

# 开关磁阻电机的离散滑模变结构控制

马世伟<sup>1</sup>, 瞿遂春<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008; 2. 南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019)

**摘要:** 开关磁阻电机存在较大的转矩脉动, 为了更好地抑制开关磁阻电机转矩脉动, 采用离散滑模变结构控制方法, 建立了该方法的数学模型, 设计了离散滑模变结构控制器, 对电机的转矩和转速进行了仿真。仿真结果表明, 离散滑模变结构控制技术能有效地降低开关磁阻电机的转矩脉动, 并且可以提高系统的响应速度。

**关键词:** 开关磁阻电机; 滑模变结构控制; 离散; 转矩脉动

**中图分类号:** TM301.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2011)04-0058-06

## Discrete Variable Structure Sliding Control of Switched Reluctance Motor

Ma Shiwei<sup>1</sup>, Qu Suichun<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;  
2. College of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, China)

**Abstract:** There is a large torque ripple with switched reluctance motor. In order to suppress the torque ripple of switched reluctance motor, the method of discrete variable structure sliding control is used, a mathematical model of this method is built, and a discrete sliding mode controller is designed. Simulation on the torque and the speed of switched reluctance motor shows that the control technology can effectively reduce the torque ripple of the motor, while improving the system response speed.

**Keywords:** switched reluctance motor; variable structure sliding control; discrete; torque ripple

开关磁阻电机 (switched reluctance motor, SRM) 具有双凸极结构, 磁场分布复杂, 局部磁路高度饱和, 再加上电流的非正弦性, 使 SRM 脉动大, 噪声高<sup>[1]</sup>, 常规的 PI (proportional integral, 即比例积分) 控制显然很难满足要求。目前, 减小 SRM 转矩脉动的方法主要有 2 个方面: 一方面是从电机本身入手, 通过合理设计电机参数达到减振降噪的目的; 另一方面是选择合适的控制策略, 优化控制方案, 减小转矩脉动。滑模变结构控制可以在动态条件下避开参数变化对电机动态性能的影响, 而且不受外界干扰, 最大的优点是其滑动模态对系统所受的干扰及

系统参数的非线性具有良好的自适应性和鲁棒性, 因此, 滑模变结构控制对于抑制 SRM 的振动与噪声有一定的成效<sup>[2-3]</sup>。为了抑制 SRM 的转矩脉动, 本文设计了一种离散滑模变结构控制器, 并利用 MATLAB 中的 Simulink 软件, 对 SRM 的转矩和转速进行了仿真分析。

## 1 滑模变结构理论

滑模变结构 (variable structure sliding, VSS) 是一种系统结构随时变化的开关特性, 它与常规控制

收稿日期: 2011-04-12

作者简介: 马世伟 (1986-), 男, 河北衡水人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型电机及其控制,

E-mail: mashiwei9@163.com

的区别在于其控制的不连续性<sup>[41]</sup>。

满足滑模变结构控制需要3个条件:

1) 滑动模态存在

连续系统滑模存在的条件为 $\lim_{s \rightarrow 0} s \frac{ds}{dt} < 0$ ,  $s$ 为切换线方程。对于离散系统来讲,这只是必要不充分条件。离散系统还要求满足条件

$$s^2(k+1) < s^2(k) \quad (1)$$

2) 满足可达性条件

在切换面以外的状态点都将于有限时间内到达切换面,也就是当系统的起始点在状态空间的任意位置时,要求系统的运动必须趋向于切换面。通常用式子 $s\dot{s} < 0$ 来保证这样的可达性。

3) 滑模运动的稳定性

系统运动进入滑动模态后,就开始滑模运动。如果切换面包含控制系统的1个稳定平衡点 $x=0$ ,并且滑模运动方程在平衡点附近渐进稳定,那么控制系统在滑动模态下的运动就是稳定的。

## 2 SRM 离散滑模变结构控制器设计

在理论上,滑模变结构控制主要是针对连续系统模型。因为只有理想的连续滑模变结构控制,才具有切换逻辑变结构控制产生的等效控制。但在实际工程中,计算机实时控制的一般为离散系统,因此,离散系统滑模变结构控制的研究与设计成为滑模变结构控制理论与应用的重要组成部分。

### 2.1 系统状态方程

SRM的机械运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{em} - D\omega - T_L \quad (2)$$

式中: $\omega$ 为电机转速;

$J$ 为转动惯量;

$T_{em}$ 为电磁转矩;

$D$ 为摩擦系数;

$T_L$ 为负载转矩。

假设 1) 给定转速恒定,即 $\frac{d\omega^*}{dt} = 0$ ;

