

有取向硅钢永磁同步直线电机高频注入位置估计试验研究

刘意圆, 张 博*

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Experimental Study of High-Frequency Injection Position Estimation in Oriented Silicon Steel Permanent Magnet Synchronous Linear Motor

LIU Yiyuan, ZHANG Bo*

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: [Objective] The aim of this paper is to investigate whether the voltage amplitude of the high-frequency square wave injection signals used in oriented silicon steel permanent magnet synchronous linear motor (PMSLM) can be lower than that of non-oriented silicon steel PMSLM when a high-frequency injection method is used for sensorless control to estimate the motor position. [Methods] Firstly, the mathematical model of PMSLM was established based on Simulink. Then, the position estimation of the PMSLM mathematical model was performed using a control method combining vector control, position velocity current triple closed-loop proportional integral control and high-frequency injection method. Finally, the model in Simulink was imported into the PMSLM through the RTU-BOX fast model for experiment, and the experimental results of the oriented silicon steel PMSLM and the non-oriented silicon steel PMSLM were compared. [Results] The initial injection voltage amplitude was set to 4.8 V. At this time, the absolute value of the estimated position error of the non-oriented silicon steel PMSLM obtained by the high-frequency injection method was less than 15%. Decreasing the injected voltage amplitude in steps of 0.1 V, the absolute values of the estimated position errors of the non-oriented silicon steel PMSLM were all less than 15% when the voltage amplitude was in the range of 4.8~0.4 V. The absolute value of the estimated position error of the non-oriented silicon steel PMSLM was greater than

15% when the voltage amplitude was reduced to 0.3 V, while the absolute value of the position error of the oriented silicon steel PMSLM was less than 15% at this point. [Conclusion] The anisotropy of oriented silicon steel can change the magnetic permeability, and the amplitude of the injection voltage for position estimation using the high-frequency injection method can be lower compared to that of non-oriented silicon steel.

Key words: oriented silicon steel; linear motor; high-frequency square wave injection; vector control; fast model

摘 要: 【目的】本文旨在探究采用高频注入法进行无位置传感器控制来估计电机位置时,有取向硅钢永磁同步直线电机(PMSLM)使用的高频方波注入信号的电压幅值是否可以比无取向硅钢 PMSLM 更低。【方法】首先,基于 Simulink 建立 PMSLM 的数学模型;然后,采用矢量控制、位置速度电流三闭环比例积分控制和高频注入法相结合的控制方法,对 PMSLM 数学模型进行位置估计;最后,通过 RTU-BOX 快速模型将 Simulink 中的模型导入到 PMSLM 中进行试验,对比有取向硅钢 PMSLM 和无取向硅钢 PMSLM 的试验结果。【结果】设置初始注入电压幅值为 4.8 V,此时采用高频注入法得到的无取向硅钢 PMSLM 的估计位置误差绝对值小于 15%。以 0.1 V 为步长减小注入的电压幅值,当电压幅值在 4.8~0.4 V 时,无取向硅钢 PMSLM 的估计位置误差绝对值均小于 15%;当电压幅值降低到 0.3 V 时,无取向硅钢 PMSLM 的估计位置误差绝对值大于 15%,而此时有取向硅钢 PMSLM 的位置误差绝对值小于 15%。【结论】有取向硅钢的各向异性可以改变磁导率,相较于无取向硅钢,其使用高频注入法时实现位置估计的注入电压幅值能更低。

关键词: 有取向硅钢;直线电机;高频方波注入;矢量控制;快速模型

基金项目: 国家自然科学基金(52207064,52177054);辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101600001)

National Natural Science Foundation of China (52207064, 52177054); Liaoning Province Applied Basic Research Program Project (2023JH2/101600001)

0 引言

永磁同步直线电机 (Permanent Magnet Synchronous Linear Motor, PMSLM) 相比于永磁同步旋转电机可直接将力作用于电机定子,且具有高精度、高效率和高可靠性等优点,因此被广泛应用于各个领域^[1-4]。为实现永磁同步电机的位置控制,常用方法有直接转矩控制和矢量控制^[5]。这两种方法都需要一定精度的电机位置信息,这些信息通常利用位置传感器来获取^[6-8]。对于 PMSLM,一般用光栅检测定子位置,但将直线电机应用在物流线或无绳电梯等对控制精度要求不高的场合^[9],位置传感器不仅会增加系统成本,而且对环境要求较高。因此,需要对 PMSLM 进行无位置传感器的位置估计^[10-11]。本文研究的高频注入法就属于无位置传感器位置估计方法的一种。

