

摘要：基于永磁直线同步电机数学模型，构建具有三闭环控制结构的永磁直线同步电机伺服控制系统，并采用电压空间矢量控制策略，在 MatLab/Simulink 环境下搭建永磁直线同步电机伺服控制系统整体仿真模型，通过对仿真实验结果的分析，表明了该模型的正确性，为后续高精度永磁直线同步电机控制方法的研究提供了基础模型。

关键词：永磁直线同步电机；数学模型；电压空间矢量控制；仿真模型

中图分类号：TP273 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2018)01-0007-06

收稿日期：2017-09-26

# 永磁直线同步电机矢量控制模型的优化与准确性分析

张栋梁

北京信息科技大学，北京 100192

## 一、引言

直线电机是一种把电能直接转化为直线运动机械能的电磁装置。其中，永磁直线同步电机（Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM）在位置精度、动态性能等方面都优于其它直线电机，目前开始应用于高精度数控机床的直驱进给系统，是一种性能优良的直线伺服电机<sup>[1]</sup>。由于 PMLSM 与负载之间实现了无机械零传动，没有了缓冲环节，当电机运行时，负载的变化，系统内部和外部环境产生的非线性扰动都直接传递至电机本身完全反馈作用于电机系统，使得系统对这些非线性扰动变得十分敏感，进而使系统的控制性能受到严重的影响。

针对电机在运行过程中出现的非线性扰动问题，除了电机本身结构的优化之外，目前主要在控制性能上进行优化，因此需要搭建出一个 PMLSM 的仿真模型，方便进行控制方法的分析与优化，

一般在 MatLab/Simulink 仿真软件中进行直线电机的模型仿真搭建，但此软件并没有提供现有的直线电机模型<sup>[2-4]</sup>。

参考旋转电机的数学模型并结合直线电机的相关特性，首先建立了 PMLSM 的数学模型，构建出 PMLSM 伺服控制系统中三闭环控制结构，并基于电压空间矢量（Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM）的控制策略，详细给出了在 Simulink 环境下 PMLSM 仿真模型的搭建，最后通过对电机矢量控制的仿真实验，验证此模型的准确性。该模型为后续研究高精度的控制算法奠定了基础。

## 二、基于矢量控制的 PMLSM 数学模型

### 1、PMLSM 矢量控制原理

矢量控制的实质是将励磁磁场与转矩解耦，就是通过空间坐标变换，使得交流电机的电枢磁场的方向与励磁磁场的方向在空间上保持正交，同时又能实现对电枢电流的幅值的控制，图 1 给出了电流的空间坐标系转换关系。

由图 1 可知各个坐标

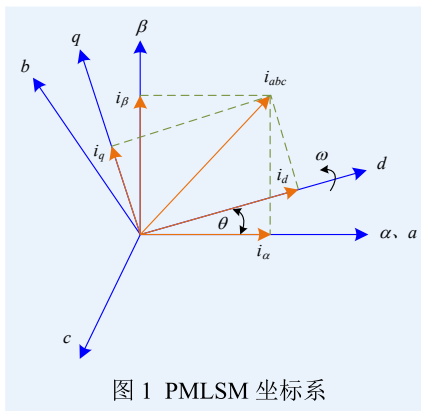


图 1 PMLSM 坐标系

系可以互相变换,  $a$ - $b$ - $c$  坐标系通过 Clarke 变换矩阵变换到  $\alpha$ - $\beta$  坐标系公式为:

$$C_{abc\_ \alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\alpha$ - $\beta$  坐标系通过 Park 变换矩阵变换到  $d$ - $q$  坐标系公式为:

$$C_{\alpha\beta\_dq} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

最终可以得出  $a$ - $b$ - $c$  坐标系到  $d$ - $q$  坐标系的变换, 同时得出  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  与  $i_d$ 、 $i_q$  的变换关系:

$$C_{abc\_dq} = C_{abc\_ \alpha\beta} \cdot C_{\alpha\beta\_dq} = \frac{2}{3} [A_{11} \quad A_{12} \quad A_{13}] \quad (3)$$

$$\text{其中, } \begin{cases} A_{11} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{2} \end{bmatrix}^T \\ A_{12} = \begin{bmatrix} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix}^T \\ A_{13} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix}^T \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} i_d & i_q \end{bmatrix}^T = \frac{2}{3} [A_{11} \quad A_{12} \quad A_{13}] \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

