

# 永磁同步电机模糊 PID 控制的建模与仿真

## Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Fuzzy PID Control

南京航空航天大学机电学院 于水乐 高霖

[摘要] 提出了参数自整定模糊 PID 控制算法,提高渐进成形机床中永磁同步电机速度控制精度,解决了超调和快速性的矛盾,提高驱动器的适应性,也在一定程度上提高了系统的鲁棒性和稳定性。通过 simulink 模块对整个系统建立仿真模型,并得到无超调快速响应的速度波形。

关键词: 永磁同步电机 模糊 PID 控制 PID 参数整定

[ABSTRACT] A PID control system is proposed based on parameter self-tuning fuzzy technology to improve the control accuracy of the PMSM of incremental forming machine. By the new system the conflict between velocity overshoot and fast is resolved and the adaptability, robustness and stability of the system are all improved. The simulation model of the system is constructed by the simulink module in Matlab software package to gain the speed curve which have no overshoot.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor Fuzzy PID control PID parameters tuning

### 1 PMSM 的数学模型

准确的确定控制对象模型是提高被控制系统控制性能的重要保证,在忽略谐波饱和和电机涡流和磁滞损耗,采用矢量控制对永磁同步电机(PMSM)进行控制。PMSM 控制系统数学模型可由下式表示:

$$P \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & p_m \omega_m & 0 \\ -p_m \omega_m & -\frac{R}{L} & -\frac{p_m \psi_f}{L} \\ 0 & p_m \psi_f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U_d}{L} \\ \frac{U_q}{L} \\ -\frac{T_m}{J} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中,  $U_d$ 、 $U_q$  为直、交轴电压;  $R$  为定子绕组的内阻;  $L$  为直轴和交轴的等效电感;  $P_m$  为三相永磁同步电

机极对数;  $\omega_m$  为电机机械角速度;  $T_m$  为负载转矩;  $J$  为电机和负载的总转动惯量;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为直轴和交轴的等效电流;  $p$  为微分算子  $\frac{d}{dt}$ ;  $\psi_f$  为转子磁链。忽略粘滞阻尼系数  $B^{[1]}$ 。

由上式可以看出,永磁同步电机是一个多变量控制系统。 $i_d$  和  $i_q$  具有耦合关系。因此,  $i_d$ 、 $i_q$ 、 $\omega_m$  不能独立地调整。这使系统不能线性化控制。采用  $i_d=0$  控制,解决了这一难题。

### 2 模糊 PID 控制系统设计

PID 控制通过消除在工业目标和实际行为之间的误差  $e(k)$  达到控制目的,其实现方便、控制可靠;模糊控制具有较好的自适应能力,对非线性系统具有很好的控制效果。离散的 PID 控制规律<sup>[2]</sup>如下:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + K_d [e(k) - e(k-1)], \quad (2)$$

由式(2)可以看出, PID 控制器由比例  $K_p$ 、积分  $K_i$ 、微分  $K_d$  3 个参数组成。它们不能实时地调整,使 PID 控制器在非线性和参数时变性模型的控制目标应用中受到一定的限制。参数自整定模糊 PID 控制器正好解决了这一缺点实现了 PID 控制器 3 个参数( $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ )的在线调整。

参数自整定模糊 PID 控制器以误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  作为输入,经模糊控制器进行分析后得到 3 个参数( $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ )相应的变化量( $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ )。

则实际控制参数为:

$$\begin{aligned} K'_p &= K_p + \Delta K_p; \\ K'_i &= K_i + \Delta K_i; \\ K'_d &= K_d + \Delta K_d. \end{aligned}$$

#### 2.1 隶属函数和控制规则的确定

在模糊设计中,偏差变量  $e$ 、偏差变化率变量  $e_c$  以及控制量( $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ )所取的模糊论域分别为:  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , 模糊控制量可以表示为 { 负大 (NB), 负中 (NM), 负小 (NS), 中 (ZO), 正小 (PS), 正中 (PM), 正大 (PB) }。隶属函数如图 1 所示。