零低速域基于凸极效应的高频注入法近年来受到国内外学者的关注^[12-13],高频注入法简单灵活,对电机参数变化不敏感。在此基础上演变出旋转高频注入法和脉振高频注入法^[14]。无论哪种方法,选择注入信号都是关键环节。注入信号既要保证电流响应具有较好的分离度和足够的信噪比,又要保证不对系统控制造成干扰^[15]。当注入信号为正弦波时,由于受逆变器非线性和死区影响,注入频率不宜过高。而注入频率较低时,难以提取高频信号^[16-17]。同时提取高频信号需要滤波器,使系统响应速度变慢。对此,韩国的 Seung-Ki Sul 团队提出了高频方波注入法^[18]。高频方波注入信号的频率可达到脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 频率的 1/2,且提取高频信号时不需要滤波器,只需加减运算^[19]。注入信号的幅值不能过大也不能过小,过大会给转速带来高频振荡;过小会增加提取难度,降低系统的位置估计精度^[20-21]。注入电压幅值一般为额定电压的 0.1 倍^[22]。

有取向硅钢片是一种内部晶粒排列具有明确方向性的各向异性的冷轧硅钢片^[23-26]。有取向硅钢和无取向硅钢由于晶粒取向的区别,在磁性方面有较大差异。对比无取向硅钢,有取向硅钢更易被磁化,这说明在相同磁场条件下,有取向硅钢有更好的导磁性能,将其应用到电机上,能大大提高硅钢的利用率^[27]。高频注入法利用饱和

点之前 dq 轴电感相等的特点,在饱和点向 d 轴注入电压,使 d 轴电感减小,而 q 轴电感不变,从而使 d 轴电感小于 q 轴电感,呈现饱和性凸极现象。本文针对有取向硅钢和无取向硅钢特殊性导致电机凸极现象的不同^[28-29],就此进行试验设计,对比分析有取向硅钢 PMSLM 和无取向硅钢 PMSLM 采用高频方波注入法估计位置时注入电压幅值的差异。

1 原理及方案

1.1 有取向硅钢铁心

有取向硅钢轧制方向和剪切方向的磁特性具有显著差别,轧制方向上磁化曲线的膝点比剪切方向上高。牌号为 B30G120 的有取向硅钢和牌号为 DW456_50 的无取向硅钢的磁化曲线如图 1 所示。

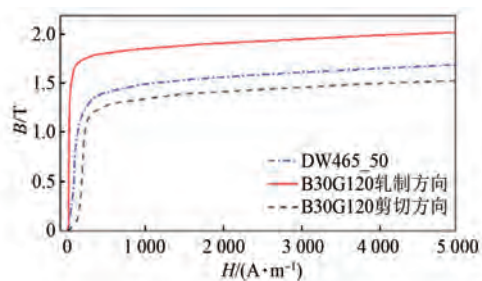


图 1 有取向硅钢和无取向硅钢的磁化曲线

Fig. 1 Magnetization curves of oriented and non-oriented silicon steel

由图 1 可知,有取向硅钢轧制方向上磁密达到 1.8 T 左右才出现饱和现象,而无取向硅钢在磁密为 1.4 T 左右就达到饱和。有取向硅钢在剪切方向上导磁性能较差,磁密为 1.3 T 左右就达到饱和。

有取向硅钢轧制方向和剪切方向示意图如图 2 所示。电机中齿磁密一般高于轭磁密,因此采用有取向硅钢作为定子冲片材料时,齿磁路方向与硅钢轧制方向一致,轭磁路方向与剪切方向一致。