在  $d$ - $q$  坐标系下, 电流可分为推力电流  $i_q$  和励磁电流  $i_d$ , 由上变换矩阵可知, 只有实现对  $i_d$ 、 $i_q$  分别控制, 就可以实现对  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  的瞬时控制, 则可完成电流的解耦控制, 若分别对  $i_q$  和  $i_d$  进行控制, 只要能实现对三相电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  的有效控制, 就可以按照控制指令完成对交流电机的调速<sup>[5]</sup>。

## 2、PMLSM 在 $d$ - $q$ 坐标系下的数学建模

一般为了简化分析可做如下假设<sup>[6]</sup>:

(1) 磁路是线性的, 忽略磁滞、涡流、剩磁和饱和和等效应;

(2) 绕组磁势及气隙磁密是按正弦分布的, 并忽略空间谐波等。

在  $d$ - $q$  坐标系下 PMLSM 的电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega(L_d i_d + \psi_{PM}) \end{cases} \quad (5)$$

磁链平衡方程:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_{PM} \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $u_d$  和  $u_q$  分别为  $d$  轴和  $q$  轴电压;

$i_d$  和  $i_q$  分别为  $d$  轴和  $q$  轴的电流;

$L_d$  和  $L_q$  分别为  $d$  轴和  $q$  轴同步电感系数;

$\psi_d$  和  $\psi_q$  分别为  $d$  轴和  $q$  轴的电枢绕组磁链;

$\psi_{PM}$ —永磁体的有效磁通(在绕组中产生的磁链);

$R_s$ —直线电机的绕组电阻;

$\omega$ —动子电角速度,  $\omega = N_p \omega_r$ ;

$N_p$ —极对数;

$\omega_r$ —机械角速度,  $\omega_r = \pi v / \tau$ ;

$v$ —动子线速度;

$\tau$ —极距。

PMLSM 的输入总功率为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{aligned} P_{\text{all}} &= \frac{3}{2} u_d i_d + \frac{3}{2} u_q i_q \\ &= \frac{3}{2} \left[ (i_d^2 R_s + i_q^2 R_s) + (i_d \frac{\partial \psi_d}{\partial t} + i_q \frac{\partial \psi_q}{\partial t}) + \omega (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \right] \\ &= P_{\text{loss}} + P_{\text{re}} + P_c \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $P_{\text{loss}} = \frac{3}{2} (i_d^2 R_s + i_q^2 R_s)$ —热损耗;

$$P_{\text{re}} = \frac{3}{2} (i_d \frac{\partial \psi_d}{\partial t} + i_q \frac{\partial \psi_q}{\partial t}) \text{—无功功率;}$$

$$P_c = \frac{3}{2} \omega (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \text{—电磁功率。}$$

电磁功率和推力的关系为:

$$P_c = F_e v \quad (8)$$

由于研究对象的气隙均匀, 则直轴的同步电感系数和交轴的同步电感系数相同, 即:  $L_d = L_q$ 。通过式(6)、

(7)、(8) 可得出电磁推力表达式为:

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} N_p \psi_{PM} i_q \quad (9)$$

根据牛顿第二定律得出运动方程为:

$$m \frac{dv}{dt} = F_e - F_L - F_d - f \quad (10)$$

式中,  $m$ —动子质量;

$F_L$ —电机的负载阻力;

$F_d$ —扰动力;

