

# 基于模糊自适应PID控制的SRD研究

钟坤炎, 易灵芝

(湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 分析开关磁阻电动机驱动系统(SRD)的结构与总体控制方案; 分析开关磁阻电动机非线性数学模型; 分析模糊自适应PID控制的原理。在Matlab/Simulink中建立基于模糊自适应PID控制的SRD动态仿真模型, 仿真结果证明: 基于模糊自适应PID控制的SRD能明显减小转速超调和转矩脉动, 提高系统鲁棒性, 得到更好的动态性能。

**关键词:** 模糊自适应; PID; SRD; 仿真

**中图分类号:** TM352

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2008)05-0028-04

## Research on SRD Based on Fuzzy Adaptive PID Control

Zhong Kunyan, Yi Lingzhi

(School of Information Engineering Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China)

**Abstract:** The structure and the overall control programme of Switched Reluctance Drive(SRD), and the nonlinear mathematical model of Switched Reluctance Motor(SRM) as well as the principle of fuzzy adaptive PID control are analyzed. It establishes the dynamic simulation model of SRD based on fuzzy adaptive PID control in Matlab/Simulink. The simulation results verify that the SRD based on fuzzy adaptive PID control can reduce speed overshoot and torque ripple obviously, improve the robustness of the system, and get better dynamic performance.

**Key words:** fuzzy adaptive; PID; SRD; simulation

## 0 引言

开关磁阻电机驱动系统(Switched Reluctance Drive, 简称SRD)是20世纪80年代迅猛发展起来的一种新型调速电机驱动系统。开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, 简称SRM)结构简单坚固, 具有可控参数多、损耗小、效率高、起动电流小、起动转矩大等优点, 因而SRD具有调速范围宽、调速性能好, 系统的可靠性高等特点<sup>[1]</sup>。

SRD是一个多变量、强耦合的非线性系统。在不同的控制方式下, 其参数和结构都是变化的。利用模糊控制可以克服SRD的变参数、变结构和非线性等因素, 从而提高整个控制系统的鲁棒性。本文利用模糊

控制理论, 建立模糊自整定PID控制器对SRM进行控制。SRM采用电流斩波进行调速, 与常规PID控制相比, 模糊PID控制能对参数进行自整定, 在模糊规则控制下, 明显减小转速超调和转矩脉动<sup>[2]</sup>, 快速适应系统动态变化, 提高系统稳定性, 得到更好的动态性能。

## 1 SRD结构与总体控制方案

SRD主要由SRM、功率变换器、控制器、位置检测器等部分组成。

SRM是SRD中实现机电能量转换的部件, 也是SRD有别于其它电机系统的主要标志; 功率变换器向

收稿日期: 2008-08-25

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(08JJ6029)

作者简介: 钟坤炎(1983-), 男, 湖南湘潭人, 湘潭大学硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动;

易灵芝(1966-), 女, 湖南宁乡人, 湘潭大学教授, 主要从事交流调速与电力电子装置方面的教学与研究。

SRM 提供运转所需的能量, 由蓄电池或交流电整流后得到直流电供电; 控制器是调速系统的中枢, 它综合处理速度指令、速度反馈信号以及电流传感器、位置传感器的反馈信息, 控制功率变换器中主开关器件的工作状态, 实现对 SRM 运行状态的控制; 位置检测器是 SRM 能够运行的必要条件, 控制器必须借助于从位置传感器获得的转子位置信息, 以保证输出正确的控制信号。

SRD 总体控制方案框图如图 1 所示。

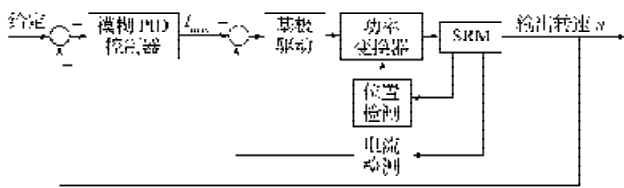


图 1 SRD 总体控制方案框图

Fig. 1 Diagram of SRD's the overall control programme

SRM 采用电流斩波控制 (CCC) 方案, 即: 给定转速与反馈转速  $n$  的偏差, 经模糊 PID 控制器输出电流斩波限  $I_{max}$ ,  $I_{min}$  与相电流求差后控制功率变换器主开关器件的导通与关断, 从而控制输出转速。CCC 方式是直接对电流实施控制, 通过适当误差带的设置可以获得较为精确的控制效果, CCC 方式同样具有简单直接、可控性好的特点, 是较为常用的控制方式。

## 2 SRD 仿真模型建立

### 2.1 SRM 非线性数学模型

根据电路定律可以写出 SRM 一相的电压平衡方程

$$V_K = Ri_K + \frac{d\psi_K(\theta, i_K)}{dt}$$

式中:  $V_K$  为绕组两端电压;

