

文章编号 1004-924X(2019)03-0619-11

基于参数预标定的长行程 PMLSM 无传感器控制

文 通, 李宏敏*, 李海涛, 张思磊

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要:为了解决长行程定子不连续永磁直线同步电机存在的因无法全程安装位置传感器和不同动子和定子之间的电磁参数不固定所造成的控制性能下降的难题,提出一种在每一段定子内先进行参数标定,再进行速度控制的控制系统设计。首先,在动子进入过程中,对电机进行电磁参数标定,根据标定参数对控制器参数进行调整,以达到更好的控制效果。然后,使用无位置传感器控制系统使动子快速达到设定速度值并稳定运行。实验结果表明:动子进入过程参数标定精度分别为 0.002 Wb 和 0.000 4 H;无位置传感器控制中位置估计精度为 0.63 mm,速度收敛时间为 0.45 s,稳态误差为 0.02 m/s。基本满足永磁直线同步电机用于长行程运输的控制快速性、稳定性等要求。

关键词:永磁直线同步电机;长行程运输系统;参数标定;无位置传感器控制

中图分类号: TM359.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192703.0619

Sensorless control of long-distance permanent magnet linear synchronous motor based on parameters pre-calibration

WEN Tong, LI Hong-min*, LI Hai-tao, ZHANG Si-lei

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering,
Beihang University, Beijing 100191, China)

* Corresponding author, E-mail: lihongmin@buaa.edu.cn

Abstract: Permanent Magnet Linear Synchronous Motors (PMLSMs) with discontinuous stators are used in long-distance transport systems. Control performance degradation of PMLSMs is generally caused by the inability to install position sensors and by the fact that electromagnetic parameters between different movers and stators are not fixed. To solve this problem, a control system was implemented in a section of the stator in this study. First, the electromagnetic parameters of the motor were calibrated during the entry of the mover, and the controller parameters were adjusted based on the calibration parameters to achieve a better control effect. Then, the control system without a position sensor was used to enable the mover to reach a set speed quickly and run stably. Experimental results show that the calibration accuracy of the parameters of the entering process are 0.002 Wb and 0.000 4 H, the position estimation accuracy is 0.63 mm, the speed of the sensorless control can reach the set value within 0.45 s, and the steady state error is 0.02 m/s. The study thus shows that the implemented control system can satisfy the system requirements of high speed and stability.

Key words: Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM); long-distance transportation system; parameter calibration; sensorless control

收稿日期:2018-09-06;修订日期:2018-11-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61374211);北京自然科学基金资助项目(No. 3182024)

1 引言

近年来,永磁直线同步电机(Permanent Magnet Linear Synchronons Motor, PMLSM)由于具有可靠性高、电机效率高和功率密度高等优点,在长距离直线运输系统中得到了广泛应用^[1-2]。目前,较为广泛的一种应用是短次级长初级绕组分段式永磁直线同步电机,短次级的设计可以减少永磁体的使用量,降低了成本。为了更进一步节约成本,通常将多个定子不连续串联形成轨道^[3-5],动子利用惯性在定子空隙间滑行,当动子运行到定子上方时进行速度控制。这种设计不仅可以实现低成本,还具有模块化的特点,使得定子数量可以灵活地进行调整,提高了整个系统的可拓展性。

长行程永磁直线同步电机具有动子、定子可拓展的优点,动子在运行过一个完整的路径时往往会经过不同的定子,而定子上也有多个不同的动子通过,由于气隙长度、负载质量以及加工装配工艺都存在差异,导致了该系统具有多动子、多定子不固定配对的特性,即不同配对的动子与定子之间的电机模型发生了改变。在很大程度上,电机驱动控制的精度受电机模型的精确程度影响,当电机模型发生改变,控制器需要对控制对象的变化做出一定的应对策略,才能保持良好的控制精度。目前,已有多种研究表明可以在电机运行过程中进行多参数的在线辨识,以提高系统控制性能^[6]。然而,其多是由于解决在电机运行中由于温度变化等造成的参数缓慢变化问题,而在多定子不连续的永磁直线同步电机控制中,不同于旋转电机的转子和定子绕组长时间互相作用,动子快速通过每一节定子上方时,其作用时间非常短,在该过程中参数变化微乎其微,几乎可以认为其是恒定不变的。本文中系统存在特殊性,当动子运行到不同定子上方时,永磁体磁链 ψ_f 和同步电感 L_s 将会发生变化,其电磁参数的不固定将导致控制性能的下降,进而导致系统运行不稳。针对这一问题,本文提出了一种动子与定子的参数标定方法,并使控制器能够针对参数变化进行自身控制参数调整,保证其控制精度。