$f$ —摩擦力。

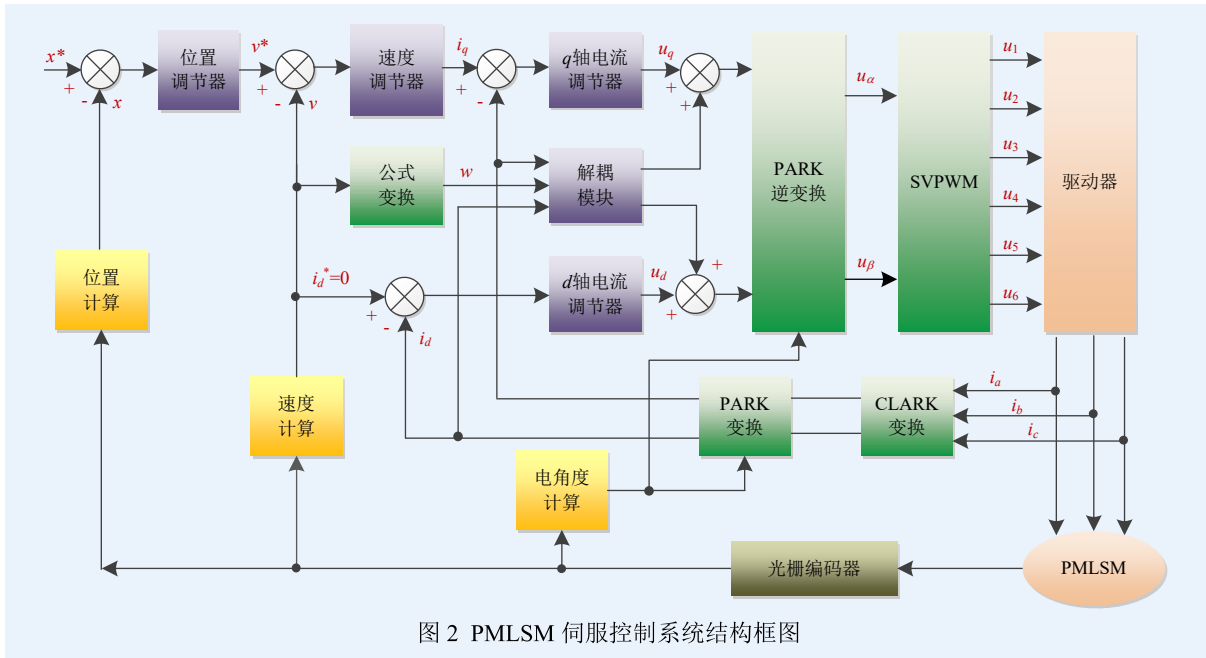


图2 PMLSM 伺服控制系统结构框图

### 三、PMLSM 伺服控制系统仿真模型

#### 1、PMLSM 矢量控制伺服系统结构

PMLSM 矢量控制伺服系统结构框图如图2所示<sup>[8]</sup>。PMLSM 伺服控制系统由电流闭环、速度闭环和位置闭环三环组成，采用空间矢量分析法，将定子电流进行和变换，获得在坐标系下的励磁反馈电流  $i_d^*$  和推力反馈电流  $i_q^*$ ，与给定励磁电流  $i_d$  和推力电流  $i_q$  进行比较，通过  $q$  轴和  $d$  轴电流调节器产生给定励磁电压和转矩电压，再经过逆变换输出至  $\alpha-\beta$  坐标系下的电压，最终决定 SVPWM 波形的输出<sup>[9]</sup>。图中解耦控制模块可消除永磁同步电机  $d-q$  轴电压  $u_d$  和  $u_q$  之间存在的旋转电动势对电流控制产生的影响，进而更准确的实现对  $i_d$ 、 $i_q$  的控制<sup>[11]</sup>。

#### 2、PMLSM 仿真模型

根据  $d-q$  坐标系下 PMLSM 数学模型，在 Simulink 仿真环境下搭建出 PMLSM 的仿真模型。由式（5）和式（6）可以建立电流仿真模块如图3所示，由式

（9）和式（10）可以建立机械运动模块如图4所示。由此，将以上各个模块进行封装连接，得到 PMLSM 的 Simulink 整体仿真模型如图5所示<sup>[10]</sup>。