2) 负载转矩不变,即 $\frac{dT_L}{dt} = 0$ 。

据上述假设可得系统的状态方程为:

$$x_1 = \omega^* - \omega \quad (3)$$

$$x_2 = \dot{x}_1 = \frac{d(\omega^* - \omega)}{dt} = -\frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中 $x_1$ 和 $x_2$ 为状态变量, $x_1$ 是给定转速与实际转速的差值, $x_2$ 是此差值的微分。

由式(2)和(4)可得

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{J} \frac{d(T_{em} - D\omega - T_L)}{dt} = -\frac{1}{J} \frac{dT_{em}}{dt} + \frac{D}{J} \frac{d\omega}{dt} \quad (5)$$

$$\text{令 } a = \frac{D}{J}, u = \frac{1}{J} \frac{dT_{em}}{dt} \quad (6)$$

再由式(4)、式(5)和式(6)可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 = -\frac{d\omega}{dt} \\ \dot{x}_2 = -ax_2 - u \end{cases}$$

写成矩阵 $\dot{X} = AX + Bu$  ( $u$ 为控制器的输出变量),其展开形式为:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} u \quad (7)$$

式中 $X = (x_1 \ x_2)^T$ ,  $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{pmatrix}$ ,  $B = (0 \ -1)^T$ 。

### 2.2 算法的离散化

设采样周期为 $T$ ,则式(7)的通解可写成

$$X(k+1) = GX(k) + HU(k) \quad (8)$$

式中: $G = \exp[AT]$ ;

$$H = RB, R = \int_0^T \exp[AU]dU;$$

$U(k)$ 为控制器输出的离散化变量。

式(8)是离散系统的状态方程。

对于本文样机,取 $a=4$ 。通过计算<sup>[4]244-250</sup>可得:

$$G = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \exp[-4T] \\ 0 & \exp[-4T] \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$R = \begin{pmatrix} T & -\frac{1}{16} + \frac{T}{4} + \frac{1}{16} \exp[-4T] \\ 0 & \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \exp[-4T] \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$H = \left( -\frac{1}{16} \exp[-4T] + \frac{1}{16} - \frac{T}{4}, \frac{1}{4} \exp[-4T] - \frac{1}{4} \right)^T \quad (11)$$

将式(9)和式(11)代入式(8)可得

$$\begin{pmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \exp[-4T] \\ 0 & \exp[-4T] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{16} - \frac{T}{4} - \frac{1}{16} \exp[-4T] \\ -\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \exp[-4T] \end{pmatrix} U(k) \quad (12)$$

又据式(6)可得

$$T_{em}(k+1) = T_{em}(k) + JTU(k) \quad (13)$$

### 2.3 选取切换函数

设切换函数为

$$s(k) = cx_1(k) + x_2(k) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k), \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{C} = (c \ 1)$ ,  $c$  为滑模面参数;

$$\mathbf{X}(k) = (x_1(k) \ x_2(k))^T。$$

对于滑模面参数  $c$  的选择原则是: 保证滑模运动渐进稳定且具有较快的动态响应速度。该参数的变化对系统调节时间有较大影响, 滑模参数  $c$  越大, 滑模运动段响应越快。但参数  $c$  越大, 控制量的输出也就越大, 系统将会有较大的抖振。

由离散滑模存在和到达性条件可知, 系统需满足式(1)所示的条件。当采样时间较短时, 可选择

$$\begin{cases} [s(k+1) - s(k)] \operatorname{sgn}(s(k)) < 0, \\ [s(k+1) + s(k)] \operatorname{sgn}(s(k)) > 0. \end{cases} \quad (15)$$

### 2.4 选取离散趋近率

趋近率方法是滑模变结构控制的一种典型控制策略。对于离散滑模变结构控制, 常用的趋近率为指数趋近率, 即

$$s(k+1) - s(k) = -qTs(k) - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s(k)), \quad (16)$$

式中:  $\varepsilon$  为符号函数的增益参数, 且  $\varepsilon > 0$ ;

$q$  为趋近速度参数, 且  $q > 0$ ,  $1 - qT > 0$ 。

趋近速度参数  $q$  主要影响切换函数的动态过渡过程, 适当调整该参数可改变系统向滑模面的趋近速度, 更好地改善系统的动态品质。 $q$  越大, 系统到达滑模面的速度越快, 但参数  $q$  越大, 控制量的输出也越大, 系统将会有较大的抖振。符号函数的增益参数  $\varepsilon$  是系统克服外界干扰的主要参数,  $\varepsilon$  越大, 克服外界干扰的能力就越强, 同样, 参数  $\varepsilon$  过大也会导致系统抖动加大<sup>[5]</sup>。

### 2.5 离散控制律

离散滑模面为  $s(k) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k)$ , 将

$$s(k+1) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{C}\mathbf{G}\mathbf{X}(k) + \mathbf{C}\mathbf{H}U(k)$$

