

永磁同步直线电机速度控制系统的研究

王春梅, 洪永强*, 褚旭阳, 李 钜

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 针对永磁同步直线电机, 介绍了其数学模型, 建立了永磁同步直线电机闭环控制系统, 分析了各种控制方法在直线电机控制系统的优缺点. 通过分析比较, 得出永磁同步直线电机调速系统中基于饱和函数的模糊滑模控制系统具有很强的鲁棒性, 可以有效地削弱抖振, 系统动静态性能良好.

关键词: 永磁同步直线电机; 模糊滑模控制; MATLAB 仿真

中图分类号: TM 301.2

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2013)01-0048-05

近年来, 直线电机技术得到越来越多的企业和专家的关注, 其应用场合越来越多. 与旋转电机相比, 直线电机有着显著的优点: 结构简单、反应速度快、灵敏度高、随动性好、密封性好、不怕污染、适应性强、有精密定位和自锁的能力. 但是, 由于直线电机结构本身存在着非线性和不确定性的缺点, 其控制器设计很难达到高精度、快速响应的要求. 本文针对直线电机的这一特点, 设计了基于饱和函数的滑模控制的速度控制系统. 该系统使得永磁同步直线电动机速度跟踪系统具有响应的快速性、鲁棒性和抗干扰性, 基于饱和函数的滑模控制系统应用在永磁同步直线电机中具有很好的动静态特性.

1 永磁直线电机数学模型

本文中永磁直线电机伺服控制系统由速度外环和电流内环构成. 速度外环采用模糊滑模控制, 电流内环采用传统的比例、积分 (PI) 控制器以实现 $i_d = 0$ 的矢量控制. 令 $i_d = 0$, 则永磁直线电机数学模型为^[1]:

电压方程:

$$\begin{aligned} u_d &= L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e \psi_q + Ri_d, \\ u_q &= L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \psi_d + Ri_q. \end{aligned} \quad (1)$$

磁链方程:

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + \psi_f, \\ \psi_q &= L_q i_q. \end{aligned} \quad (2)$$

机械运动方程 (等幅值变换):

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} (\psi_d i_q - \psi_q i_d), \quad (3)$$

$$F_e = M \frac{dv}{dt} + F_f = M \frac{dv}{dt} + F_{\text{load}} + F_{\text{fric}}(\dot{x}) + F_{\text{ripple}}(x), \quad (4)$$

$$k_f i_q = (M + \Delta M) \frac{dv}{dt} + (B + \Delta B)v + F_d. \quad (5)$$

定义广义扰动: $f = \Delta M \frac{dv}{dt} + \Delta Bv + F_d$, 则

$$k_f i_q = \Delta M \frac{dv}{dt} + \Delta Bv + f. \quad (6)$$

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 、 L_d 、 L_q 分别为直、交轴电压、电流及电感, 对直线电机 $L_d = L_q = L$; P 为极对数; R 为电枢电阻; $F_{\text{ripple}} = A_r \sin(\omega x + \varphi) = A_{r1} \sin \omega x + A_{r2} \cos \omega x$ 为纹波推力; $F_{\text{fric}} = [f_c + (f_s - f_c) e^{-\left(\frac{\dot{x}}{\dot{x}_s}\right)^2}] \text{sgn}(\dot{x}) + B\dot{x}$ 为摩擦力; ϕ_f 为定子磁钢在电枢中的耦合磁链; v 为电机速度; M 为动子和负载的质量; B 为黏性摩擦因数; F_e 为电磁推力; F_d 为包括负载阻力、摩擦力和纹波推力; $\omega_e = \omega_r p = \frac{\pi}{\tau p} v p = \frac{\pi}{\tau} v$ 为电角速度.

2 永磁直线电机模型的 MATLAB 仿真实现

根据永磁直线电机的数学模型, 利用 MATLAB 的 Simulink 仿真系统, 就能搭建好相应的直线电机的仿真模型. 其各部分仿真实现如图 1 所示.