### 四、矢量控制的仿真实验

构建完毕后，再次对模型进行封装，可以将封装完毕的 PMLSM 仿真模型添加到 Simulink 工具箱中

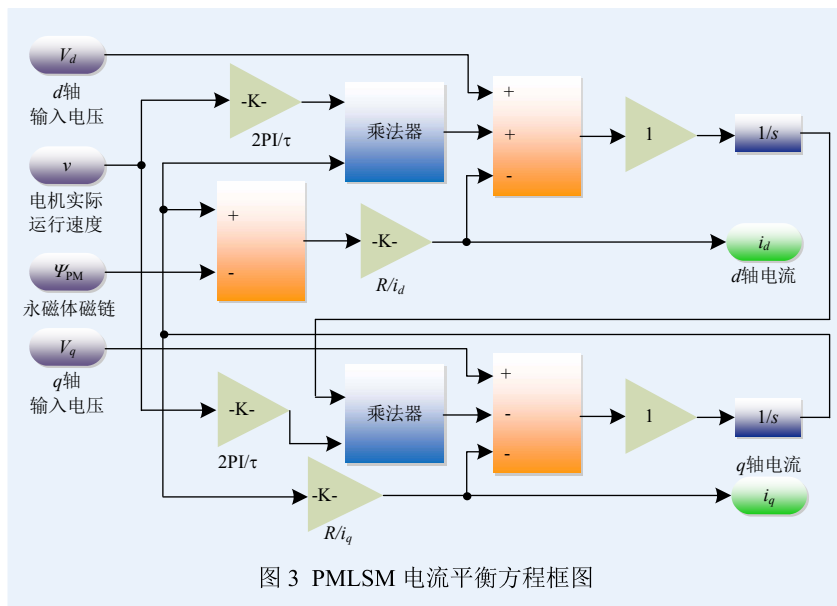


图3 PMLSM 电流平衡方程框图

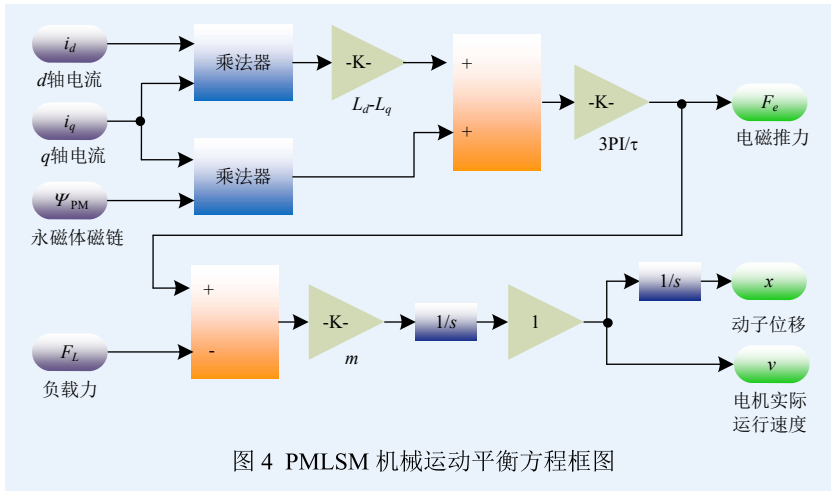


图4 PMLSM 机械运动平衡方程框图

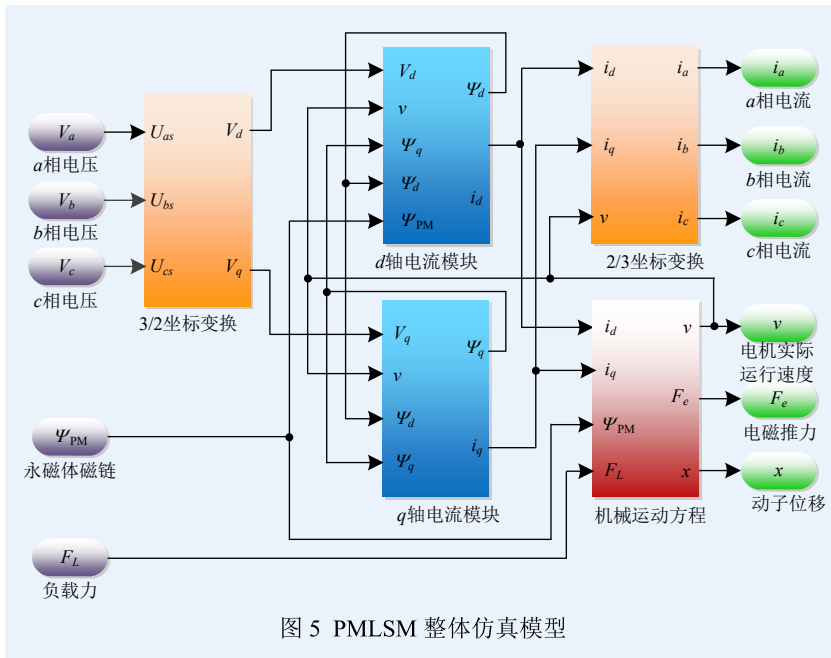


图5 PMLSM 整体仿真模型

作为统一的模块使用。封装后的直线电机模型作为一个独立的模块，可以有效地连接其它电气模块来搭建 PMLSM 伺服系统<sup>[10]</sup>。根据图 2 PMLSM 矢量控制伺服系统结构框图，采用 SVPWM 控制方法搭建 PMLSM 整体伺服控制系统控制部分仿真模块如图 6 所示。