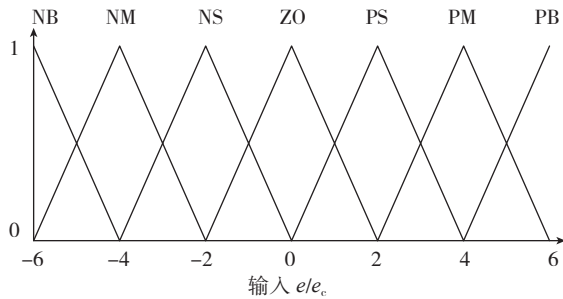


图1 隶属函数

Fig.1 Membership function

$K_p$  的增大使控制器对偏差的分辨率增高,可以加快系统响应的速度,提高调节精度。如果过大将会产生超调,使系统失稳。如果太小则响应慢,控制精度也受到影响。

$K_i$  可以消除静态误差。 $K_i$  增大,消除静态误差的时间减小。过大将会由于积分饱和而引起较大的超调,过小将无法消除稳态误差,控制精度受到一定的限制

$K_d$  对偏差的变化方向进行提前的预报,过大将会使控制器过分提前作用,影响调节速度和抗干扰性<sup>[2]</sup>。

根据上述参数调试规则和相关专家的支持以及不断的试验结果,本文给出模糊控制规则,如表 1 所示。

## 2.2 模糊控制量化因子的确定

表1 控制规则

$e$ $e_c$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NS/PS	PM/NB/ZO	ZO/ZO/ZO	PS/NM/ZO	PS/ZO/PB	ZO/ZO/ZO
NM	PB/NB/NS	PB/NS/NS	PM/NM/NS	ZO/PS/NS	PS/NS/ZO	ZO/ZO/NS	ZO/ZO/ZO
NS	PM/NM/NB	PM/NS/NB	PM/NS/NM	ZO/PM/NS	ZO/ZO/ZO	NS/ZO/PS	NM/PS/PM
ZO	PM/NM/NB	PS/ZO/NM	PS/NS/NM	ZO/PM/NS	NM/PS/ZO	NM/ZO/PS	NM/PM/PM
PS	PS/NS/NB	PS/ZO/NM	ZO/ZO/NS	NS/PM/NS	NS/PM/ZO	NM/PS/PS	NM/PM/PS
PM	ZO/ZO/NM	ZO/PS/NS	NS/PS/NS	NM/PB/NS	NM/PM/ZO	NM/PM/PS	NB/PB/PS
PB	ZO/ZO/PS	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PB/ZO	NB/PB/ZO	NB/PM/PB	NB/PB/PB

模糊控制是通过每隔采样周期时间采样电机速度输出信号,把该数字量和系统内部给定值进行比较就可以得到此时的偏差  $e$ 。2 次偏差除去时间就得到偏差变化率  $e_c$ 。在模糊运算中需要对 2 个精确量转变成对应模糊子集的模糊量,量化因子 ( $K_e$ 、 $K_{ec}$ ) 的引入实现了基本论域到模糊论域的转换。同理为将模糊量进行清晰化实现精确控制,我们引进比例因子  $K_j$  ( $K_j$  包含  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  3 个输出参数的比例因子)。

$K_e$  增大,调节时间减小,上升时间短。但是过大会使系统产生超调,调节速率减慢,系统工作不稳定。

$K_{ec}$  增大,调节速度缓慢; $K_{ec}$  减小,上升速率快。 $K_{ec}$

过小也将引起较大的超调,使调节缓慢。模糊控制中完全消除稳态误差和误差变化率是不可能的。

$K_e$  增大,稳态误差将减小; $K_{ec}$  增大,稳态误差变化率也将变小。所以两者同时对系统的动态性能有影响,他们又相互联系。必须同时兼顾两方面的性能进行合理取值。

$K_j$  相当于一般系统中的比例增益, $K_j$  增大,系统响应速度加快,但是过大将会引起超调,影响系统工作的稳定性。但是, $K_j$  对系统的稳态误差没有影响。

$K_e$  = 模糊子集论域范围值 / 基本论域范围值(精确值);

$K_{ec}$  = 模糊子集论域范围值 / 基本论域范围值(精确值);

