

基于饱和函数的永磁同步直线电机模糊滑模速度控制系统的研究

王春梅^{1,2}, 李 红¹, 张利琼¹

(1. 贵州师范大学 机电工程学院, 贵阳 550014; 2. 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动机, 介绍了其数学模型, 建立了直线电机闭环控制系统, 该控制系统速度环采用基于指数趋近率的模糊滑模控制, 电流环采用传统的 PI 控制。并利用 Matlab 仿真软件建立了基于饱和函数的永磁同步直线电机调速系统模糊滑模控制的仿真模型。仿真结果表明, 模糊滑模控制有效地削弱了抖振, 系统动静态性能良好。

关键词: 永磁同步直线电动机; 模糊滑模控制; Matlab 仿真

中图分类号: TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 - 0794(2012)11 - 0071 - 03

Fuzzy Sliding Mode Speed Control System of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Based on Saturation Function

WANG Chun-mei^{1,2}, LI Hong¹, ZHANG Li-qiong¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550014, China; 2. School of Physic and Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 3610051, China)

Abstract: This article in view of permanent magnet linear synchronous motor, introduced mathematical model, established linear motor closed-loop control system, the control system speed loop adopt fuzzy sliding mode control based on exponential approach law, current loop adopt traditional PI control. And constructed simulation model of fuzzy sliding mode control of permanent magnet linear synchronous motor speed control system based on saturation function by matlab simulation software. The simulation results show that fuzzy sliding mode control is effective to weaken chattering, the system dynamic and static performance is good.

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

1 永磁直线电机数学模型

PMLSM 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 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:

$$\begin{aligned} \text{电压方程 } u_d &= L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e \psi_q + R i_d \\ u_q &= L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \psi_d + R i_q \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{磁链方程 } \psi_d &= L_d i_d - \psi_f \\ \psi_q &= L_q i_q \end{aligned} \quad (2)$$

机械运动方程(等幅值变换)

$$F_c = 1.5 \times \frac{\pi}{\tau} (\psi_d i_q - \psi_q i_d), F_c = M \frac{dv}{dt} + Bv + F_d \quad (3)$$

式中 u_d, u_q, i_d, i_q ——直、交轴电压和电流;

L_d, L_q ——直、交轴电感, 对直线电机 $L_d = L_q = L$;

R ——电枢电阻;

ψ_f ——定子磁钢在电枢中的耦合磁链;

v ——电机速度;

M ——动子和负载的质量;

B ——黏性摩擦因数;

F_c ——电磁推力;

F_d ——负载阻力;

ω_e ——电角速度, $\omega_e = \frac{\pi}{\tau} v$ 。

2 永磁直线电机滑模控制系统的设计

直线电机控制系统具有较强的非线性、干扰性。针对这一特点, 选择模糊滑模控制作为直线电机的速度控制器, 其特点是综合了模糊控制系统的不依赖系统的模型, 抗干扰和参数变化对控制系统影响不大的特点以及滑膜控制鲁棒性的特点。滑模控制中采用最多的趋近律方法是指数趋近律, 指数趋近律能够保证系统在整个运动过程具有很好的运动特性。

选择线性滑模面 $s = ce + e'$, c 值可以采用极点配置法得到。对于连续滑模变结构控制, 常用的趋近律为指数趋近率

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s) - Ks \quad (4)$$

式中 ε, k ——大于 0 的常数。

选取速度跟踪误差作为系统的状态变量

$$e = v^* - v, de = \dot{e} \quad (5)$$

式中 v^* ——参考直线速度;

v ——实际直线速度。

将式(2)、式(3)代入式(5)可得

$$\begin{aligned} \dot{e} &= de = -\dot{v} = -\frac{1}{M}(1.5 \times \frac{\pi}{\tau} \psi_f i_q - Bv - F_d) \\ de &= \ddot{e} = -\ddot{v} = -\frac{1}{M} 1.5 \times \frac{\pi}{\tau} \psi_f \dot{i}_q + \frac{B}{M} \frac{dv}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

设 $\dot{i}_q = u$, 选择 $s = ce + de$ 为线性滑模面, 对 s 求导得

$$s = -\frac{1}{M} \times 1.5 \times \frac{\pi}{\tau} \psi_f i_q + (c + \frac{B}{M} de) \quad (7)$$

将式(4)代入式(7), 化简得到控制参数 u_0 。

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s) - Ks = -\frac{1}{M} \times 1.5 \times \frac{\pi}{\tau} \psi_f \dot{i}_q + (c + \frac{B}{M} de) \quad (8)$$

$$u = \dot{i}_q = -\frac{2M\tau}{3\pi\psi_f} [(c + \frac{B}{M} de) + \varepsilon \text{sgn}(s) + Ks] \quad (9)$$