本文采用  $i_d=0$  的磁场定向空间矢量控制策略实现  $i_d$ 、 $i_q$  的解耦控制<sup>[13]</sup>。图 6 中，电流环采用的定子磁场定向控制方式， $q$  轴和  $d$  轴反馈电流通过 PID 电流调节输出两轴控制电压。速度环根据速度误差大小，

使用双闭环速 PID 速度调节，减小速度跟随偏差，最终通过 SVPWM 输出三相脉冲输送至逆变器部分。

本文中电机的参数为：三相电源电压为 110V，转子质量  $m=8.4\text{kg}$ ，转子电枢电阻  $R_s=1.9\Omega$ ， $q$  轴电感  $L_d=11.6\text{mH}$ ，摩擦系数  $Bv=0$ ，永磁体有效磁链  $\Psi_{PM}=0.046\text{Wb}$ ，极距  $\tau=0.021\text{m}$ ，极对数  $N_p=2$ 。电机给定速度  $v^*=0.1\text{m/s}$ ，电机开始运行时加 3N 负载，0.5s 开始变载为 5N，运行此模型得出仿真实验结果。图 7 是直线电机三相电流、电磁推力和速度的仿真曲线<sup>[12]</sup>。

从图 7 速度仿真曲线结果中可以看出，电机在启动和负载突变这两个阶段，系统能很快达到给定的速度值，并且超调量很小，体现出很好的动态性能，从图中电磁推力、速度仿真曲线也可以看出，电磁推力和速度在达到给定值以后曲线很平滑，充分说明系统具有很好的稳态性能。

## 五、结论

本文阐述了矢量控制的基本思想，并基于  $d-q$  两相坐标系下的 PMLSM 数学模型，在 MatLab/Simulink 环境下搭建出 PMLSM 仿真模型，同时采用 SVPWM 矢量控制方式，构建出 PMLSM 整体矢量控制伺服仿真系统模型，通过对电机矢量控制的仿真实验结果的分析，充分说明了采用 SVPWM 矢量控制方式确实得到了很好的控制效果，并验证了该仿真模型的正确性，为后续高精度控制器算法的研究奠定了基础。

