都市快轨交通, 2025, 38(1): 1-12.
HAN B M, LI Z Y, JIN Y X, et al. Statistical analysis of urban rail transit operations worldwide in 2024: A review [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2025, 38(1): 1-12.
- [3] 王龙刚, 邹会杰, 张吉斌. 直线感应电机与旋转感应电机的对比分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2019, 9(2): 84-85.
WANG L G, ZOU H J, ZHANG J B. Comparative analysis of linear induction motor and rotary induction motor [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2019, 9(2): 84-85.
- [4] 张鹏, 张佩竹, 李晓飞. 城市轨道交通直线电机

- 系统工程适应性研究 [J]. 铁道勘察, 2023, 49(3): 56-61.
- ZHANG P, ZHANG P Z, LI X F. Study on engineering adaptability for urban rail transit line using linear motor system [J]. Railway Investigation and Surveing, 2023, 49(3): 56-61.
- [5] 孙涛, 林飞振, 李洋. 地铁列车直线电机运行工况研究与分析 [J]. 仪器仪表标准化与计量, 2025, (1): 18-20.
SUN T, LIN F Z, LI Y. Research and analysis on the operating conditions of linear motors in subway train [J]. Instrument Standardization & Metrology, 2025, (1): 18-20.
- [6] 何云凤, 卢琴芬, 翁萍. 直线电机在中国轨道交通上的应用 [J/OL]. 电力机车与城轨车辆, 2025-8-7. <https://link.cnki.net/urlid/43.1402.u.20241028.1107.002>.
HE Y F, LU Q F, WENG P. Application of linear motors in rail transit in China [J/OL]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2025-8-7. <https://link.cnki.net/urlid/43.1402.u.20241028.1107.002>.
- [7] 王博, 李昕涛, 王珂, 等. 改进星鸦优化算法的无刷直流电机控制研究 [J]. 微特电机, 2025, 53(1): 53-59.
WANG B, LI X T, WANG K, et al. Research on brushless DC motor control with improved nutcracker optimization algorithm [J]. Small & Special Electrical Machines, 2025, 53(1): 53-59.
- [8] 李庆来, 方晓春, 杨中平, 等. 直线感应电机在轨道交通中的应用与控制技术综述 [J]. 微特电机, 2021, 49(8): 39-47.
LI Q L, FANG X C, YANG Z P, et al. Review of the application and control technology in the linear induction motor for the rail transit [J]. Small & Special Electrical Machines, 2021, 49(8): 39-47.
- [9] 徐伟, 肖新宇, 董定昊, 等. 直线感应电机效率优化控制技术综述 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 902-915+934.
XU W, XIAO X Y, DONG D H, et al. Review on efficiency optimization control strategies of linear induction machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 902-915 + 934.
- [10] SUN Z M, XU L, ZHAO W X. Comparison between linear induction motor and linear primary permanent

