

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.02.018

# 永磁直线伺服系统模糊PI速度控制器研究\*

杨自龙, 叶云岳, 卢琴芬\*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对永磁直线同步电机伺服系统常规PI速度调节器动态响应慢、输出超调大等问题,提出了模糊自适应PI速度控制器,对比常规PI速度控制器进行了仿真和实验。基于永磁直线同步电机矢量速度闭环控制,分析了模糊PI速度控制器和基于模糊PI控制器的伺服矢量控制系统的结构,设计了模糊PI速度控制器,在Matlab/Simulink仿真环境下,建立了基于模糊PI速度控制器的永磁直线同步电机伺服系统仿真模型,并通过实际永磁同步直线电机伺服系统实验对仿真结果进行了实验验证。研究表明,模糊PI速度控制器,相对于常规PI控制器,可以明显降低超调量和调节时间。将仿真结果和试验结果对比,两者基本吻合,说明模糊PI速度控制确实可以较好地改善永磁直线同步电机伺服系统的动态性能。

**关键词:** 永磁直线同步电机; 伺服系统; 模糊PI; 速度控制

中图分类号: TH39; TP24 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)02-0213-04

## Fuzzy-PI speed controller for PMLSM servo system

YANG Zi-long, YE Yun-yue, LU Qin-fen

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at improving slow dynamic response and large output overshoot of conventional PI speed controller for permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) servo system, fuzzy adaptive PI speed controller was proposed and simulation and experiments were carried out compared with conventional PI controller. Based on PMLSM vector speed loop control, structure of fuzzy PI speed controller and PMLSM servo system based on fuzzy PI speed controller was analyzed. Fuzzy PI speed controller was designed, and simulation model was established in Matlab/Simulink environment. The simulation results were verified through actual PMLSM servo system experiments. The results indicate that fuzzy PI speed controller can reduce overshooting and setting time efficiently in comparison with conventional PI controller. The experiment results were similar to the simulation results, which showed fuzzy PI speed controller can improve dynamic performance of PMLSM servo system.

**Key words:** permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM); servo system; fuzzy-PI; speed control

## 0 引 言

近年来,在数控机床上所采用的直线伺服系统,由于取消了传统的从旋转电机到工作台之间的一切机械传动环节,极大地提高了进给系统的快速反应能力和运动精度,具有高速、高精和“零传动”特性,近年来在加工中心、数控铣床、车床、激光切割机床等高档数控机床中得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。上世纪90年代以

来,随着机械制造技术的发展、电力电子和控制技术的进步以及高性能永磁材料的出现,以钕铁硼为磁材的永磁直线同步电机(PMLSM)成为一种高速、高精、高效驱动方式中最具竞争力的发展方向<sup>[4-6]</sup>。永磁直线同步电机是应用最广泛的一种直线电机,具有功率密度大、效率高、控制精度高等优点。因此直线伺服系统中,永磁直线同步电机伺服系统是目前应用最为广泛。在直线伺服系统中,速度控制是非常重要的环节,其控制效果对整个伺服系统性能有很大的影响,

收稿日期: 2013-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077158)

作者简介: 杨自龙(1988-),男,山东临沂人,主要从事永磁直线电机驱动控制方面的研究。E-mail: xkeykyo@126.com

通信联系人: 卢琴芬,女,教授,博士生导师。E-mail: luqinfen@yahoo.com.cn

而常规PI控制器,由于采用固定参数,其并不能对所有运行状态具有较好的调节效果,从而使伺服系统的动态性能受到较大的限制。

本研究设计的模糊PI速度控制器,结合常规PID控制策略和模糊控制策略。模糊控制具有优异的动态调节性能,且不需要建立被控对象的数学模型,具有较好的鲁棒性,只是存在稳态精度不高的缺点。笔者将模糊控制特点与传统PI调节的静态无差相结合,并将其应用于永磁直线同步电机伺服系统矢量控制速度环调节。本研究详细介绍模糊PI速度控制器的设计过程,并通过Matlab/Simulink仿真以及实际实验进行验证,仿真结果和实验结果均表明,模糊PI速度控制器相对于常规PI控制器能获得更好的动态特性和鲁棒性。

### 1 永磁直线同步电机伺服系统速度控制构架

速度控制是永磁直线同步电机伺服系统中的一个重要环节,应该具有高精度、快响应等特性。当速度调节器采用常规PI调节器时,一般不引入微分控制环节的原因是微分对扰动具有放大作用,根据永磁直线同步电机运动方程,经过拉普拉斯变换可得:

$$v(s) = \frac{1}{(m + m_0)s} [F_{em} - F_l - Bv(s)] \quad (1)$$

采用比例积分控制,则有:

$$F_{em} = (K_p + \frac{K_i}{s}) \Delta v \quad (2)$$

本研究所设计的模糊PI速度控制器基于常规PI控制器,通过实时在线调节常规PI控制器的参数来实现变PI控制。本研究永磁直线同步电机的控制方案为  $i_d=0$  速度闭环矢量控制,其系统框图如图1所示,主要包括位置速度电流等检测计算模块、坐标变换、SVPWM计算、模糊PI速度控制器、电流控制器以及电机本体等部分。