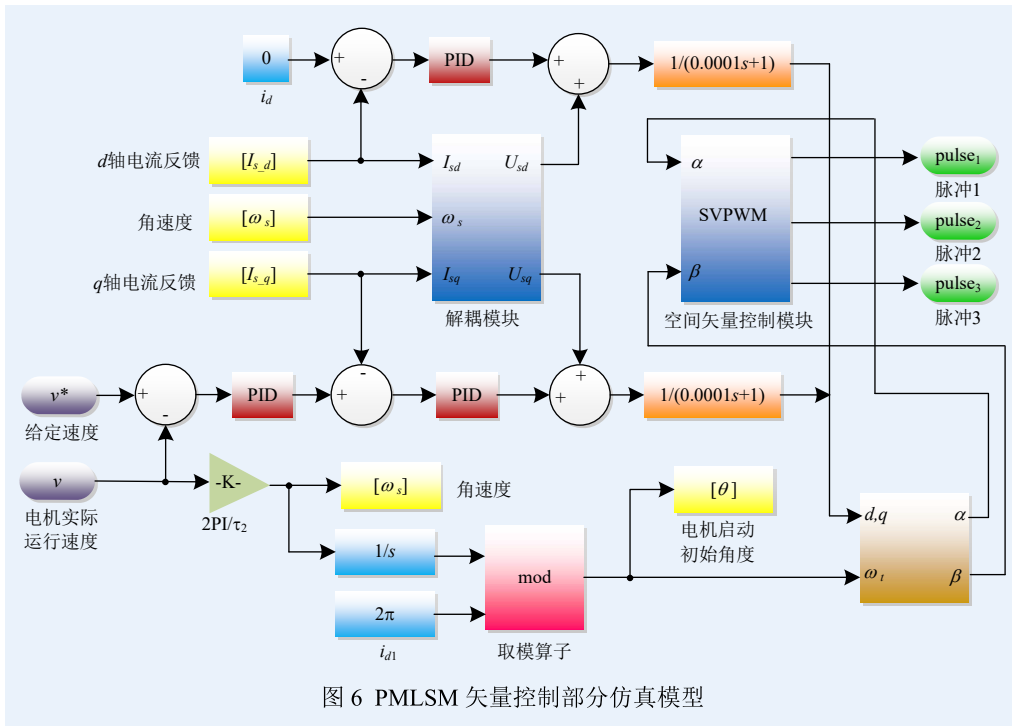


图 6 PMLSM 矢量控制部分仿真模型

[7] 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, 2000.  
 [8] 陈康平. PMLSM 推力波动分析与抑制策略研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2014.  
 [9] 冯进才. 基于矢量控制的永磁同步电机控制系统的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.  
 [10] 朱晓东, 曾庆山, 王茜, 焦留成. PMLSM 矢量控制模型及仿真的研究 [J]. 煤矿机

参考文献

[1] 郭庆鼎, 王成元, 周美文, 等. 直线交流伺服系统的精密控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.  
 [2] 朱晓东, 周勇, 王茜. PMLSM 起动过程的仿真研究 [J]. 煤矿机械, 2006, (06): 961-963.  
 [3] 王春梅, 洪永强, 褚旭阳, 李钜. PMLSM 速度控制系统的研究 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2013, (01): 49-51.  
 [4] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统—运动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.  
 [5] 武轲. PMLSM 的建模及控制方法研究 [D]. 长春: 长春工业大学.  
 [6] 秦平. PMLSM 推力波动的抑制策略研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.

械, 2006, 27(3): 417-419.

[11] L. Zhong, M. F. Rahman, W. Y. Hu, K. W. Lim. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3): 528-536.  
 [12] Jawad Faiz, S.Hossein Mohseni-Zonoozi. A novel technique for estimation and control of stator flux of a salient-pole PMSM in DTC method based on MTPF [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(2): 262-271.  
 [13] M. F. Rahman, L. Zhong, Khiang Wee Lim. A direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive incorporating field weakening [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(6): 1246-1252.

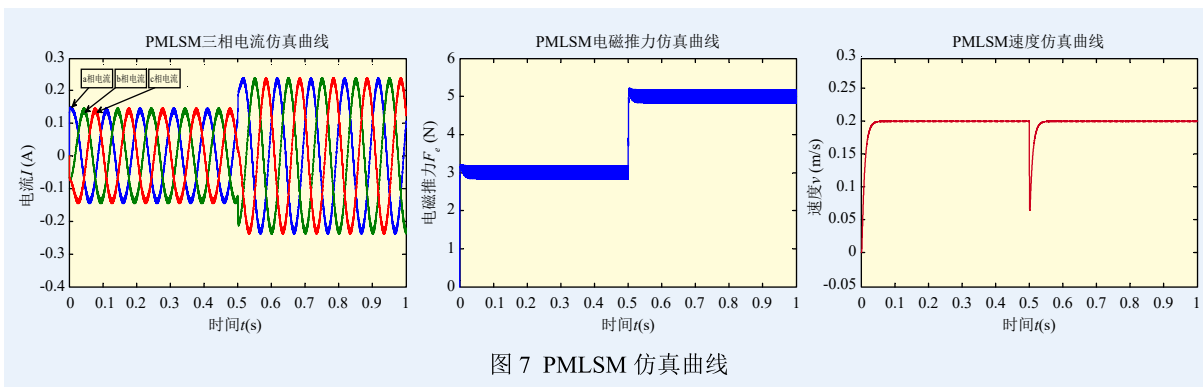


图 7 PMLSM 仿真曲线

**Analysis of optimization and accuracy on vector control model of permanent magnet linear synchronous motor**

ZHANG Dong-liang

*(Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)*

**Abstract:** A servo control system with a three-closed-loop control structure for permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM) is constructed based on the mathematical model of PMLSM. The voltage space vector control strategy is adopted to build a overall simulation model of the servo control system for PMLSM in MatLab/Simulink environment. The results of the experiments are analyzed and proves the correctness of the simulation model which provides a basic model for the subsequent research on the control method of high-precision PMLSM.

**Key words:** permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM); mathematical model; voltage space vector control; simulation model

**作者简介**

张栋梁: 北京信息科技大学, 研究生, 主要研究方向为 PMLSM 的控制方法分析。

通讯地址: 北京信息科技大学小营校区

邮编: 100192

邮箱: 943946255@qq.com