采用饱和函数 $\text{sat}(s)$ 代替理想滑动模态中的符号函数 $\text{sgn}(s)$, 可以大大削弱速度控制系统的抖振现象

$$u = \dot{i}_q = -\frac{2M\tau}{3\pi\psi_f} [(c - \frac{B}{M} de) + \varepsilon \text{sgn}(s) + Ks] \quad (10)$$

饱和函数

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1, & s > \Delta \\ ks, & |s| \leq \Delta, k = \frac{1}{\Delta} \\ -1, & s < -\Delta \end{cases} \quad (11)$$

将控制变量 u 积分就得到电流环的参考电流 i_q^* 。在指数趋近率中, 系统到达滑模面时的速度为 $s = -\varepsilon$, 参数 ε 是系统克服摄动及外干扰的主要参数。系统的抖振、幅度与 ε 成正比。为了降低控制系统的抖振现象, 采用模糊控制(Fuzzy)对参数 ε 的值进行估计, ε 的值采用模糊控制系统的输出 f 的绝对值代替, 即: $\varepsilon = |f|$ 。

3 永磁筒直线电机模糊滑模控制系统的设计

采用二维模糊控制器, 通过模糊控制规律输出滑模控制量 f, S 及其变化率 \dot{S} 作为模糊控制器的输入, f 作为模糊控制器的输出, 模糊逻辑推理采用 Mamdani 类型, 选用重心法作为去模糊化方法。系统输入输出模糊集定义如下

$$\begin{aligned} S &= \{NB \ NM \ NS \ ZO \ PS \ PM \ PB\} \\ \dot{S} &= \{NB \ NM \ NS \ ZO \ PS \ PM \ PB\} \\ f &= \{NB \ NM \ NS \ ZO \ PS \ PM \ PB\} \end{aligned} \quad (12)$$

模糊控制系统的输入、输出隶属函数如图 1 所示。

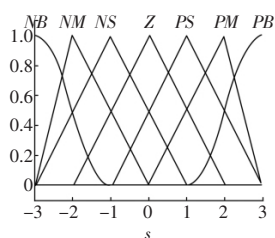


图 1 模糊系统的输入输出隶属函数

在力图满足不等式 $S\dot{S} < 0$ 的条件下设计 f , 所获得的控制规则如表 1 所示, 使用的模糊规则是: if (s is A) and (\dot{S} is B) then (f is C)。模糊滑模控制表见表 1。

表 1 模糊滑模控制表

$s \backslash \dot{S}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO

基于指数趋近率(符号函数)的永磁直线电机模糊滑模控制结构框图如图 3 所示。采用饱和函数代替符号函数的模糊滑模控制结构框图如图 4 所示。

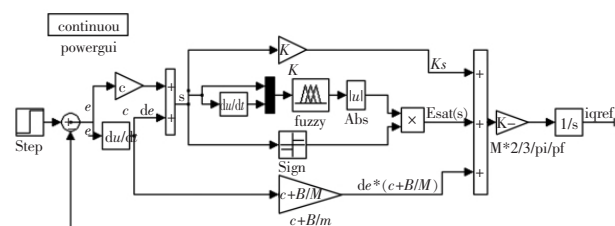


图 3 基于指数趋近率(符号函数)的模糊滑模控制结构框图

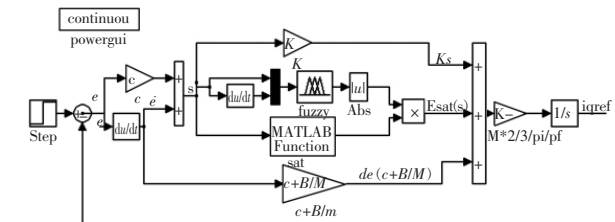


图 4 基于指数趋近率(饱和函数)的模糊滑模控制结构框图
4 永磁筒直线电机模糊滑模控制系统仿真

利用 Matlab/Simulink 仿真软件, 建立永磁同步直线电动机速度模糊滑模控制系统的仿真模型, 该系统电流环采用 PI 控制矢量控制, 选取永磁同步直线电动机参数为: 电阻 $R = 18.7 \Omega$; 电感 $L_d = L_q = 0.02682 \text{ H}$; 永磁磁通 $\phi_f = 0.1717 \text{ Wb}$; 极对数 $p = 3$; $\tau = 0.032 \text{ m}$; 负载质量 $M = 11 \text{ kg}$; 黏滞系数 $B = 0.01 \text{ Nms}$ 。 $c = 600$; $k = 10$, 此处, 速度给定为 1 m/s , 负载转矩 $F_d = 2 \text{ N}$, 图 5 和图 6 分别为基于饱和函数的滑模控制和基于符号函数的模糊滑模控制在干扰下的永磁同步直线电机的速度图, 可以看出采用基于饱和函数的模糊滑模控制系统速度波形抖振明显减小。