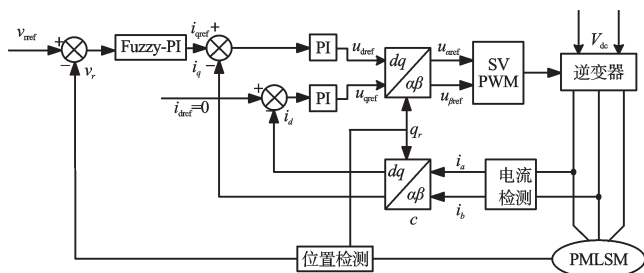


图1 速度闭环矢量控制框图

图1中,速度控制器采用模糊PI控制器,而电流控制器采用常规PI控制器,PI参数设计按照动态跟随性

能指标设计,PWM调制算法采用前述的SVPWM算法。系统的运行控制过程如下:电机运行到某任意时刻时,由光栅尺得到的位置信号可计算出电机当前的运行速度  $v_r$ ,与速度给定  $v_{ref}$  比较后给入速度调节器,其输出作为  $q$  轴电流给定  $i_{qref}$ ,而  $d$  轴给定  $i_{dref}$  设为零,通过电流传感器测得的电流值经过坐标变换得到实际对应的  $dq$  轴电流  $i_d$  和  $i_q$ ,然后将其与  $dq$  轴给定电流比较,并经过电流调节器,再经 Park 逆变换和 SVPWM 模块,即可产生控制逆变器动作的控制信号,从而控制电机的运转。

### 2 模糊PI速度控制器设计

为了使永磁直线同步电机伺服控制系统获得更好的动、静态特性,结合模糊控制和PID控制,本研究设计了参数可自整定的参数自适应模糊PI速度控制器,简称其为模糊PI速度控制器。其结构图如图2所示,系统给定速度为  $v_{ref}$ ,实际测得的速度为  $v$ ,模糊PI速度控制器以速度偏差  $e$  和  $ec$  作为输入,经模糊化后得到模糊输入变量  $E$  和  $EC$ ,经模糊推理和解模糊后可得输出变量  $\Delta K_p$  和  $\Delta K_i$ ,输出变量与PI调节器参数初始预设值  $K_{p0}$  和  $K_{i0}$  分别相加,即可得模糊PI速度调节器的参数  $K_p$  和  $K_i$ ,可表示为:

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p \quad (3)$$

$$K_i = K_{i0} + \Delta K_i \quad (4)$$

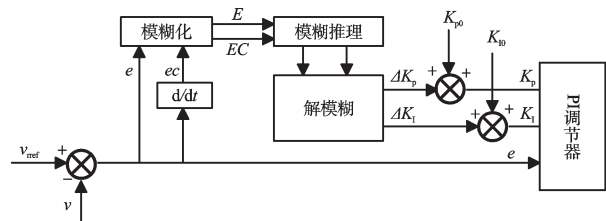


图2 模糊PI控制器结构框图

#### 2.1 模糊化

要设计模糊PI速度调节器,首先要对变量进行模糊化。模糊输入变量  $E$  和  $EC$  与输出变量  $\Delta K_p$  和  $\Delta K_i$  的模糊集合均为  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ , 分别依次对应  $\{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大\}$ , 输入和输出变量的论域均设为  $[-3,3]$ 。设速度偏差  $e$  的基本论域为  $[-em, em]$ , 偏差变化率  $ec$  的基本论域为  $[ecm, ecm]$ , 由于和模糊输入和输出的论域不同,需要将  $e$  和  $ec$  的基本论域转化到  $[-3,3]$ ,  $e$  和  $ec$  的量化因子分别选则为  $3/em$  和  $3/ecm$ , 即可完成论域转化。

输入变量  $E$ 、 $EC$  和输出变量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  的隶属度函数分别如图3所示,考虑到可实现性,本研究均采用最常见的三角形函数。

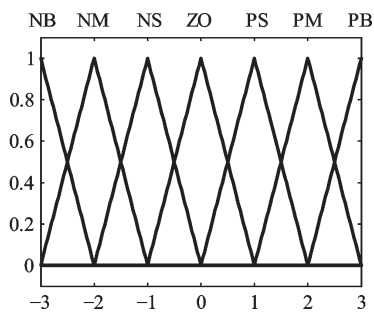


图3 输入和输出变量的隶属度函数

## 2.2 模糊规则制定原则

通过前述对传统数字PID调节器分析可知,PI调节器参数 $K_p$ 和 $K_i$ 对整个控制系统的动静态特性影响很大,结合前人长期的工程经验积累,并结合模糊速度PI控制器实际工作原理,建立模糊控制下的校正模型如下:

(1) 根据实际控制过程操作经验,在系统运行初期,适当地提高比例系数 $K_p$ 可以提高系统响应速度。在调节中期,应适当减小比例系数 $K_p$ 的值,以保证稳定性和调节精度。在调节后期,应将 $K_p$ 调整到较大值<sup>[7]</sup>。

(2) 考虑到初期较为容易产生积分饱和的现象,这是对系统控制非常不利的,为了避免该现象,在调节初期,积分作用应减弱一些,在调节中期为了保证系统的稳定性,应适当提高积分系数 $K_i$ 。而在调节后期,应将高积分系数 $K_i$ 适当再提高,以保证减小调节静差。

(3) 当偏差 $e$ 数值较大,且此时偏差变化率 $ec$ 符号与偏差符号一致,说明此时被控量正在逐渐远离给定值,为了加快系统响应速度,增强调节效果,应当增大比例系数 $K_p$ ,即增大 $\Delta K_p$ ,同时为了避免出现积分饱和现象,应尽可能降低积分系数 $K_i$ ,此时应使 $\Delta K_i$ 为负向较大。

(4) 当偏差 $e$ 和偏差变化率 $ec$ 符号相异时,说明被控量正逐步靠近给定值,此时应适当减小比例系数,即使 $\Delta K_p$ 负向增大,以防止出现较大超调。当系统偏差数值较小时,为减小系统静差,要使 $\Delta K_i$ 正向增大,即增大积分系数,以减小系统静差。同时,为保证系统具有较好的带载能力,应选择合适的比例系数。

根据以上PI参数调整规则,再结合模糊控制器有两个输入,且每个输入量有7个状态等级,则模糊规则分别对应输入共有49条。

## 2.3 模糊推理和解模糊

模糊推理模型采用Mamdani模糊模型,此时,模糊推理的模糊规则一般形式为:

$$\text{if } E = A_i \text{ and } EC = B_j$$

$$\text{then } \Delta K_p = C_{ij} \quad \Delta K_i = D_{ij}$$

式中: $A_i, B_j, C_{ij}, D_{ij}$ —其论域上的语言集<sup>[8-9]</sup>。

最后,模糊PI速度控制器设计的最后一部分是解模糊,本研究解模糊的方法采用面积重心法<sup>[10]</sup>,也称加权平均法,如下式所示:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n U_i C_i}{\sum_{i=1}^n U_i} \quad (5)$$

式中: $C_i$ —第 $i$ 条规则的中心点, $U_i$ —第 $i$ 条规则对应的隶属度。

当然,解模糊后得到的 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 论域为 $[-3,3]$ ,要选择合适的输出量化因子,以和常规PI调节器参数预设值相符。

## 3 仿真与实验

为验证永磁直线同步电机控制系统中采用模糊PI速度控制器的效果,本研究分别根据前文所述的设计方法搭建了仿真模型以及实际永磁同步直线电机伺服平台,仿真和实际实验平台所采用平板式永磁直线同步电机参数如表1所示。

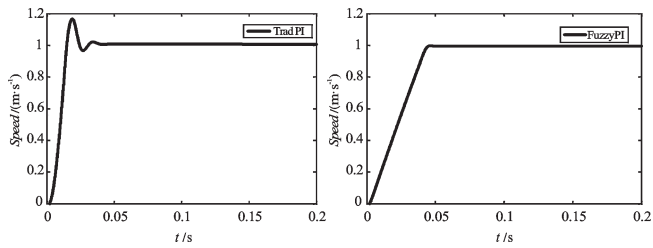
表1 永磁直线同步电机参数

参数/单位	数值
定子电枢电阻/ $\Omega$	2.7
绕组 $d$ 轴电感/mH	46.1
绕组 $q$ 轴电感/mH	46.1
永磁体磁链/Wb	0.107
定子质量/kg	12.8
粘滞摩擦系/ $(N \cdot m \cdot s^{-1})$	0.2
极距/mm	23

### 3.1 Simulink 建模仿真分析

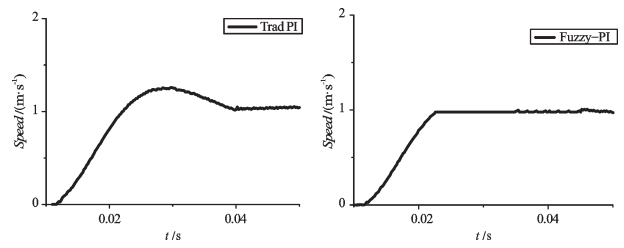
本研究在Matlab/Simulink环境下建立了相应的模型,并对其进行仿真对比。模糊逻辑控制器按照前述方法设计,选取合适的量化输入输出因子,建立模糊PI速度调节器。在速度闭环矢量控制系统下,同时对速度控制器为常规PI控制器仿真系统的速度响应。