根据有取向硅钢的特性,设计了如图 3 所示的有取向硅钢铁心。

1.2 高频方波注入原理

稳态下认为 $p\psi_f = 0$, ψ_f 为转子永磁体与定子交链的磁链, p 为微分算子。稳态下 PMSLM 的电压方程为

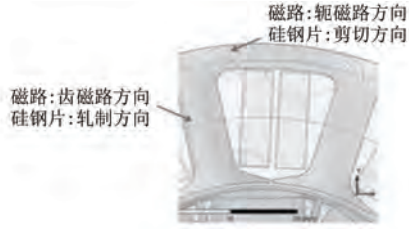


图 2 有取向硅钢轧制方向和剪切方向示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rolling direction and shear direction of oriented silicon steel



图 3 有取向硅钢铁心

Fig. 3 Core of oriented silicon steel

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电压和电流; ω_e 为电机旋转角频率; R 为定子电阻; ψ_d 、 ψ_q 和 L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴磁链和电感。

电机绕组在高频信号的激励下可表示为

$$\begin{bmatrix} Z_{dh} \\ Z_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{dh} + j\omega_h L_{dh} & -\omega_e L_{qh} \\ -\omega_e L_{dh} & R_{qh} + j\omega_h L_{qh} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: Z_{dh} 、 Z_{qh} 和 R_{dh} 、 R_{qh} 分别为 d 、 q 轴高频阻抗和高频电阻; ω_h 为注入高频信号的注入频率; L_{dh} 、 L_{qh} 分别为 d 、 q 轴高频电感。

因为 ω_h 远大于 ω_e , 因此式(2)中关于 ω_h 的高频项远大于常数项和关于 ω_e 的项, 则可将式(2)简化为

$$\begin{bmatrix} Z_{dh} \\ Z_{qh} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} j\omega_h L_{dh} & 0 \\ 0 & j\omega_h L_{qh} \end{bmatrix} \quad (3)$$

则 dq 两相旋转坐标系下 PMSLM 高频电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_{dh} \\ u_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega_h L_{dh} & 0 \\ 0 & j\omega_h L_{qh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: u_{dh} 、 u_{qh} 和 i_{dh} 、 i_{qh} 分别为 d 、 q 轴高频电压和高频电流。

由 Park 变换可知:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

因此, $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下高频响应电流的变化量可表示为

$$\begin{bmatrix} u_{dh} \\ u_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega_h L_{dh} & 0 \\ 0 & j\omega_h L_{qh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: i_{ah} 、 i_{bh} 分别为 α 、 β 轴高频电流。

假定一个两相旋转坐标系 $d_e q_e$, 其与 dq 和 $\alpha\beta$ 坐标系的关系如图 4 所示。

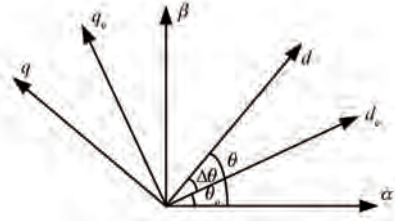
图 4 $d_e q_e$ 坐标系与 dq 和 $\alpha\beta$ 坐标系关系图Fig. 4 Diagram of $d_e q_e$ coordinate system versus dq and $\alpha\beta$ coordinate systems

图 4 中, θ 为 d 轴与 α 轴的夹角, 即转子位置角; θ_e 为 d_e 轴与 α 轴的夹角, 即转子位置角估计值; $\Delta\theta = \theta - \theta_e$ 为转子位置估计误差。

注入的高频方波信号的波形如图 5 所示, 表达式为

$$\begin{bmatrix} u_{de} \\ u_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pm V_h \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: u_{de} 、 u_{qe} 分别为 d 、 q 轴注入电压, V_h 为电压幅值, $V_h > 0$ 。

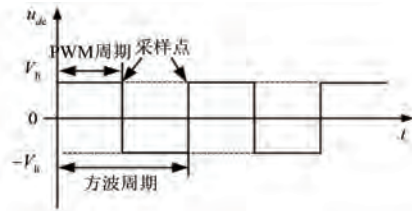


图 5 高频方波信号

Fig. 5 High frequency square wave signal

由图 5 可知, 注入的高频方波信号频率为 PWM 载波信号频率的 1/2, 且在每个开关周期进行一次电流采样。假设 PWM 载波信号频率为 10 kHz, 则高频方波信号频率为 5 kHz, 该频率远高于表贴式 PMSLM 的基波频率, 所以可认为连续采样的两个电流中基波信号恒定不变。而且在方波的一个周期中正负半周幅值大小、时间完全相同, 可认为连续采样的两个电流中高频信号的