永磁直线同步电机的控制方法与旋转电机的控制方法类似,在电机控制理论中,位置传感器可

以实时检测动子位置用于电流解耦和速度反馈,是电流和速度双闭环磁场定向控制中的关键环节。位置传感器通常采用电子式或机电式位置传感器,如霍尔效应器件、光学编码器、旋转变压器等。对于直线电机来说,经常用磁栅或光栅位移检测装置来获取动子位置信息^[7],将磁栅或光栅贴于定子侧,将其配套的读数头安装于动子上,可以准确获取动子运行过程中的位置信息。然而,读数头需要与控制器通过线缆相连接,动子在长行程运行中拖着线缆十分不便。若将读数头安装在定子侧,磁栅或光栅贴于动子侧,需要在动子运行的路径上全部安装上读数头,成本又太高,且需要占用太多控制器资源。当前,已有广大专家学者提出了无位置传感器控制技术,通过检测电机绕组的有关电信号,采用位置估计算法来进行位置反馈^[8],并取得了一定的成果。考虑到这点,本文将无位置传感器控制应用于长行程永磁直线同步电机控制中,设计了单段定子对动子驱动控制系统,从而实现对全行程速度的精确控制。

本文针对长行程定子不连续 PMLSM 多动子、多定子不固定配对和无法全程安装位置传感器的问题,提出了基于参数预标定的 PMLSM 无位置传感器控制。实验结果表明该控制系统可以成功应用于 PMLSM,使其保持稳定速度运行。

2 PMLSM 控制系统及其工作原理

永磁直线同步电机是由多个不连续定子及动子构成,且动子长度小于定子间隙的长度,如图 1 所示。

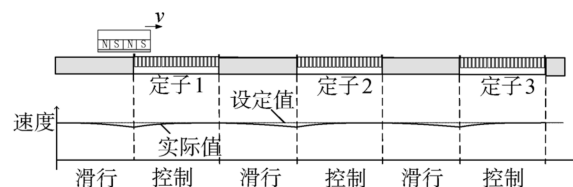


图 1 长行程 PMLSM 系统及运行速度示意图

Fig. 1 Long-distance PMLSM system and speed of service

这种结构避免了动子在运行过程中出现跨定子的情况,无需考虑动子在跨定子期间各种参数变化对控制的影响。与定子紧密连接的形式相比,动子只有在经过定子上方时,才能进行速度控

圈绕组上所生成的空载反电势电压 e_A, e_B, e_C , 可表示为:

$$\begin{cases} e_A = P \cos \theta \\ e_B = P \cos(\theta - 2\pi/3) \\ e_C = P \cos(\theta + 2\pi/3) \end{cases} \quad (4)$$

通过 Clark 变换将 ABC 坐标系下的反电势方程转换为 $\alpha\beta$ 坐标系下的 e_α, e_β , 则反电势幅值 P 可通过式(5)求得:

$$P = \sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \quad (5)$$

进一步地, 通过在定子前端的磁栅读数头可以获得动子的位置信息, 从而解算出移动速度 v 。

已知永磁体磁链为:

$$\psi_f = \frac{e_0 \tau}{\pi v} \quad (6)$$

其中 e_0 为空载反电动势, 其值为每相绕组反电动势有效值的 $\sqrt{3}$ 倍, 即:

$$e_0 = \sqrt{3} E_0 \quad (7)$$

而每相绕组反电动势为正弦交流电, 其有效值为:

$$E_0 = P / \sqrt{2} \quad (8)$$

则可以通过式(9)计算出永磁体磁链 ψ_f :

$$\psi_f = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{P \tau}{\pi v} \quad (9)$$

其中 τ 为动子永磁体的磁间极距。

根据基本公式, 永磁体磁链是永磁体等效激励电感 L_m 和永磁体等效电流 i_f 的乘积^[11]。因此, 可以获得永磁体等效励磁电感为:

$$L_m = \frac{\psi_f}{i_f} \quad (10)$$

由于本电机为表贴式永磁直线同步电机, 有 $L_s = L_d = L_q$ 。漏电感 L_σ 是一个常数, 同步电感可以表示为等效励磁电感与漏电感之和^[12]:

$$L_s = L_\sigma + L_m \quad (11)$$

通过以上分析在理论上证明了永磁体磁链 ψ_f 和同步电感 L_s 可以根据上述方法进行标定。

在永磁直线同步电机的双闭环矢量控制中, 包含电流内环和速度外环, 速度环具有抗负载扰动能力, 根据速度给定和速度反馈经速度 PI 控制器给出电流转矩分量 i_q 的给定值, 电流 PI 控制器则能够及时抑制电流内环扰动, 提高系统响应的快速性。速度和电流 PI 控制器的最佳控制参数与电机的电磁参数有着不可分割的关系。为保证控制系统的精度, 当定子上驶入一个新的动子时,

本文采用电磁参数标定值对 PI 控制器的参数进行调整。这里使用一种不同于典型的自动控制理论 II 系统的 PI 参数整定方法。

PI 控制器的参数 K_{pv} 和 K_{iv} 可由式(12)整定^[13-14]:

$$\begin{cases} K_{pv} = \frac{\beta M \tau}{1.5 \pi P_n \psi_f} \\ K_{iv} = \beta K_{pv} \end{cases} \quad (12)$$

其中: β 为期望的速度环闭环带宽, M 为动子质量, P_n 为极对数。

相对于采用典型 II 系统进行 PI 控制器参数整定的方法, 此种参数整定简单, 并且参数调整与系统的动态品质关系明确。对于电流环 PI 控制器, 采用文献[15]提出的内模控制策略进行参数设计, 则有:

$$\begin{cases} K_{pd} = \alpha L_d \\ K_{id} = \alpha R \\ K_{pq} = \alpha L_q \\ K_{iq} = \alpha R \end{cases} \quad (13)$$