$R$  为相电阻;

$i_K$  为第  $K$  相绕组电流;

$\psi_K(\theta, i_K)$  为相绕组磁链, 可表示为:

$$\psi_K(\theta, i_K) = L_K(\theta, i_K) \cdot i_K$$

$$\text{机械运动方程为: } \begin{cases} T_c = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} + T_L \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases}$$

式中:  $J$  为转动惯量;

$f$  为摩擦系数;

$\omega$  为角速度。

具有饱和非线性磁路 SRM 的相电感  $L(i, \theta)$  由傅里叶级数近似逼近<sup>[3]</sup>, 即:

$$L_k(\theta, i_k) = L_0(i) - L_1(i) \cos(N_r \theta + \pi)$$

式中:  $N_r$  为转子级数;

$L_0(i)$  和  $L_1(i)$  可由下式确定:

$$\begin{cases} L_0(i) = \frac{L_{\max}(i) + L_{\min}(i)}{2} \\ L_1(i) = \frac{L_{\max}(i) - L_{\min}(i)}{2} \end{cases}$$

式中:  $L_{\max}(i)$  为 SRM 定、转子凸极中心对齐时相绕组电感值;

$L_{\min}(i)$  为定子凸极中心与转子凹槽中心重合时相绕组电感值。

$L_{\min}(i)$  可认为保持不变,  $L_{\max}(i)$  可用多项式级数来

近似表达, 即  $L_{\max}(i) = \sum_{n=0}^N a_n i^n$ 。此时在非线性感模型

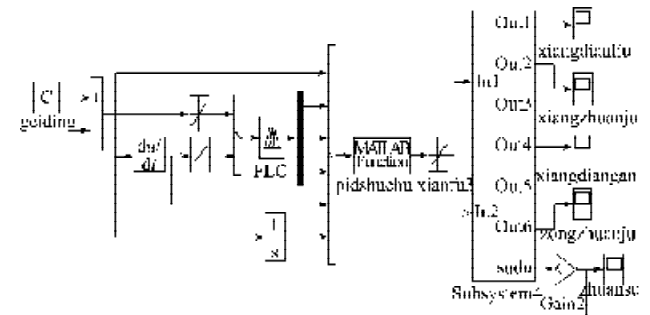
下, SRM 相绕组产生的电磁转矩为:

$$T_k = \frac{N_r i_k^2}{4} \left[ \left( \sum_{n=0}^N \frac{2a_n}{n+2} i^n - L_{\min} \right) \sin(N_r \theta - \pi) \right]$$

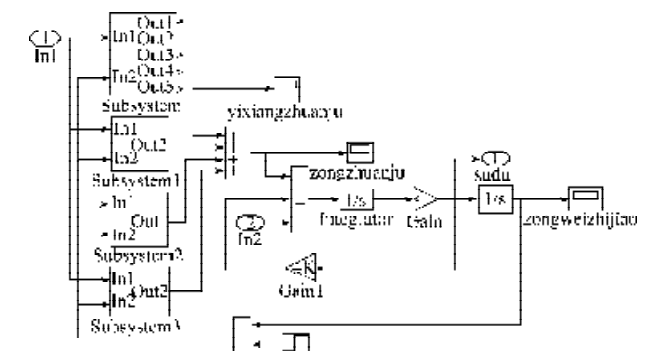
总电磁转矩为:  $T_e = \sum_{k=1}^4 T_k$ 。

### 2.2 SRD 仿真模型

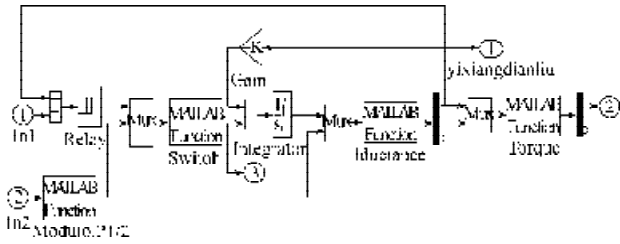
分析上述 SRM 非线性数学模型, 在 Matlab/Simulink 环境下建立四相 8/6 极 SRD 的整体仿真模型。SRM 采用电流斩波控制方式, 如图 2 所示。图 2 中 a) 是整体仿真模型。通过模糊 PID 调节, 反馈转速跟踪给定转速。b) 是 SRM 四相内部结构图。SRM 各相转矩求和得总转矩, 其与电动状态下产生的负转矩求和后积分产生速度, 速度积分产生位置信号。位置信号供各相参考。c) 是 SRM 一相仿真模块。参考电流  $I_{n1}$  与相电流比较, 差值通过 Relay 滞环产生控制主开关器件通断的控制信号  $\theta$ , 结合位置信号实现对 SRM 电流斩波控制。



a) SRD 整体仿真模型



b) SRM 四相内部结构图



c) SRM一相仿真模块

图2 SRD仿真图

Fig. 2 Simulation chart of SRD

由SRM非线性模型公式可编写M函数, 导出各输出参数。其中Switch为逻辑换相模块, Inductance为电感计算模块, Torque为转矩计算模块。

### 3 模糊控制策略

模糊控制系统是一种采用计算机控制技术构成的一种具有闭环结构的数字控制系统。模糊逻辑控制的过程主要有3个步骤: 模糊化过程, 模糊逻辑推理, 反模糊化计算<sup>[4]</sup>。