2.2 试验平台

RTU-BOX 是一种基于模型设计、具有代码自动生成功能的实时数字控制器, 可将 Simulink 中的模型文件以及代码文件, 结合框架程序转化成产品级的工程代码, 下载到直线电机中, RTU-BOX 设备如图 9 所示。因为电机为空载运行, 为保证设备安全运行, 取额定电压为 48 V。PMSLM 试验平台如图 10 所示。



图 9 RTU-BOX 设备

Fig. 9 RTU-BOX device



图 10 PMSLM 试验平台

Fig. 10 PMSLM experimental platform

2.3 试验记录

对无取向硅钢 PMSLM 进行试验, 设计 0 位置为初始位置, 施加阶跃信号, 让电机停在 0.15 m 处。初始注入电压幅值为额定电压的 10%, 即 4.8 V。

判断高频注入法能否准确估计位置的依据为估计位置误差绝对值 Δx 是否小于 15%。 Δx 表达式如式(10)所示。如果小于 15%, 则降低注入电压的幅值, 直至 Δx 大于 15%。将此时的电压注入到有取向硅钢 PMSLM 中, 观察此时的 Δx , 并与无取向硅钢 PMSLM 的 Δx 进行对比。每次试验记录 1 万组数据, 以保证记录结束时电机运动停止且估计位置计算完成。将数据导入 Matlab 中绘图观察数据。

$$\Delta x = \left| \frac{x - 0.15}{0.15} \right| \times 100\% \quad (10)$$

3 试验分析

设置 PMSLM 目标停止位置为 0.15 m。注入电压为 4.8 V 时无取向硅钢 PMSLM 的位置如图 11 所示。

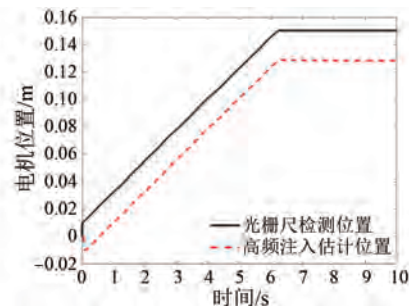


图 11 注入电压为 4.8 V 时无取向硅钢 PMSLM 的位置

Fig. 11 Position of non-oriented silicon steel PMSLM at an injection voltage of 4.8 V

由图 11 可知, 光栅检测的位置稳定在 0.15 m, 与设定的目标停止位置相同; 高频注入法估计位置最终稳定在 0.128 1 m, Δx 为 14.6%, 小于 15%。将注入电压幅值以 0.1 V 的步长递减, 发现直到注入电压幅值为 1.0 V 时出现差异, 如图 12 所示。

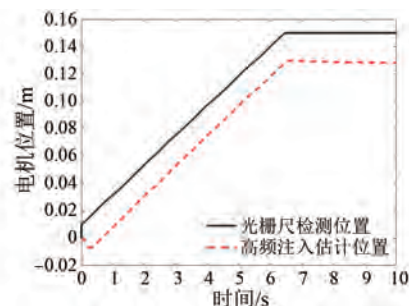


图 12 注入电压为 1.0 V 时无取向硅钢 PMSLM 的位置

Fig. 12 Position of non-oriented silicon steel PMSLM at an injection voltage of 1.0 V

由图 12 可知, 注入电压幅值为 1.0 V 时, 估计位置在稳定前出现超调, 最终估计位置稳定在 0.128 2 m, Δx 为 14.5%, 小于 15%。继续将注入电压幅值以 0.1 V 的步长递减, 发现超调量逐渐变大, 注入电压为 0.4 V 时超调量最大, 如图 13 所示。