其中 α 是电流环带宽, 可由时间常数 T 通过式(14)计算:

$$\alpha = 2\pi/T = 2\pi/\min\{L_d/R, L_q/R\} \quad (14)$$

在实际的工程应用中, 需要不断地调试 PI 参数, 以获得最佳的控制效果。然而, 对于本文的控制系统, 当多个动子运行到不同的定子上时, 不可能对每一对都进行 PI 参数的调试。从式(12)~式(14)可以看出, 控制器参数与 ψ_f 和 L_s 成比例, 可以根据该对动子和定子标定值计算出它们与上一对电磁参数的比值。因此, 当电磁参数被标定为新的值时, 根据比值放大或缩小控制器参数, 从而获得具有新的电磁参数的电机的控制器参数。

3.2 无位置传感器控制器研究

当动子与定子完全重合时, 通过无传感器控制来使速度达到并保持设定值。对于旋转电机的无位置传感器技术研究已形成成熟的理论, 直线电机的无位置研究多是在旋转电机无位置理论上建立起来的, 本文采用在中高速领域具有良好控制效果的反电势积分法进行位置估计。

在静止坐标系下, 永磁直线同步电机的数学模型可表示如式(15):

$$\begin{cases} u_\alpha = R_s i_\alpha + \frac{d}{dt}(L_s i_\alpha + \psi_f \cos \theta_r) \\ u_\beta = R_s i_\beta + \frac{d}{dt}(L_s i_\beta + \psi_f \sin \theta_r) \end{cases} \quad (15)$$

式中 θ_r 为电角度。

动子的位置 x 和速度 v 可以通过式(16)来计算^[16-17]:

$$\begin{cases} x = \frac{\tau}{\pi} \theta_r = \frac{\tau}{\pi} \arctan \frac{\psi_\beta - L_s i_\beta}{\psi_\alpha - L_s i_\alpha} \\ v = \frac{\tau}{\pi} \omega_r = \frac{\tau}{\pi} \frac{\psi_\alpha (u_\beta - R i_\beta) - \psi_\beta (u_\alpha - R i_\alpha)}{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \end{cases} \quad (16)$$

由此可见,采用反电势积分法估算电机的位置,计算方法非常简单。其中,定子磁通链 ψ_α, ψ_β 通过将反电势积分获得。

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \psi_{\alpha_0} + \int (u_\alpha - R_s i_\alpha) dt \\ \psi_\beta = \psi_{\beta_0} + \int (u_\beta - R_s i_\beta) dt \end{cases}, \quad (17)$$

其中 ψ_{α_0} 和 ψ_{β_0} 为磁链初始值,由于动子在进入过程中可以检测到实际位置,在完全重合的时候可以测出磁极的初始位置,则可得到磁链的初始值,这里假设初始位置为 0。然而在这种方法中,纯积分环节会因反电势中存在直流偏移产生积分漂移,即使很小的误差最终都会导致积分器饱和。通常,使用低通滤波器来代替纯积分环节。然而,低通滤波器不能完全消除直流偏置,并且带来相位误差。本文利用自适应补偿算法,在反电势积分法中应用了一种改进型积分器。它具有较好的动态和稳态特性,且能用于估计幅值变化磁链^[18-19],改进型积分器结构框图如图 4 所示。

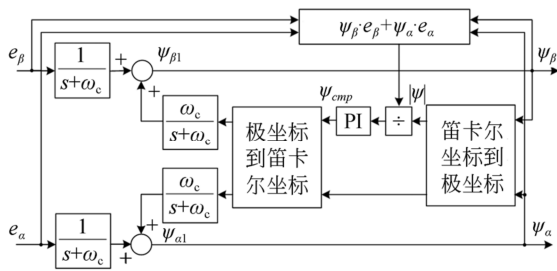


图 4 基于自适应补偿的改进型积分器

Fig. 4 Improved integrator based on adaptive compensation

图中 $e_\alpha, e_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta$ 分别是检测的反电势矢量 e_s 和观测的磁链矢量 ψ_s 在两相静止坐标系下的分量, $|\psi|$ 是合成后的定子磁链幅值, ψ_{comp} 是磁链补偿器,其表达式为:

$$\psi_{\text{comp}} = \left[k_p + \frac{k_i}{s} \right] \frac{\psi_\alpha \cdot e_\alpha + \psi_\beta \cdot e_\beta}{|\psi|} \quad (18)$$

根据式(18),在理想情况下,定子磁链与反电势电压完全正交,根据这一条件对定子磁链进行估计和修正。当估计的定子磁链由于直流偏置的存在而发生扭曲时,定子磁链与反电势电压的正交性将立即被破坏。此时,将通过一个自适应 PI 调节器来进行正交补偿,将它的输出作为磁链估计通道的反馈。通过自适应补偿,可以很好地解决直流偏置问题,更准确地估计出动子的位置。

4 仿真验证

本文为了检验所提出的控制方案的可行性,进行了仿真研究。根据式(1)和表 1 提供的电机参数搭建电机模型。本节的重点在于仿真验证无位置传感器控制算法和参数标定算法及其 PI 参数调整的有效性。