常规模糊控制器如图3所示。图中E, DE, U分别为误差e, 误差变化率de, 控制量u的模糊集。

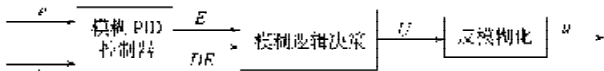


图3 常规模糊控制器

Fig. 3 Conventional fuzzy controller

本文采用模糊自适应PID控制, 其结构如图4所示。

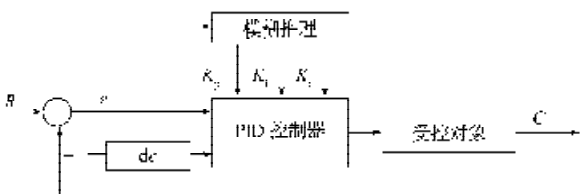


图4 模糊自适应PID控制系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of fuzzy adaptive PID control system

模糊自适应PID控制以误差e和误差变化率de作为输入, 可以满足不同时刻误差e和误差变化率de对PID参数自整定的要求。利用模糊控制规则, 对PID参数进行在线修改来控制受控对象就构成了模糊自适应PID控制系统。当模糊PID控制器在每个采样时刻获得了系统响应后, 就可以根据此时刻系统响应偏离给定的情况及变化趋势, 运用模糊控制方法, 适当加大控制力度或减小控制力度(或提前增加阻尼), 以控制响应朝偏离给定的方向变化, 使输出尽快趋于给定。

PID参数自适应的实现思想是找出PID控制器3个参数及误差e和变化率de之间的模糊关系, 即二输入三输出结构, 然后利用模糊规则进行模糊推理和参数调整<sup>[5]</sup>。

将系统误差e和误差变化率de变化范围定义为模糊集上的论域。模糊子集E, DE={NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 输出模糊子集Kp, Ki, Kd={NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。

本文中, E、DE和输出量Kp, Ki, Kd对应的模糊子集均为7档, 即{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 其中NB=负大, NM=负中, NS=负小, ZO=零, PS=正小, PM=正中, PB=正大, 其论域均为{-7, -6, ..., 0, +1, ..., 6, 7}<sup>[6]</sup>。15个量化等级对7档模糊子集的隶属函数如图5所示, 模糊控制规则如表1~3所示。

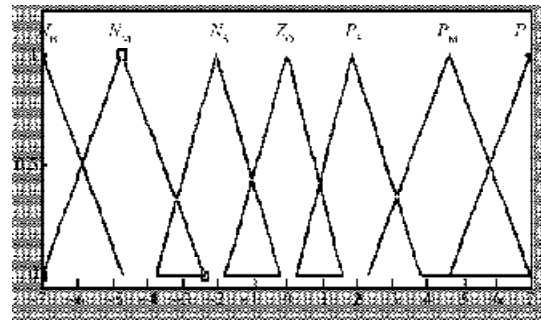


图5 模糊子集的隶属度函数

Fig. 5 Membership function of the fuzzy subset

表1 Kp模糊规则

Table 1 Fuzzy rules of Kp

de	e						
	N <sub>B</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>B</sub>
N <sub>B</sub>	P <sub>B</sub>	P <sub>B</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>
N <sub>M</sub>	P <sub>B</sub>	P <sub>B</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	N <sub>S</sub>
N <sub>S</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>S</sub>
Z <sub>O</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>M</sub>
P <sub>S</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>M</sub>
P <sub>M</sub>	P <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>B</sub>
P <sub>B</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>B</sub>	N <sub>B</sub>

表2 Ki模糊规则

Table 2 Fuzzy rules of Ki

de	e						
	N <sub>B</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>B</sub>
N <sub>B</sub>	N <sub>B</sub>	N <sub>B</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>
N <sub>M</sub>	N <sub>B</sub>	N <sub>B</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>
N <sub>S</sub>	N <sub>B</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>S</sub>
Z <sub>O</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>M</sub>
P <sub>S</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>B</sub>
P <sub>M</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>B</sub>	P <sub>B</sub>
P <sub>B</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>B</sub>	P <sub>B</sub>