由图 13 可知, 注入电压幅值为 0.4 V 时虽然有较大的超调, 但最终估计位置稳定在

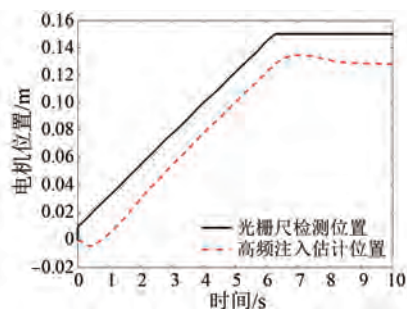


图 13 注入电压为 0.4 V 时无取向硅钢 PMSLM 的位置

Fig. 13 Position of non-oriented silicon steel

PMSLM at an injection voltage of 0.4 V

0.128 1 m, Δx 仍小于 15%。继续减小注入电压幅值,注入电压为 0.3 V 时的电机位置如图 14 所示。

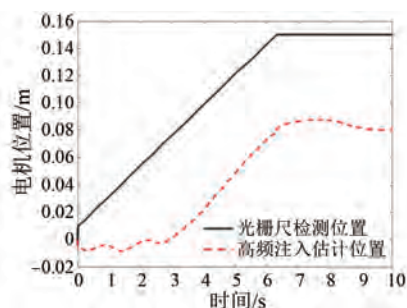


图 14 注入电压为 0.3 V 时无取向硅钢 PMSLM 的位置

Fig. 14 Position of non-oriented silicon steel

PMSLM at an injection voltage of 0.3 V

由图 14 可知,此时估计位置不能很好地跟踪电机位置且最后估计位置稳定在 0.08 m, Δx 为 46.7%,远大于 15%,说明 0.3 V 低于能估计动子位置的最低幅值。注入电压幅值为 0.3 V 时,有取向硅钢 PMSLM 位置估计情况如图 15 所示。

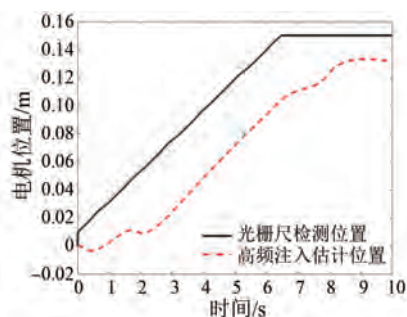


图 15 注入电压为 0.3 V 时有取向硅钢 PMSLM 的位置

Fig. 15 Position of oriented silicon steel

PMSLM at an injection voltage of 0.3 V

由图 15 可知,虽然估计位置有一定程度的波动,但最终稳定在 0.131 4 m, Δx 为 12.4%,小于

15%。可见,对于有取向硅钢 PMSLM,当注入电压幅值为 0.3 V 时,高频信号注入法能估计出较为准确的动子位置信息。为了避免试验偶然性,将电压幅值调整至 0.4 V 观测有取向硅钢 PMSLM 位置估计情况,如图 16 所示。

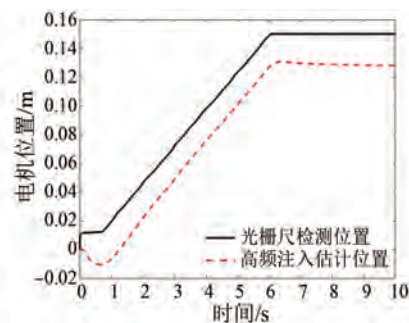


图 16 注入电压为 0.4 V 时有取向硅钢 PMSLM 的位置

Fig. 16 Position of oriented silicon steel

PMSLM at an injection voltage of 0.4 V

由图 16 可知,注入电压幅值为 0.4 V 时,估计位置在稳定之前出现少量超调,估计位置最终稳定在 0.128 1 m, Δx 为 14.6%,小于 15%,证明试验效果并非偶然。将注入电压幅值以 0.1 V 步长递增,发现幅值增加到 0.9 V 时便不再出现超调,如图 17 所示。

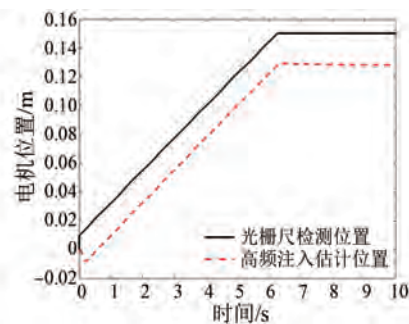


图 17 注入电压为 0.9 V 时有取向硅钢 PMSLM 的位置

Fig. 17 Position of oriented silicon steel PMSLM at an injection voltage of 0.9 V