表 1 三相永磁直线同步电机样机参数

Tab. 1 Parameters of three-phase PMLSM

电机参数	数值
极数 $2Pn$	6
极距 τ/mm	20
动子长度 x_m	6τ
单段定子长度 L_m/m	0.9
定子段间距离 L/m	0.9
动子质量 M/kg	5
粘滞摩擦力系数 B/N	1.6
永磁体等效励磁电流 i_f/A	26.9
漏电感 L_σ/H	0.002
永磁体磁链 ϕ_f/Wb	0.02
定子电感 L_s/H	0.004
定子电阻 R_s/Ω	4.35
运行速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2

为了验证改进后的算法对直流偏量的抑制效果,在反电势 e_α, e_β 加入了 0.05 V 直流信号,分别使用纯积分,低通滤波器和改进后的积分器来估计定子磁链,并和标准磁链进行对比,它们的磁链

运动轨迹如图 5 所示。结果表明,改进后的积分器可以有效地抑制直流偏置,减小相位偏差,最接近于参考磁链轨迹。

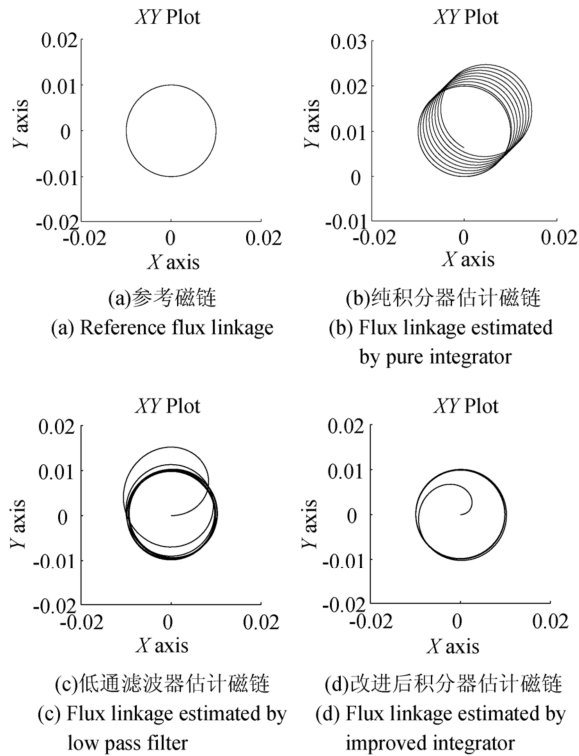


图 5 定子磁链轨迹

Fig. 5 Stator fluxes (ψ_s , ψ_p) tracks

使用改进后积分器对 PMLSM 进行位置估计,并与实际位置进行对比,如图 6 所示,结果表明位置估计误差非常小。

针对多定子、多动子不固定配对的特点,为了验证参数标定的必要性,本文设计了 3 组比较仿真实验:

a. 电机模型中永磁体磁链 ψ_f 和同步电感 L_s 采用表 1 中给出的值,经过参数标定算法得到标定值,验证算法的有效性,根据式(9)和式(10)计算 PI 控制器参数 (K_{pv} , K_{rv} , K_{pd} , K_{id} , K_{pi} 和 K_{iq}),在不断调试之后,实现比较好的控制性能。