$K_j$  = 基本论域范围值(精确值) / 模糊子集论域范围值。

$K_e$ 、 $K_{ec}$ 、 $K_j$  量化论域为  $[-6,6]$ ,它们的基本论域根据实际情况各有不同。在不断的试验和调整中确定出较为合适的参数<sup>[3]</sup>。

## 3 仿真结果分析

系统仿真参数如下:

额定转矩:7.7Nm; 额定速度:2000r/m, 额定功率:1.6kW, 转子转动惯量:0.00158kg·m<sup>2</sup>; 机械时间常数:2.44Ms; 内阻值  $R_s=0.9585\Omega$ 。

$K_e=0.01$ ,  $K_{ec}=0.934$ ,  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  3 个输出参数的比例因子分别为  $K_{jp}=0.0011$ ,  $K_{ji}=0.849$ ,  $K_{jd}=0.000025$ ; 3 个输出参数  $K_p=0.02$ ,  $K_i=1.54$ ,  $K_d=0.00005$ 。

当速度为 800r/m 时,分别采用模糊 PID 和 PID 控制器进行仿真比较,得到不同的仿真速度波形。

### 3.1 模糊 PID 控制器的仿真模型

模糊控制器通过目标和实际行为之间的偏差和偏差变化率分别对 PID 的 3 个参数进行实时控制,其仿真模

型如图 2 所示,并通过 Matlab/Simulation 软件进行了仿真。

### 3.2 模糊控与 PID 控制的仿真转速波形

从图 3 可以看出模糊 PID 控制器较快地达到稳定状态且超量很小,速度波形平稳;PID 控制器达到稳定值的时间过长,并出现明显超调。

### 3.3 模糊控制与 PID 控制突加载后的转速波形

如图 4 所示,在  $t=0.05s$  时间加载 1Nm,观察 2 种控制器作用下的速度波形变化。可以看出模糊 PID 比 PID 控制速度波形下降小,并且在较快的时间内回升到稳定状态。模糊 PID 控制提升了 PID 控制的自适应能力,达到了良好的控制效果。