由图 17 可知,注入电压幅值为 0.9 V 时,估计位置在稳定之前无超调,估计位置最终稳定在 0.128 2 m, Δx 为 14.5%,小于 15%。之后随着注入电压幅值递增,直至注入电压幅值增加到 4.8 V,估计位置的结果均和图 17 相同。

提取不同电压幅值下的高频响应电流峰值,如表 2~表 4 所示。

表 2 有取向硅钢 PMSLM 的 α 轴高频响应电流峰值Tab. 2 Peak value of α -axis high-frequency response current of oriented silicon steel PMSLM

注入电压幅值/V	响应电流峰值/A
0	0.09
0.3	0.14
0.4	0.19
0.9	0.52

表 3 无取向硅钢 PMSLM 的 α 轴高频响应电流峰值Tab. 3 Peak value of α -axis high-frequency response current of non-oriented silicon steel PMSLM

注入电压幅值/V	响应电流峰值/A
0	0.09
0.3	0.10
0.4	0.12
1.0	0.19
4.8	0.81

表 4 β 轴高频响应电流峰值Tab. 4 Peak value of β -axis high-frequency response current

注入电压幅值/V	响应电流峰值/A
0	0.09
0.3	0.09
0.4	0.09
1.0	0.09
4.8	0.09

由式(6)可知 α 、 β 轴电流和 d 、 q 轴电感成反比。由表 2~表 4 可知,随着 d 轴注入电压幅值的增加, α 轴高频响应电流峰值升高,而 β 轴高频响应电流峰值不变。即随着 d 轴注入电压幅值的增加, d 轴电感变小, q 轴电感不变,体现了电机的凸极特性。

4 结果讨论

磁导率 μ 可以通过 B - H 曲线计算得到,用来描述磁通密度 B 和磁场强度 H 的关系,如式(11)所示:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (11)$$

由图 1 可知,牌号为 B30G120 的有取向硅钢

轧制方向的磁导率大于牌号为 DW456_50 的无取向硅钢的磁导率;而牌号为 B30G120 的有取向硅钢剪切方向的磁导率小于牌号为 DW456_50 的无取向硅钢铁心的磁导率。直线电机,尤其多极直线电机,齿磁路(轧制方向磁路)远大于轭磁路(剪切方向磁路),所以轧制方向磁路对电机总磁路磁导率的影响大于剪切方向磁路,即有取向硅钢铁心的磁导率大于无取向硅钢铁心的磁导率。

根据试验结果可知,当注入电压幅值为 0.3 V 时,有取向硅钢 PMSLM 估计位置在允许误差范围 15% 内,而无取向硅钢 PMSLM 估计位置不在允许误差范围内。

高频注入原理是利用电机的饱和凸极性原理,即在电机饱和点,向 d 轴注入电压,相应的产生电流,在电流的作用下,使得 d 轴电感小于 q 轴电感,从而估计出转子位置。所以推测因为有取向硅钢铁心和无取向硅钢铁心的磁导率不同,从而导致在注入电压幅值较低时,有取向硅钢的 d 、 q 轴电感值差异明显,而无取向硅钢的 d 、 q 轴电感值差异不明显。磁通量 Φ 、电感 L 、电流 I 和电压 U 之间的关系如式(12)~式(14)所示:

$$\Phi = BA \quad (12)$$

$$L = N \frac{\Phi}{I} \quad (13)$$

$$I = \frac{U}{R} \quad (14)$$

式中: A 为截面积; N 为匝数; R 为电阻。

由式(11)~式(14)可以推出:

$$L = N\mu \frac{HAR}{U} \quad (15)$$

由式(15)可知,磁导率影响电感变化的幅度。当注入同样的电压,有取向硅钢 PMSLM 的磁导率比无取向硅钢 PMSLM 大,所以由于饱和性,其电感减小得更多。

5 结语

本文围绕高频方波注入的电压幅值对 PMSLM 的无传感器控制估计位置进行试验研究。对比了采用相同结构参数的有取向硅钢铁心和无取向硅钢铁心时,注入相同的较低电压幅值时,估计位置误差的差异。当注入较低电压幅值时,无取向硅钢 PMSLM 的估计位置不在允许误差范围