b. 将电机模型中的电磁参数改为另一组数据,以模拟新的动子运行到该定子上方时的情形,该组的电磁参数不作标定,PI 控制器参数仍用上一组的值,观察控制效果的变化。

c. 该组仿真对更改后的电磁参数进行参数标定,根据标定出的参数与表中给出参数的变化比

例调整 PI 控制参数,观察该组的控制效果,并与上两组进行对比。

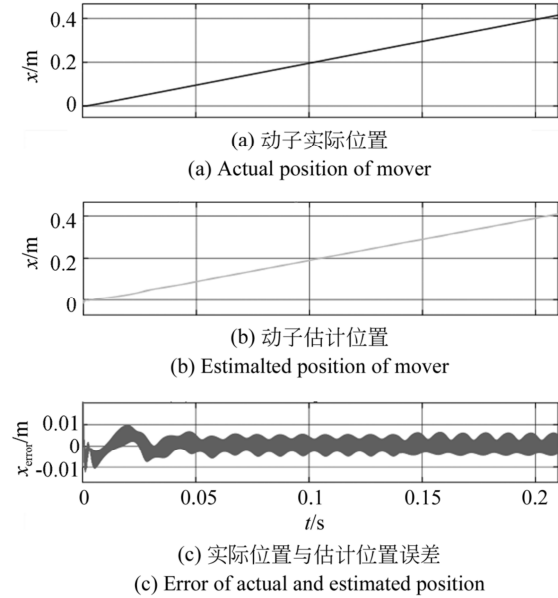


图 6 估计位置与实际位置对比及误差

Fig. 6 Comparison and error of estimated position and actual position of mover

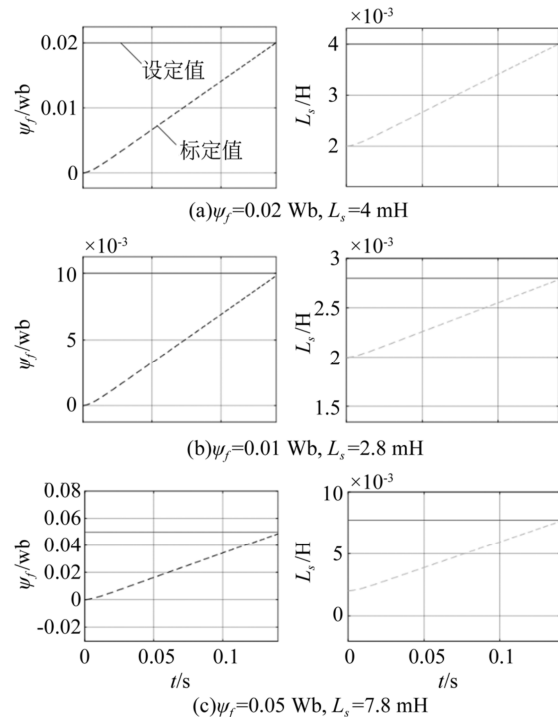


图 7 电磁参数标定结果

Fig. 7 Calibrated electrical parameters

为了模拟新动子与定子配对的多多样性,假设电磁参数由 $\phi_f = 0.02 \text{ Wb}$, $L_s = 4 \text{ mH}$ 分别改为 $\phi_f = 0.01 \text{ Wb}$, $L_s = 2.8 \text{ mH}$ 和 $\phi_f = 0.05 \text{ Wb}$, $L_s = 7.8 \text{ mH}$ 。在上述仿真方案中,共有3组电磁参数经过参数标定算法,匀速行驶过程中的标定结果如图7所示,标定值最终与设定值的误差很小。而且很明显, ϕ_f 和 L_s 随着动子与定子的耦合面积线性增长。在控制效果上,由于该速度控制系统要求速度尽可能快地平稳上升至设定值, a, b, c 3组控制效果仿真如图8所示。a组仿真是电机在原电磁参数下的控制性能,经过不断调试使其速度快速性和平稳性都满足要求。b组仿真相当于使用a组的控制参数来控制已经改变参数的电机模型,可以看到图8(a)的曲线b虽然无超调量,但调节时间太长,图8(b)的曲线b有0.2 m/s左右的超调量,且调节时间达到了0.06 s。c组仿真是为了弥补b组的不足,通过对参数进行标定,并且调整控制器参数,使控制效果尽可能地达到最优状态,图8(a)的曲线c的调节时间相较曲线b来说明显缩短,其快速性优于b,图8(b)的曲线c无超调量,其稳态性能优于b,且调节时间减少到0.025 s,快速性变好。仿真结果表明不论电机的电磁参数怎样变化, c组仿真的控制效果都要明显优于b组,证明了当不同的动子运行到定子上方时,不仅可以标定出其电磁参数,还可以使该控制系统达到更优的控制效果。

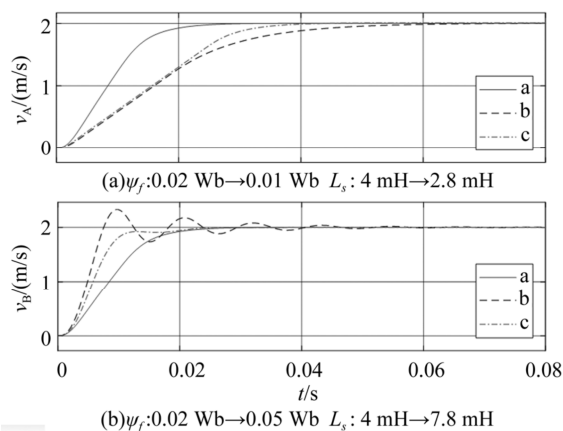


图8 a, b, c 3组速度控制效果对比

Fig. 8 Comparison of speed control effects between a, b and c groups

5 实验验证及分析

为了进一步验证控制系统的可行性,对表1参数的定子不连续PMLSM进行了实验验证。同时,电机的动子安装有磁栅读数头,以提供真实的位置信息,从而估计的位置和速度可以与实际的位置和速度进行比较,以测试控制方案的有效性,实验平台如图9所示。采用的TI公司的TMS320F28377S作为数字信号处理计算单元,驱动电路芯片使用DRV8301,开关频率设置为10 kHz。