给入速度阶跃信号,系统采样时间 $T=0.1$  s,无负载,常规PI调节器PI参数分别设为 $K_p=1, K_i=10$ ,分别对其进行仿真,可得仿真结果如图4所示,其中基于常规PI控制器速度仿真响应如图4(a)所示,基于模糊PI速度控制器速度仿真响应如图4(b)所示。从仿真结果可得,对比基于常规PI速度控制器仿真结果,基于模糊PI速度控制器的速度响应超调量明显降低,且响应速度更快,从而使永磁直线同步电机伺服系统的动态性能得到明显提升。



(a) 传统PI控制器 (b) Fuzzy PID控制器

图4 常规PI和模糊PI速度控制器仿真结果



(a) 常规PI (b) 模糊PI

图6 实验速度响应结果

### 3.2 实验验证分析

实验所用永磁直线同步电机伺服系统平台如图5所示,包括控制电路、驱动电路、平板式永磁直线同步电机和相关测试工具等。其中,主控器采用DSP+CPLD作为基础处理构架,运用专用软件进行编程实验。

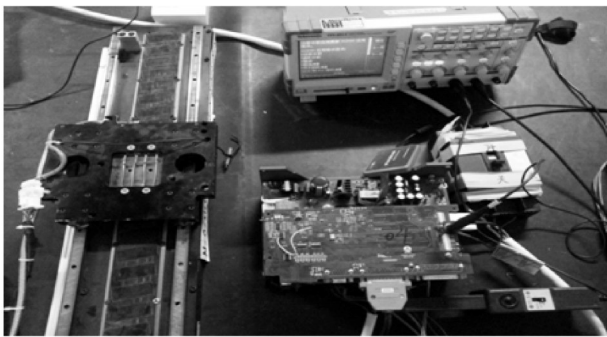


图5 PMLSM伺服系统实验平台

在速度环调试中,笔者引入模糊PI速度控制器替代原来的常规PI控制器,分别在常规PI控制器和模糊PI控制器下进行试验,速度给定也设为1 m/s,得到实际速度响应结果如图6所示,其中常规PI速度控制器试验结果如图6(a)所示,模糊PI速度控制器试验结果如图6(b)所示,对实验结果分析可得,引入模糊PI速度控制器相对于常规PI速度控制器,永磁直线同步电机伺服系统的速度响应性能得到较好提升,动态响应更为迅速,超调降低,而且稳态性能也得到提升。试验结果充分验证了前述Simulink仿真结果。

## 4 结束语

本研究提出了基于永磁直线同步电机伺服控制

系统的模糊PI速度控制器,仿真和实验结果表明,模糊PI速度控制器可有效降低速度响应的超调量和调节时间,实现伺服系统的动态性能的提升,同时使系统速度调节参数具有自适应性。

在下一阶段的实际应用推广时,还可以根据运行情况适当修改模糊规则或者继续细分输入量的论域等级,从而取得更优异的控制效果。

### 参考文献(References):

- [1] 叶云岳. 直线电机原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 李绪成. 直线电机在数控机床中的应用及发展趋势[J]. 世界制造技术与装备市场,2005(6):71-74.
- [3] 吴南星,孙庆鸿. 直线电机与高速精密数控机床进给系统的研究[J]. 制造业自动化,2003,25(10):46-48.
- [4] 邓英剑. 直线电机及其在高速机床中的应用[J]. 机械设计与制造,2004(4):42-43.
- [5] 张宏韬,冯同建,曹洪涛,等. 高速机床的关键技术和发展趋势[J]. 机械制造,2006,44(3):12-14.
- [6] MCLEAN G W. Review of recent progress in linear motors [J]. *Electric Power Applications, IEE Proceedings B*, 1988,135(6):380-416.
- [7] 诸 静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,1995:315-404.
- [8] WANG S,LIU Y. A modified PI-like fuzzy logic controller for switched reluctance motor drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011,58(5):1812-1825.
- [9] 欧方明. 基于模糊控制的三通阀控缸系统仿真[J]. 兵工自动化,2012,31(4):86-89,92.
- [10] MALKI H A,LI H,CHEN G. New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control systems [J]. *IEE Trans. Fuzzy Systems*, 1994,2(4):245-254.

[编辑:洪炜娜]

#### 本文引用格式:

杨自龙,叶云岳,卢琴芬. 永磁直线伺服系统模糊PI速度控制器研究[J]. 机电工程,2014,31(2):213-216.  
 YANG Zi-long, YE Yun-yue, LU Qin-fen. Fuzzy-PI speed controller for PMLSM servo system [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014,31(2):213-216.  
 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>