3 永磁直线电机控制算法

3.1 比例、积分、微分 (PID) 控制

最常用的 PID 控制运用于各种控制系统中, 利用临

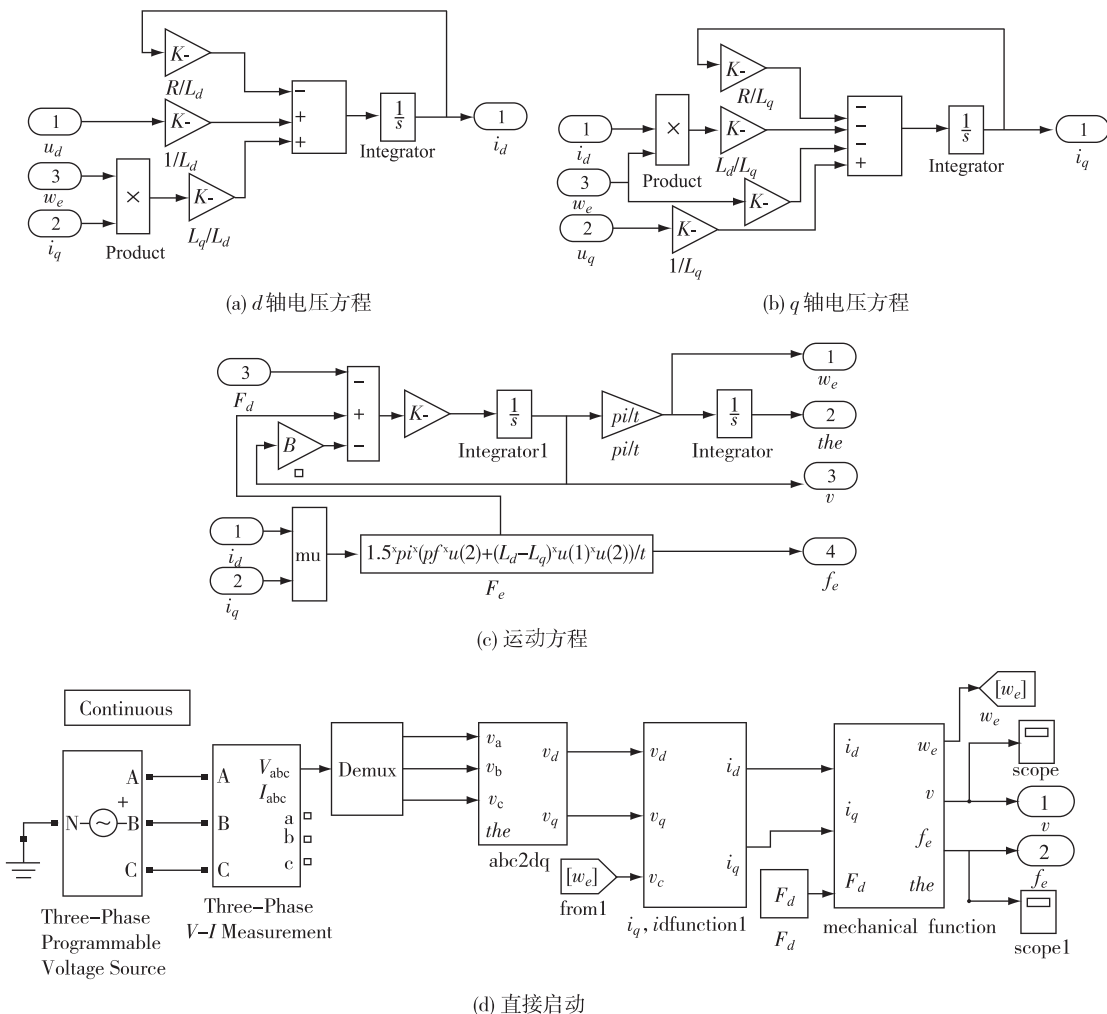


图 1 直线电机仿真模型

Fig. 1 Linear motor simulation model

界比例法进行 PID 控制器参数的整定:1) 预选择一个足够短的采样周期让系统工作;2) 仅加入比例控制环节,直到系统对输入的阶跃响应出现临界振荡,记下这时的比例放大系数和临界振荡周期;3) 在一定的控制度下通过公式计算得到 PID 控制器的参数. 根据这种整定方法,本文选择参数如下: $K_p=200$, $K_i=300$, $K_d=0$.

3.2 永磁直线电机滑模控制

永磁直线电机具有较强的非线性和不确定性,由于没有中间环节的缓冲,控制系统中任意一个参数的变换都会严重影响直线电机控制系统的静态性能和动态性能. 滑模变结构控制适用于非线性系统、确定性与不确定性系统. 这种控制方法通过控制力的切换使系统状态沿着滑模面滑动,且在收到参数摄动和外干扰时具有不变性. 所以本文选择滑模变结构控制方法作为直线电机的控制方法^[2].