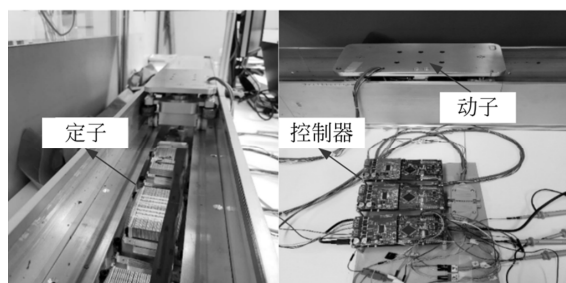


图9 实验平台及其控制电路

Fig. 9 Experimental platform and its control circuit

整个控制算法包括主程序和中断程序设计两部分。主程序流程图如图10所示。主程序用来对系统进行初始化,定义变量并等待中断。中断是系统软件算法的核心,PMLSM的无位置传感器控制和参数标定算法主要在中断程序中实现,其流程图如图11所示。当ADC中断到来,进入中断程序,首先通过SPI通讯获取定子的电压和电流。通过QEP_A检测是否有脉冲输入,判断动子是否进入定子:若有脉冲,证明动子正在进入定子,通过检测位置、速度和反电势信息标定电磁参数,并更新PI控制器参数;若无脉冲,则证明动子已经完全进入了定子,对电流采样值进行Clarke和Park变换,得到 i_d 和 i_q , 接下来进行速度环和电流环的PI计算,得到 u_d 和 u_q , 然后进行ipark变换得到 $\alpha\beta$ 轴的电压指令。下一步通过母线电压和三相桥臂的开关时间计算 $\alpha\beta$ 轴实际电压,通过 $\alpha\beta$ 轴电压和电流计算反电势,由反电势估计得到动子的位置和速度,反馈到闭环回路中。最后执行SVPWM计算和PWM输出。

将改进后的反电势积分法同传统的反电势积

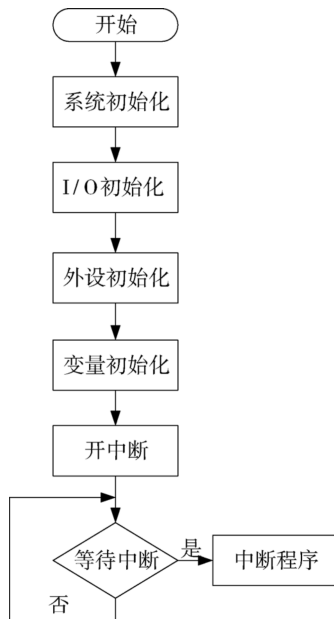


图 10 主程序流程图

Fig. 10 Flow chart of main program

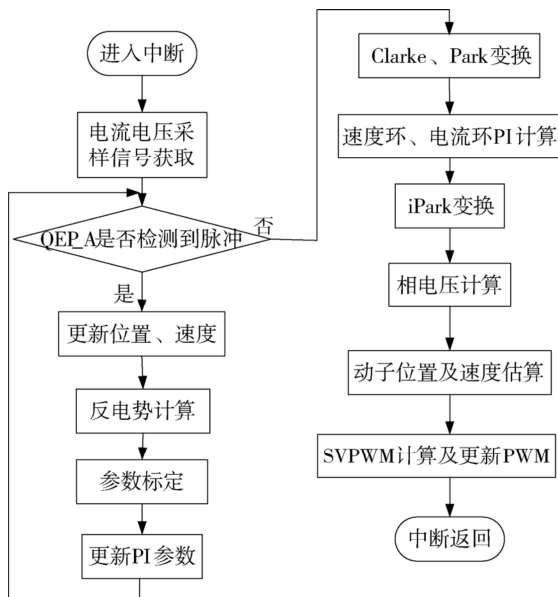
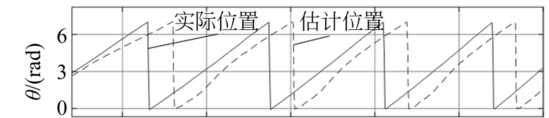


图 11 中断程序流程图

Fig. 11 Flow chart of interrupt program

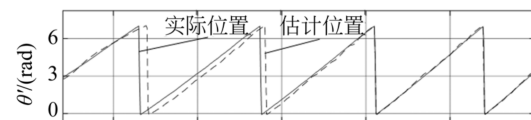
分法进行了对比,由于动子的位移信号与电角度信号只差了一个系数 τ/π ,为了便于观察,位置信号由电角度来表示,如图 12 所示。在图 12(a)中,采用传统反电势积分法得到了弯曲的估计位置信号 θ ,光滑的信号是真实的位置信号。这是由于输入信号中存在直流偏移,传统反电势积分法不能完全消除直流偏量的影响,且会引入相位

误差,使得估计位置信号有一定的失真和相移,位置估计误差达到 1.58 rad,即 10 mm。而在图 12(b)中使用了改进后的反电势积分法得到的估计位置信号 θ' 可以明显消除畸变,且相位误差于 3 个周期后收敛,其位置估计误差稳定后减少为 0.63 mm 以内。



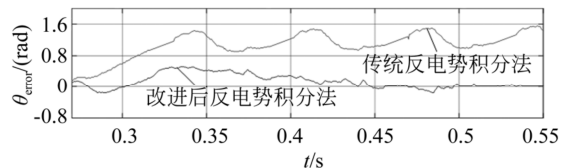
(a) 传统反电势积分法估计位置与实际位置对比

(a) Estimated position of traditional Back-EMF integral method compared with actual position



(b) 改进后反电势积分法估计位置与实际位置对比

(b) Estimated position of modified Back-EMF integral method compared with actual position



(c) 传统和改进后反电势积分法位置估计误差对比

(c) Comparison of position estimation error between traditional and improved Back-EMF integral methods