- magnet vernier motor for railway transportation [C]// 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, Wuhan, 2021.
- [11] 赵星桥. 永磁同步直线电机效率优化控制策略研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- ZHAO X Q. Research on efficiency optimization control strategy of permanent magnet synchronous linear motor [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
- [12] 苏亚宾. 永磁同步直线电机电磁优化设计及推力波动抑制研究[D]. 上海: 上海电机学院, 2024.
- SU Y B. Study on electromagnetic design and thrust fluctuation suppression of permanent magnet synchronous linear motor [D]. Shanghai: Shanghai Dianji University, 2024.
- [13] JIANG Z W, QIU L H, CAO R W. Optimization of secondary segmented flux-switching linear motor designed for urban rail transit [C]// 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, Zhuhai, 2023.
- [14] 张健康. 新型磁通切换永磁电机设计与分析[D]. 淮安: 淮阴工学院, 2023.
- ZHANG J K. Design and analysis of a novel flux-switching permanent magnet motor [D]. Huai'an: Huaiyin Institute of Technology, 2023.
- [15] CAO R W, SU E C, LU M H. Comparative study of permanent magnet assisted linear switched reluctance motor and linear flux switching permanent magnet motor for railway transportation [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-5.
- [16] ZHENG H F, ZHOU L H, CAO R W. Speed control of linear flux-switching permanent magnet motor with segmented secondary for rail transit [C]// 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, Wuhan, 2021.
- [17] RAITHEL J L F, ZWEEDEN VAN P C J A, CORNELISSE B, et al. Achieving greater efficiency in long-distance applications: The novel implementation and validation of a linear flux-switching permanent magnet motor [C]// 2024 International Conference on Electrical Machines, Torino, 2024.
- [18] CAO R W, LU M H. Reduction of thrust force ripple of high temperature superconducting linear flux-switching motors using asymmetry mover structure [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(5): 1-5.
- [19] 曹瑞武, 苏恩超, 张学. 轨道交通用次级分段型直线磁通切换永磁电机研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1001-1012.
- CAO R W, SU E C, ZHANG X. Investigation of linear flux-switching permanent magnet motor with segmented secondary for rail transit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 1001-1012.
- [20] 蒋芷微. 轨道交通用直线磁通切换电机电磁特性及多物理场分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2024.
- JIANG Z W. Electromagnetic characteristics and multi-physics field analysis of linear flux-switching motors for rail transit [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2024.
- [21] 李超男, 关新, 于占洋, 等. 基于虚拟电压矢量的磁场定向控制策略研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 66-73.
- LI C N, GUAN X, YU Z Y, et al. Research on field orientation control strategy based on virtual voltage vector [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(12): 66-73.
- [22] 郭力源, 李美芳. 永磁同步电机矢量控制和直接转矩控制的对比研究[J]. 山西电力, 2024, (1): 37-40.
- GUO L Y, LI M F. Comparative study of vector control and direct torque control of permanent magnet synchronous motor [J]. Shanxi Electric Power, 2024, (1): 37-40.
- [23] 马祖阳, 王晓璨, 林晓刚, 等. 直驱式永磁同步电机改进型无差拍直接转矩控制研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(8): 14-20.
- MA Z Y, WANG X C, LIN X G, et al. Research on improved deadbeat direct torque control of direct-drive permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(8): 14-20.
- [24] 翁子恺, 储剑波. 基于定子磁场定向的永磁辅助同步磁阻电机无差拍直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(5): 20-26.
- WENG Z K, CHU J B. Deadbeat direct torque control of PMA SynRM based on stator field orientation [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(5): 20-26.

- [25] 李耀华, 种国臣, 郭伟超, 等. 一种永磁同步电机模型预测转矩控制简化策略研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 42-50.
LI Y H, CHONG G C, GUO W C, et al. Study on a simplified strategy for model predictive torque control of permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 42-50.
- [26] 徐奇伟, 龙学汉, 苗轶如, 等. 永磁同步电机双矢量模型预测控制的计算量优化方法研究[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(5): 19-30.
XU Q W, LONG X H, MIAO Y R, et al. Double-vector model predictive current control for PMSM drive system with low calculation burden [J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(5): 19-30.
- [27] 刘雨洪, 徐鹏, 舒炜, 等. 永磁同步电机多矢量模型预测电流控制[J]. 电子测量技术, 2025, 48(6): 65-72.
LIU Y H, XU P, SHU W, et al. Multi-vector model predictive current control for PMSM [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(6): 65-72.
- [28] 安一凡, 储剑波, 唐旭. 基于参考电流斜率的永磁同步电机三矢量模型预测电流控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 22-29+73.
AN Y F, CHU J B, TANG X. Three-vector model predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on reference current slope [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 22-29+73.
- [29] 邹剑桥. 轨道交通用直线感应电机低复杂度模型预测控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
ZOU J Q. Low-complexity model predictive control for linear induction machines in urban transit [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

收稿日期:2025-04-25

收到修改稿日期:2025-05-29

作者简介:

马 斌(1985-),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网保护及综合能源控制和轨道交通牵引供电系统控制,allen_0001@126.com;

* 通信作者:朱 瑛(1987-),女,博士,教授,研究方向为新能源并网控制及新型永磁电机控制,yingzhu@hhu.edu.cn。