本文选取速度跟踪误差作为系统的状态变量

$$e = V^* - V,$$

$$de = \dot{e}, \quad (7)$$

式中, V^* 为参考直线速度; V 为实际直线速度. 可得永磁直线电机系统的误差方程为

$$\dot{e} = ae + bu + df - av^*, \quad (8)$$

其中, $a = -\frac{B}{M}$, $b = -\frac{k_f}{M}$, $d = -\frac{k_f}{M}$, $u = i_q$.

选择滑模面为

$$s = c \int_{-\infty}^t e(t) dt + e = cI_0 + c \int_0^t e(t) dt + e, \quad (9)$$

其中, $I_0 = \int_{-\infty}^0 e(t) dt = -v^*/c$ 为积分初始条件.

采用滑模等效控制法来实现永磁直线电机的滑模控制,则控制量为

$$u = u_{eq} + u_s, \quad (10)$$

u_{eq} 为滑模等效控制部分,即系统在滑模面和所有的不确定部分为 0 时所需要的控制量,也是切换控制的平均值,其表达式为

$$u_{eq} = \frac{1}{b} [av^* - (a+c)e]. \quad (11)$$

直线电机基于饱和函数的模糊滑模控制的 MATLAB 仿真实现如图 4 虚线框所示,饱和函数的实现采用 M 文件实现。

4 不同控制方法的速度响应特性

根据以上各控制系统的仿真,可以得到不同控制

方法的速度响应图(图 5)。

5 不同控制方法的分析

根据直线电机在不同控制算法中的速度响应特性曲线,不难看出:

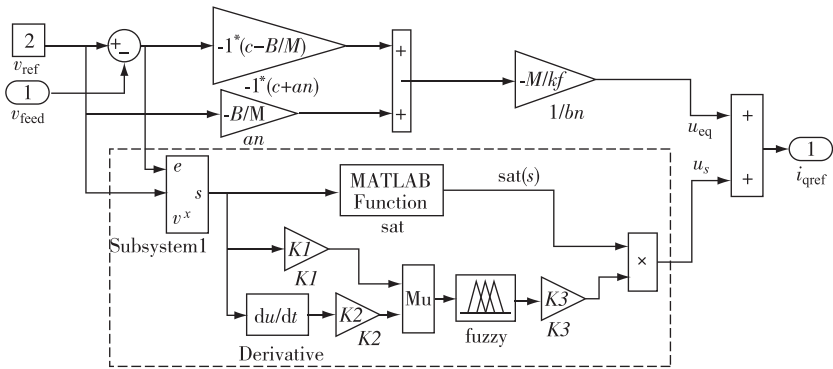


图 4 直线电机模糊滑模控制系统
Fig. 4 Fuzzy sliding mode control system of linear motor

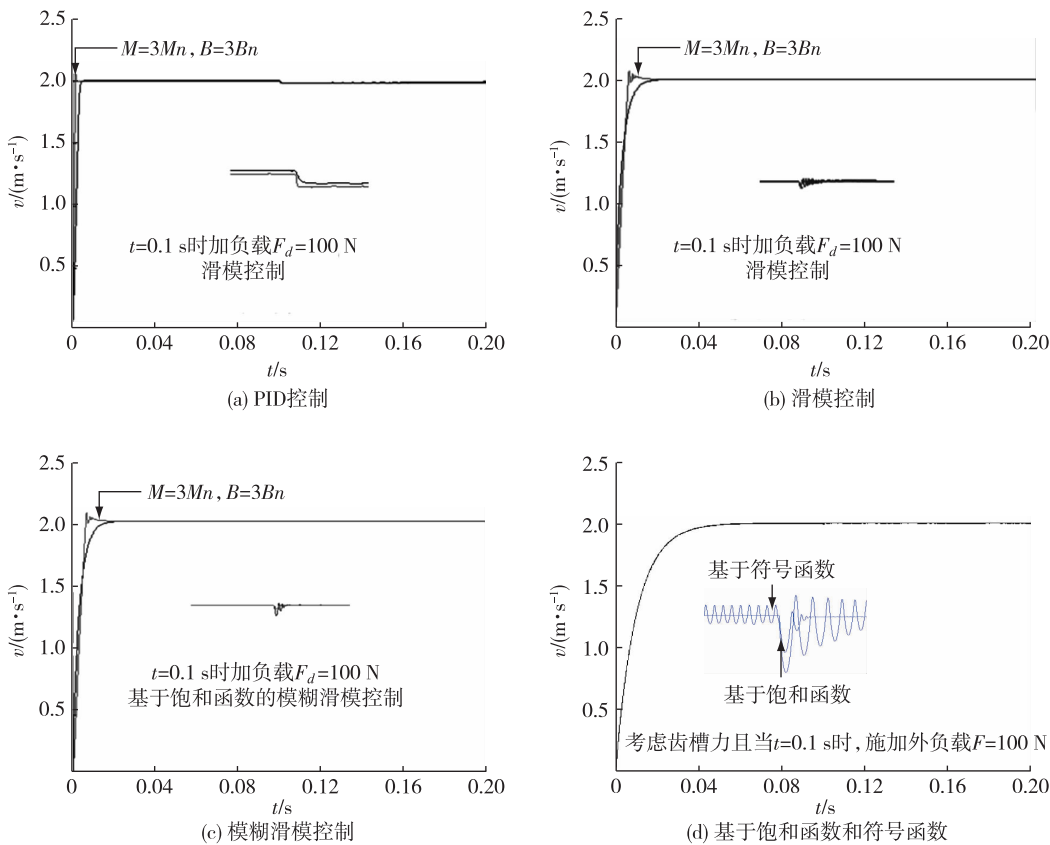


图 5 不同控制算法的速度响应图
Fig. 5 Velocity response chart of different control algorithms

1) 经典 PID 控制, 由于 K_p 、 K_i 、 K_d 参数的数值固定, 即使合理调节、整定这 3 个参数, 还是不能满足永磁直线同步电机伺服系统的要求. 因为永磁直线同步电机直接进给系统具有很强的非线性, 而且系统存在一些不确定性因素, 如负载变化、外部干扰等.

2) 滑模变结构控制能够较快地跟踪速度给定, 不存在超调, 而且对于磁阻力的扰动有较强的适应能力, 对永磁同步直线电机的磁阻力干扰有很强的鲁棒性, 相对于 PID 控制, 速度波动率下降.

3) 模糊滑模控制器通过对滑模切换部分的幅值进行实时调整, 柔化了控制信号, 减轻了常规滑模控制中的抖振现象, 能够达到良好的跟踪性能和抑制抖振的效果.

4) 基于饱和函数的模糊滑模控制器通过对滑模切换部分采用饱和函数 $\text{sat}(s)$ 代替理想滑动模态中的符号函数 $\text{sgn}(s)$, 从仿真结果(图 5)中可以知道模糊滑模控制大大削弱了速度控制系统的抖振现象. 由于抖振现象的削弱, 滑模控制在直线电机系统中的应用将会越来越多, 为生产加工带来不可估量的作用, 其加工精度和加工质量将会明显提高, 为后期机械加工精度的提高奠定了基础.

6 结 论

本文针对永磁同步直线电动机的数学模型, 通过

各种控制方法的仿真, 观察其速度响应特性, 得到了基于饱和函数的模糊滑模控制系统, 系统抖振问题有很大的降低, 速度响应很快. 系统的仿真结果说明了基于饱和函数的模糊滑模控制下的永磁同步直线电动机调速系统具有响应的快速性、鲁棒性和抗干扰性, 模糊滑模控制应用在永磁同步直线电机中具有很好的动静态特性.

参考文献:

- [1] 朱晓东, 程志平, 焦留成. 永磁直线同步电机仿真模型的研究[J]. 矿山机械, 2006, 34(7): 84-87, 5.
- [2] 元航, 刘建华, 赵琛. 表面式永磁同步电动机模糊滑模控制的仿真研究[J]. 电气应用, 2011, 30(16): 32-35.
- [3] 刘超, 安群涛, 张晓光, 等. 滑模控制永磁同步电动机的矢量控制技术[J]. 变频器世界, 2010(4): 61-63, 67.
- [4] 白玉成, 宋莹莹. PMSM 矢量控制策略下的 MATLAB 仿真[J]. 煤矿机械, 2009, 30(10): 53-54.
- [5] 王晓刚, 卓祯雨. 空间矢量脉宽调制技术的仿真研究[J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2007, 6(1): 25-28.
- [6] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

Study of the Control System of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

WANG Chun-mei, HONG Yong-qiang*, CHU Xu-yang, LI Po

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: This article in view of the permanent magnet linear synchronous motor, introduced the mathematical model, established the linear motor closed-loop control system, analyzed the advantages and disadvantages of a variety of control methods in the linear motor control system, through the analysis and comparison. We know that the fuzzy sliding mode speed control system of the permanent magnet synchronous linear motor based on the saturation function has a strong robustness, effectively weakening the chattering, good dynamic and static performance.

Key words: permanent magnet linear synchronous motor; fuzzy sliding mode control; MATLAB simulation