图 12 实验验证估计位置与实际位置对比及误差

Fig. 12 Comparison and error between estimated position and actual position

将动子速度设定为 2 m/s,当动子驶入定子时,首先进行参数标定,图 13 显示了根据动子与定子耦合面积增长而幅值增长的反电势波形,以及电磁参数 ψ_f 和 L_s 的标定值,其标定精度分别达到 0.002 Wb 和 0.000 4 H。理论研究中,在匀速行驶过程中,标定参数随耦合面积的增大线性增长,然而本实验结果中标定参数并不是完全线性增长,这是由于本段定子绕组具有轻微的不对称性,导致标定参数具有一定的波动。将标定值与控制器中存储的原始电磁参数做比较调整 PI 控制器参数,进行双闭环矢量控制。图 14 显示了动子参数标定和无位置传感器控制过程中相电流的变化,由于动子与定子的耦合面积在进入过程逐渐增加,绕组内的感应电流幅值也不断增长,当动子与定子完全耦

合进行无位置传感器控制,绕组内通入电流以驱动动子运行。加入参数标定环节的控制效果如图 15 所示,动子初始速度为 1.77 m/s,在该段定子的速度收敛时间达到了 0.45 s,稳态误差为 0.02 m/s,满足 PMLSM 对速度收敛快速性和平稳性的要求。

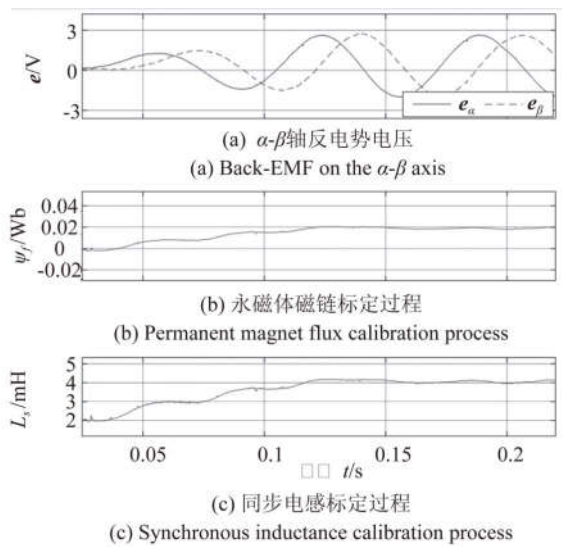


图 13 电磁参数标定结果

Fig. 13 Calibration results of electromagnetic parameters

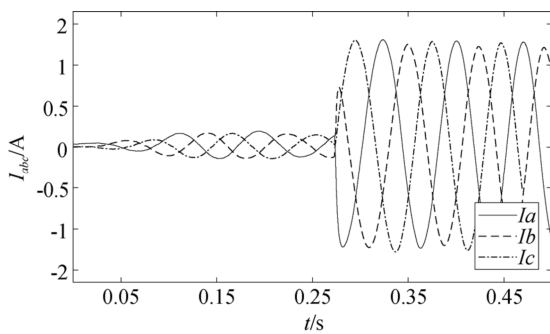


图 14 参数标定过程与无位置传感器控制过程相电流
Fig. 14 Phase current of parameters pre-calibration and sensorless control

参考文献:

[1] 王利. 现代直线电机关键控制技术及其应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
WANG L. *Research on Key Control Technology and Application of Modern Linear Motor* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chi-

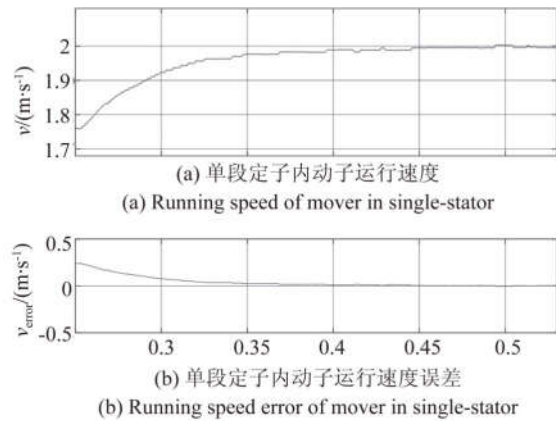


图 15 单段定子内动子运行速度与设定值对比及误差
Fig. 15 Comparison and error between running speed and set value of mover in single-stator

6 结 论

长行程定子不连续永磁直线同步电机具有多定子、多定子不固定配对和无法全程安装位置传感器的特殊性,对长距离运行控制带来不便。本文提出了一种基于参数预标定的长行程永磁直线同步电机无传感器控制方法。针对不同动子和定子配对时控制性能下降的问题,在动子进入定子的过程加入参数标定环节,根据标定参数调整 PI 控制器参数,提高控制性能。针对无法反馈位置信息的问题,研究了无传感器控制方法,将一种改进型反电势积分法应用于系统。为了验证完整控制系统的有效性和可行性,给出仿真验证结果并分析。最后,进行完整的控制系统软件设计,实现实验验证。实验结果表明:动子进入过程参数标定精度为 0.002 Wb 和 0.000 4 H;无位置传感器控制中位置估计精度为 0.63 mm;无位置传感器控制速度收敛时间达到 0.45 s,稳态误差为 0.02 m/s。基本满足 PMLSM 用于长行程运输的控制快速性、稳定性等要求。

nese)