表3 Kd模糊规则

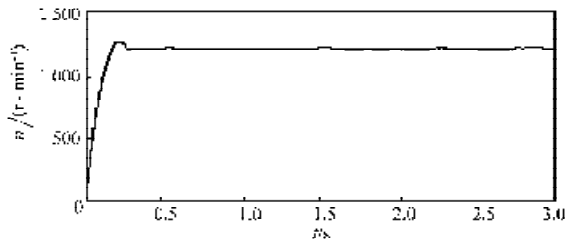
Table 3 Fuzzy rules of Kd

de	e						
	N <sub>B</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>B</sub>
N <sub>B</sub>	P <sub>S</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>B</sub>	N <sub>B</sub>	N <sub>B</sub>	N <sub>M</sub>	P <sub>S</sub>
N <sub>M</sub>	P <sub>S</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>B</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>
N <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>
Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>
P <sub>S</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>	Z <sub>O</sub>
P <sub>M</sub>	P <sub>B</sub>	N <sub>S</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>B</sub>
P <sub>B</sub>	P <sub>B</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>M</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>S</sub>	P <sub>B</sub>

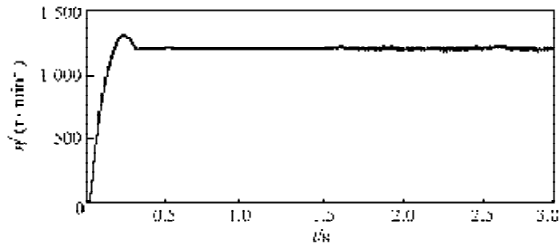
根据得到的  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  值, 由PID算法计算出电流PWM控制信号参数, 输出量用来控制开关磁阻电机<sup>[7]</sup>。

### 4 仿真结果分析

SRM参数为: 四相8/6SRM, 额定转速为1 500 r/min, 额定功率为750 W, 绕组电阻  $R=0.15 \Omega$ ,  $L_{max}=110 \text{ mH}$ ,  $L_{min}=10 \text{ mH}$ ; 直流电压  $U_s=260 \text{ V}$ , 转矩惯量  $J=0.0015 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ , 摩擦系数  $F=0.0183$ 。给定转速  $n_g=1\ 200 \text{ r/min}$ , 空载起动,  $t=1.5 \text{ s}$  时, 突加负载转矩  $T_l=3 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 仿真结果如图6、7所示。



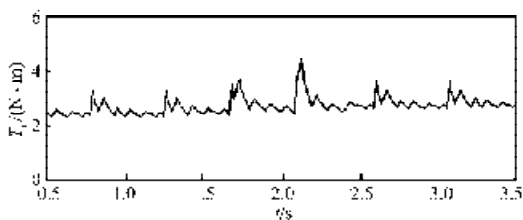
a) 模糊自适应PID控制



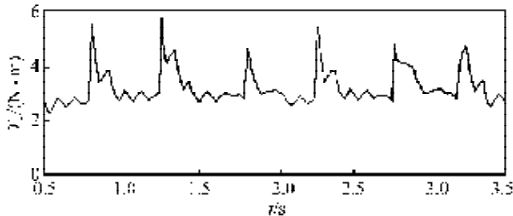
b) 常规PID控制

图6 SRD转速波形

Fig. 6 Speed waveform of SRD



a) 模糊自适应PID控制



b) 常规PID控制

图7 SRD转矩波形

Fig. 7 Torque waveform of SRD

从图6可以看出, 模糊自适应PID控制的SRD比常规PID控制的SRD启动时间缩短, 超调量减小, 突加负载转矩后稳定性增强; 从图7可以看出, 模糊自适应PID控制的SRD明显减小了转矩脉动。

### 5 结语

本文分析了SRM非线性数学模型, 在此基础上建立了基于模糊自适应PID控制的SRD仿真模型。理论分析和仿真研究证明基于模糊自适应PID控制的SRD能有效提高电机系统的快速性和鲁棒性, 减小转矩脉动<sup>[7]</sup>, 得到更好的动态性能。

#### 参考文献:

- [1] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] Rodrigues M, Costa Branco P J, Suemitsu W. Fuzzy Logic Torque Ripple Reduction by Turn-Off Angle Compensation for Switched Reluctance Motors[J]. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2005, 48(3): 711-715.
- [3] 陈新, 郑洪涛, 蒋静坪. 基于MATLAB的开关磁阻电动机非线性模型仿真[J]. 电气传动, 2002(6): 123-128.
- [4] 章卫国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.
- [5] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [6] Wang Gen ping, Yi Ling zhi. The cycloconverter based on fuzzy controller for lift[J]. JOURNAL OF COAL SCIENCE ENGINEERING, 2005(22): 95-98.
- [7] Luis O A P Henriques, Luis G B R olim, Walter I Suemitsu. Torque Ripple Minimization in a Switched Reluctance Drive by Neuro-Fuzzy Compensation[J]. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 2004, 36(5): 523-529.

(责任编辑: 张亦静)