内,而有取向硅钢 PMSLM 的估计位置在允许误差范围内。这是因为有取向硅钢的各向异性可以改变磁导率,使得其能在更低注入电压幅值的高频注入法下实现位置估计。

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

刘意圆进行了仿真、试验研究、数据处理和分析、内容总结与论文撰写,张博参与了理论分析指导和论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The simulation, experimental research, data processing and analysis, content summary and paper writing were carried out by Liu Yiyuan. The theoretical analysis guidance, paper review and revision were carried out by Zhang Bo. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 彭英楠,王修森,王业勤,等. 基于 FxLMS 算法的双馈直线电机交流电磁力矩自适应补偿控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 1-11.
PENG Y N, WANG X S, WANG Y Q, et al. Adaptive compensation control of AC electromagnetic torque for doubly-fed linear motors based on the FxLMS algorithm [J]. Electrical Machines & Control Application, 2025, 52(1): 1-11.
- [2] 孙煜昊,蓝益鹏. 磁通切换磁悬浮直线电机热分析及冷却系统设计[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 84-93.
SUN Y H, LAN Y P. Thermal analysis and cooling system design of flux switching magnetic suspension linear motor [J]. Electrical Machines & Control Application, 2025, 52(1): 84-93.
- [3] 刘泽成,夏加宽,马功臣. 永磁同步直线电机单齿切向电磁力分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 59-64.
LIU Z C, XIA J K, MA G C. Analysis of single tooth tangential electromagnetic force in permanent magnet

- synchronous linear motors [J]. Electrical Machines & Control Application, 2023, 50(11): 59-64.
- [4] 沈忱. 基于滑模控制的永磁同步直线电机控制策略研究[D]. 北京:北方工业大学, 2024.
SHEN C. Study on the control strategy of permanent magnet synchronous linear motor based on sliding mode control [D]. Beijing: North China University of Technology, 2024.
- [5] 张海涛,陈鑫. 永磁同步电机矢量控制与直接转矩控制比较研究[J]. 流体测量与控制, 2022, 3(4): 82-84.
ZHANG H T, CHEN X. Comparative study on vector control and direct torque control of permanent magnet synchronous motor [J]. Fluid Measurement & Control, 2022, 3(4): 82-84.
- [6] 刘通. 基于扰动补偿磁链观测器的永磁同步直线电机无位置传感器控制[D]. 西安:西安理工大学, 2023.
LIU T. Permanent magnet synchronous linear motor based on disturbance compensated flux observer sensorless control [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [7] 王永康. 永磁同步直线电机低速域无位置传感器控制[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
WANG Y K. Sensorless control of permanent magnet linear synchronous motor in low-speed domain [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [8] 范永强. 基于机器学习的永磁同步直线电机控制策略研究[D]. 无锡:江南大学, 2023.
FAN Y Q. Research on control strategy of permanent magnet linear synchronous motor based on machine learning [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [9] 沈燧明,卢琴芬. 初级励磁型永磁直线电机研究现状与展望[J]. 电工技术学报, 2021, 36(11): 2325-2343.
SHEN Y M, LU Q F. Overview of permanent magnet linear machines with primary excitation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(11): 2325-2343.
- [10] 黄楠. 垂直运动永磁直线同步电机的无位置传感器控制方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2023.
HUANG N. Research on position sensorless control method of PMSLM for vertical movement [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [11] 程震磊. PMSLM 全速域无位置传感器控制技术研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2023.