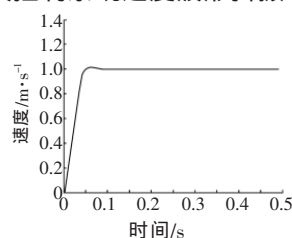


图 5 基于饱和函数的滑模模糊控制速度图

基于磁流体往复运动的智能密封

汤松萍

(萍乡高等专科学校, 江西 萍乡 337055)

摘要:对磁流体往复运动智能密封的一般规律进行了概述, 得出了往复运动与旋转轴转动时的磁流体密封条件不同, 往复运动的临界压差依赖于往复运动的振幅与速度, 往复运动的机械携带和磁流体密封变形引起密封失效的结论, 并给出典型实例, 以完善超小直径轴类往复运动的磁流体密封工艺。

关键词: 往复运动; 磁流体; 智能密封

中图分类号: TM154.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 - 0794(2012)11 - 0073 - 03

Reciprocating Motion of Magnetic Fluid Based Smart Seal

TANG Song-ping

(Pingxiang College, Pingxiang 337055, China)

Abstract: The general law of reciprocating motion of magnetic fluid intelligence sealed overview, drawn reciprocating motion with rotation axis of rotation of magnetic fluid sealing conditions, the reciprocating motion of critical pressure difference depends on amplitude and speed of reciprocating motion of reciprocating movement of machinery to carry and magnetic fluid seal deformation caused by seal failure of conclusions, and gives a typical example, rich in ultra-small diameter shaft reciprocating motion of magnetic fluid sealing technology.

Key words: reciprocating motion; magnetic fluid; smart seal

1 磁流体的特性

磁流体或称之为磁性流体,是由 0.1~100 nm 磁微粒、分散剂与载体融合而成的具有特殊功能的胶体。磁流体特点:(1)在磁场作用下,磁化强度随外加磁场的增加而增加直至饱和,当外磁场撤除后又无磁滞现象且磁场对磁流体作用力表现为体积力;(2)具有小尺寸、量子尺寸、表面和宏观量子隧道效应。

2 磁流体密封的特性

磁流体是动态密封的理想材料。磁流体技术目前仍是国内外尖端纳米技术之一。磁流体密封装置的组成是:无磁性座、永磁铁、导磁轴、磁极、磁流体。当磁流体注入磁场间隙则可充满整个间隙,并形成一系列“液态 O 形密封圈”以达到密封效果。磁流体动态密封几乎无泄漏($<10\sim 11\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$),真空密封时的真空度可达 10^{-5}Pa ,性能好、可靠性好。由于磁流体钕铁硼材料磁损 $<5\%$ (100 a),因而近似无机机械磨损,机械传输效率高达 99%,功率近似无损失。

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特性。验证了模糊化控制系统可以很好地应用于非线性系统。

参考文献:

- [1]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.
- [2]方思琛,周波,黄佳佳,等.滑模控制永磁同步电机同步电动机调速系统[J].电工技术学报,2008,23(8):29-34.
- [3]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.
- [4]李渊,何凤有,余跃,等.永磁同步电动机模糊滑模控制系统的研究[J].微电机,2010,43(4):58-60.
- [5]刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [6]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(6):32-35.

作者简介:王春梅(1981-),重庆垫江人,讲师,在读博士,2011年在厦大从事电机控制的学习,发表论文 10 余篇。

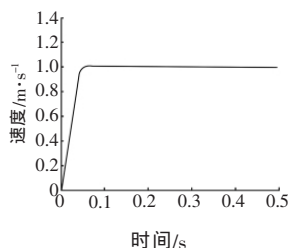


图 6 滑模模糊控制在干扰下的速度图

在 0.3 s 时外负载从 0 突变为 20 N,可以看出该控制算法有很好的抗干扰性,其鲁棒性很好。

5 结语

针对永磁同步直线电动机,速度控制系统采用指数趋近率的滑模控制趋近律,利用模糊控制实时控制系统的滑模速度,并且采用饱和函数代替指数趋近律的符号函数,系统抖振问题有很大降低,速度响应很快。该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

责任编辑:卢盛春 收稿日期:2012-05-23