[2] 叶云岳. 现代新型直线驱动技术及其应用[J]. 电气技术, 2005(6):1-4.
YE Y Y. The application of new linear motor technique [J]. *Electric Technique*, 2005(6):1-4. (in Chinese)
[3] SUZUKI K, KIM Y J, DOHMEKI H. Driving method of permanent-magnet linear synchronous

- motor with the stationary discontinuous armature for long-distance transportation system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(5):2227-2235.
- [4] YONGJAE K, KYU M L, MASAYA W. A study on the reduction of cogging force of stationary discontinuous armature linear synchronous motor using auxiliary teeth[J]. *Journal of Magnetics*, 2011, 16(3):281-287.
- [5] ABDOLLAHI S E, MIRZAYEE M, MIRSALIM M. Design and analysis of a double-sided linear induction motor for transportation[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(7):1-7.
- [6] 李红梅, 陈涛. 永磁同步电机参数辨识研究综述[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015(5):638-647.
- LI H M, CHEN T. Review of research on parameter identification of PMSM[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015(5):638-647. (in Chinese)
- [7] 曹小涛, 李德全, 李洪文, 等. 非共振式压电直线电机精密驱动及定位控制[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2139-2148.
- CAO X T, LI D Q, LI H W, *et al.*. Precision drive and position control of non-resonance piezoelectric stack linear motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2139-2148. (in Chinese)
- [8] 刘计龙, 肖飞, 沈洋, 等. 永磁同步电机无位置传感器控制技术研究综述[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(16):76-88.
- LIU J L, XIAO F, SHEN Y, *et al.*. Position-sensorless control technology of permanent-magnet synchronous motor-a review [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(16):76-88. (in Chinese)
- [9] 上官璇峰, 励庆孚, 袁世鹰. 多段初级永磁直线同步电动机驱动系统整体建模和仿真[J]. *电工技术学报*, 2006(03): 52-57.
- SHANGGUAN X F, LI Q F, YUAN SH Y. Integrated modeling and simulation of the systems driven by multi-segment primary permanent linear synchronous motors[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006(03): 52-57. (in Chinese)
- [10] 祝贺, 张今朝, 董睿, 等. 绕组分段永磁直线同步电机无传感器控制[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(21): 65-76.
- ZHU H, ZHANG J ZH, DONG R, *et al.*. Sensorless control of winding segmented permanent magnet linear synchronous motor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(21): 65-76. (in Chinese)
- [11] 焦留成, 程志平. 永磁直线同步电动机特性及控制[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- JIAO L CH, CHENG ZH P. *Operating Characteristics and Control of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor* [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [12] 辛忠有, 李立毅, 刘家曦. 初级分段永磁直线电机段间无传感器控制研究[J]. *微特电机*, 2017, 45(5): 49-54.
- XIN ZH Y, LI L Y, LIU J X. Study on sensorless control of primary segmented permanent magnet linear motor[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2017, 45(5): 49-54. (in Chinese)
- [13] HARNEFORS L, PIETILAINEN K, GERTMAR L. Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, 48(1): 161-168.
- [14] 袁雷. 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. *Modern Permanent Magnet Synchronous Motor Control Theory and Matlab Simulation* [M]. Beijing: Beihang University Press, 2016. (in Chinese)
- [15] CHAN T F, WANG W, BORSIE P, *et al.*. Sensorless permanent-magnet synchronous motor drive using a reduced-order rotor flux observer[J]. *Iet Electric Power Applications*, 2008, 2(2): 88-98.
- [16] 陆华才. 无位置传感器永磁直线同步电机进给系统初始位置估计及控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- LU H C. *Position Sensorless Control Strategy and Initial Position Estimation of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Feeding System* [M]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [17] 张波, 葛琼璇, 刘金鑫, 等. 基于扩展反电动势法的长定子直线同步电机无速度传感器控制研究[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(23):91-99.
- ZHANG B, GE Q X, LIU J X, *et al.*. Research on speed sensorless control of long stator linear synchronous motor based on EEMF[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(23):91-99. (in Chinese)
- [18] HOLTZ J, JUNTAO Q. Drift-and parameter-

compensated flux estimator for persistent zero-stator-frequency operation of sensorless-controlled induction motors[J]. *Industry Applications*, IEEE Transactions on, 2002, 39(4): 1052-1060.

[19] 刘刚,肖焯然,孙庆文. 基于改进反电势积分的永

磁同步电机位置检测[J]. *电机与控制学报*, 2016, (2): 36-42.

LIU G, XIAO Y R, SUN Q W. Position detection of PMSM based on the improved back-EMF integration method[J]. *Electric Machines and Control*, 2016, 20(2): 36-42. (in Chinese) (in Chinese)

作者简介:



文 通(1983—),男,湖南衡阳人,博士,讲师,2005年于北京航空航天大学获得学士学位,2012年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事磁悬浮惯性执行机构、磁悬浮稳定平台、直线电机控制研究。E-mail: wentong@buaa.edu.cn



李宏敏(1993—),女,河北张家口人,硕士,2016年于河北科技大学获得学士学位,现为北京航空航天大学硕士研究生,主要从事直线电机控制研究。E-mail: lihongmin@buaa.edu.cn