- CHENG Z L. Research on PMSLM full speed domain position sensorless control technology [D]. Huai'nan: Anhui University of Science & Technology, 2023.
- [12] 张恒. 永磁直线电机无传感器控制系统推力波动抑制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- ZHANG H. Research on thrust ripple suppression strategy for sensorless PMSLM drives [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [13] 胡锦涛, 邵宜祥, 周百灵, 等. 基于新型高频注入的永磁同步电机无传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(9): 34-38+72.
- HU J T, SHAO Y X, ZHOU B L, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on novel high frequency injection [J]. Electrical Machines & Control Application, 2020, 47(9): 34-38+72.
- [14] 宋同月, 颜建虎, 应展烽, 等. 基于脉振高频注入法的零低速永磁直线同步电机无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(11): 10-17+24.
- SONG T Y, YAN J H, YING Z F, et al. Sensorless control of permanent magnet linear synchronous motor at standstill and low-speed based on pulsating high frequency injection [J]. Electrical Machines & Control Application, 2020, 47(11): 10-17+24.
- [15] 夏阳. 基于高频信号注入的永磁同步电机无位置传感器控制系统设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- XIA Y. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree for the master of engineering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [16] 张翔. 复合策略下的 PMSM 分速域控制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- ZHANG X. Research on PMSM speed domain control based on composite strategy [D]. Huai'nan: Anhui University of Science & Technology, 2022.
- [17] 蒋阳. 基于改进式观测器的直线游标永磁电机无位置传感器控制技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- JIANG Y. Research on sensorless control technology of linear vernier permanent magnet motor based on improved observer [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [18] 董江波. 表贴式永磁同步电机全速域无位置传感器控制技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
- DONG J B. Research on sensorless control technology of surface magnet synchronous motor in full speed range [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [19] 应征宇. 低速段永磁同步电机无位置传感器控制性能优化[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- YING Z Y. Position sensorless control performance optimization of PMSM at low-speed range [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [20] 杨博伟. 基于高频信号注入的永磁同步电机无速度传感器控制策略研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2022.
- YANG B W. Research on speed sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on high frequency signal injection [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022.
- [21] 楼嘉俊. 单电阻采样永磁电机驱动系统重载起动低速运行控制策略[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- LOU J J. Control strategy of heavy-load starting and low-speed operation with single current sensor for PMSM drives [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [22] 袁磊, 胡冰新, 魏克银, 等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- YUAN L, HU B X, WEI K Y, et al. Modern Permanent Magnet Synchronous Motor Control Principles and MATLAB Simulation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2016.
- [23] 董婷, 黄居言, 菅玲. 有取向硅钢片潜油永磁同步电机的研究[J]. 微电机, 2020, 53(9): 95-99.
- DONG T, HUANG J Y, JIAN L. Application of oriented silicon steel sheet in submersible PMSM with FSCW [J]. Micromotors, 2020, 53(9): 95-99.
- [24] 高子晏, 董婷. 基于田口法和遗传算法的取向硅钢片直线电机优化设计[J]. 微特电机, 2023, 51(11): 30-36.
- GAO Z Y, DONG T. Optimization design of oriented silicon steel linear motor based on Taguchi-method and genetic algorithm [J]. Small & Special Electrical Machines, 2023, 51(11): 30-36.
- [25] 孙宇亮. 抽油机用半直驱开关磁阻电机设计与优

- 化[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2022.
- SUN Y L. Design and optimization of semidirect drive switched reluctance motor for beam pumping unit [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [26] DONG T, FU R J, ZHANG B, et al. Analysis of permanent magnet linear synchronous motor made by oriented silicon steel sheet [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(3): 3332-3340.
- [27] 鹿旭升, 李扬阳, 马德稷, 等. 取向硅钢在电机中的应用及展望[J]. 电工钢, 2024, 6(1): 23-29.
- LU X S, LI Y Y, MA D J, et al. Application and prospects of grain-oriented silicon steel in electric motor [J]. Electrical Steel, 2024, 6(1): 23-29.
- [28] 赵贺. 基于高频信号注入法的永磁同步直线电机无位置传感器控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- ZHAO H. Research on the sensorless control of permanent magnet linear synchronous motor based on high-frequency signal injection method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [29] 陈文德. 永磁直线同步电机宽速域无位置传感器控制策略研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- CHEN W D. Research on position sensorless control strategy of permanent magnet linear synchronous motor in wide speed range [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.
-
- 收稿日期:2025-05-19
收到修改稿日期:2025-06-24
作者简介:
刘意圆(2000-),男,硕士研究生,研究方向为直线电机控制,19524011907@163.com;
*通信作者:张 博(1987-),男,博士,教授,研究方向为高效电力装备设计、电机系统容错控制及状态监测技术,solomon@sut.edu.cn。