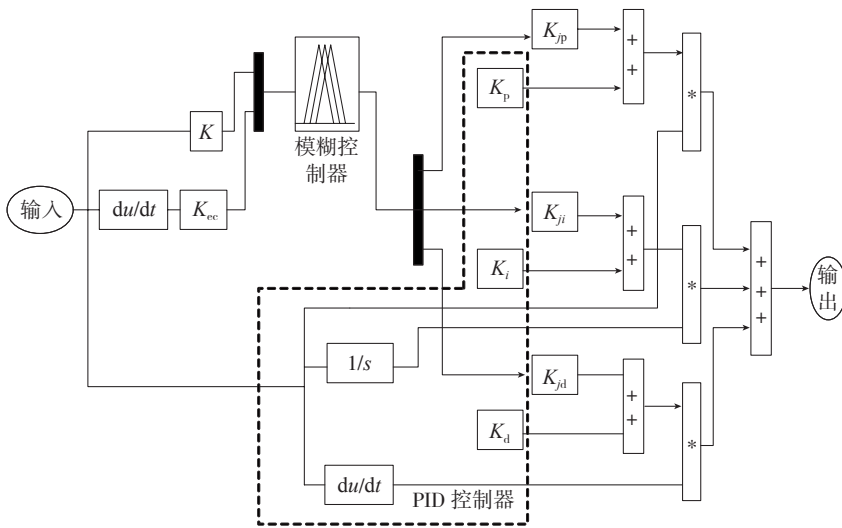


图2 模糊PID控制器  
Fig.2 Fuzzy PID controller

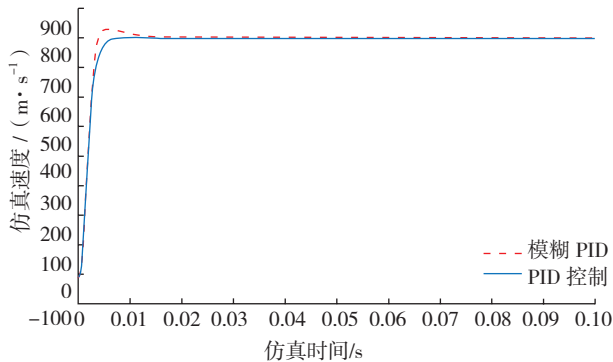


图3 空载时速度比较波形  
Fig.3 Speed wave without load

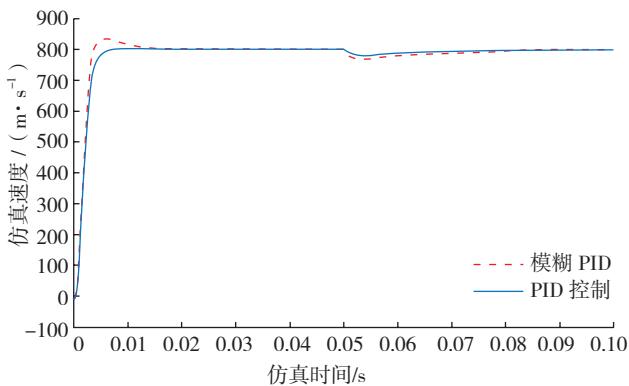


图4 突加负载时速度比较波形  
Fig.4 Speed wave with sudden load at 0.05s

#### 4 结论

模糊PID控制器解决了PID控制快速和超调相互矛盾的问题,并且设计简单,容易实现,适用于非线性系统和复杂时变系统。速度调节在整个控制系统中占主导地位,要求能够准确地跟踪目标速度指令。在实际控制过程中,永磁同步电机很容易受到外界的干扰,模型

参数也会因为温度的变化而产生相应的变化,这就要求速度控制器在负载扰动和控制对象参数变化的情况下具有一定的自适应能力。从仿真结果看出,模糊PID控制器对永磁同步电机可达到较好的控制效果。

#### 参考文献

[1] 何杰,王家军. 基于SVPWM的永磁同步电机系统建模与仿真. 机电工程, 2009, 26(7):77-82.  
[2] 李宁,陈桂. 运动控制系统. 北京: 高等教育出版社, 2004.  
[3] 冯东青, 谢宋. 模糊智能控制. 北京: 化工工业出版社, 1998:83-95.

(责编 夏宛)

(上接第91页)

(1) 加工方式: 车削; 旋转椭球面:  $a=120\text{mm}$ ,  $b=130\text{mm}$ ; 加工凹面的加工范围:  $0\sim 25\text{mm}$ 。

(2) 输入自动编程软件的参数。

①形状参数:  $a=120$ ,  $b=130$ ,  $z_0=0$ ,  $x_0=0$ , 加工非球面内侧 (Inside);

②工艺参数: 刀具半径 ToolRadius=1mm, 进给速度 FeedRate=5mm/min, 初始步长 Step=0.01mm, 主轴转速 MotorSpeed=600r/min, 加工范围:  $0\sim 25\text{mm}$  (沿  $x$  轴方向), 插补方式: 直线插补。

(3) 补偿前后的误差曲线(使用轮廓仪检测)如图4所示,对比可以看出,综合误差提高了  $1\mu\text{m}$ 。

#### 4 结论

面形控制是一个反复迭代的闭环控制过程,其输入量是实测面形与标准面形之间的偏差,输出量是面形控制执行器的控制驱动信号与实时面形信息。在实际的车削加工中,确定合适的工艺参数,根据面形偏差实时计算去除函数,并通过合理的工艺控制以及计算机数控算法,进行误差补偿,可以有效减小光学元件的面形误差。

#### 参考文献

[1] 庞长涛. 非球面超精密加工在线检测及误差补偿技术研究[D]. 北京: 北京航空精密机械研究所, 2005.  
[2] 庞长涛, 张建明, 罗松保, 等. 非球面超精密加工自动编程技术研究. 制造技术与机床, 2005(12):57-60.  
[3] Pollicove H M, Fess E M, Schoen J M. Deterministic manufacturing processes for precision optical surface. SPIE, 2003, 5078:90-96.  
[4] 康桂文, 张飞虎. 磁流变抛光光学表面加工面形控制技术. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(5):77-79. (责编 深蓝)