代入式(16), 即可得到基于指数趋近率的离散控制律为:

$$u(k) = -(\mathbf{C}\mathbf{H})^{-1} \left[ \mathbf{C}\mathbf{G}\mathbf{X}(k) - (1 - qT)s(k) + \varepsilon T \operatorname{sgn}(s(k)) \right]。 \quad (17)$$

为防止控制器发生抖振, 本文用饱和函数  $\operatorname{sat}(s)$  代替理想滑动模态中的符号函数  $\operatorname{sgn}(s)$ 。其中饱和函数为:

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} 1, & s > \Delta; \\ ks, & |s| \leq \Delta \quad k = \frac{1}{\Delta}; \\ -1, & s < -\Delta. \end{cases} \quad (18)$$

式中  $\Delta$  为某一设定参数。

将式(18)代入式(17)得

$$u(k) = -(\mathbf{C}\mathbf{H})^{-1} \left[ \mathbf{C}\mathbf{G}\mathbf{X}(k) - (1 - qT)s(k) + \varepsilon T \operatorname{sat}(s) \right], \quad (19)$$

当  $0 < cT < 2$  时, 理想滑模运动是稳定的<sup>[6]</sup>。

## 3 仿真及结果分析

样机为三相 6/4 结构开关磁阻电机, 功率为 60 kW, 黏性摩擦系数  $D = 0.02 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ , 转动惯量  $J = 0.005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 给定磁链为 0.36 Wb, 给定速度为 954.93 r/min (100 rad/s), 负载转矩为  $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

利用 MATLAB 中的 Simulink 进行仿真<sup>[7-8]</sup>。离散滑模变结构控制系统仿真图见图 1。图中离散滑模变结构控制器是用 S-Funtion 函数编写的, 控制器的输出经过离散积分模块送到转矩输入端。

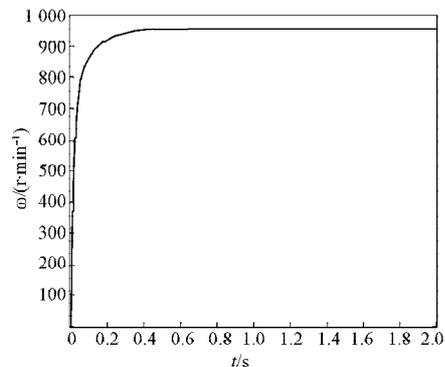
离散滑模变结构控制下的仿真波形见图 1, 图 2 是 PI 转速闭环直接转矩控制的仿真波形图, 图 3 是电流斩波控制的仿真波形图。为便于比较和量化转矩脉动, 定义了转矩脉动系数

$$K_t = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{ave}}}, \quad (20)$$

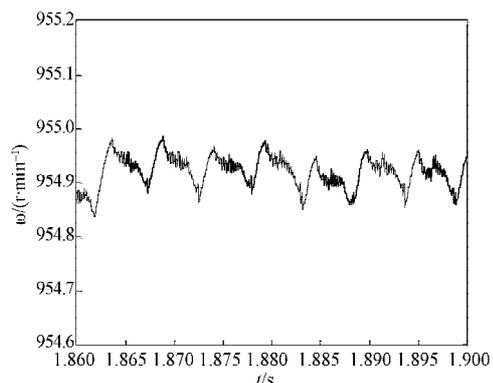
式中:  $T_{\max}$  为最大电磁转矩;

$T_{\min}$  为最小电磁转矩;

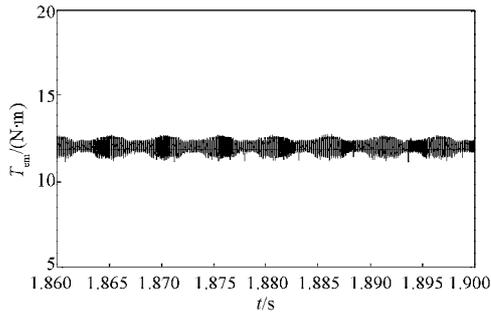
$T_{\text{ave}}$  为平均电磁转矩。



a) 离散滑模变结构控制转速波形



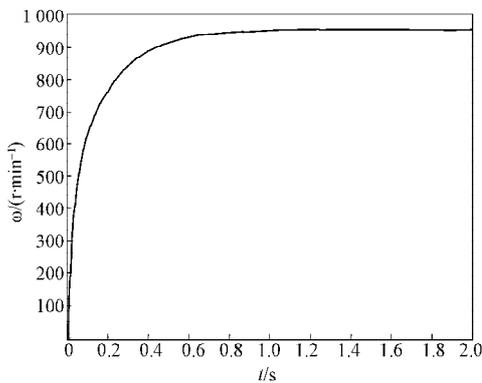
b) 稳态时转速波形部分放大图



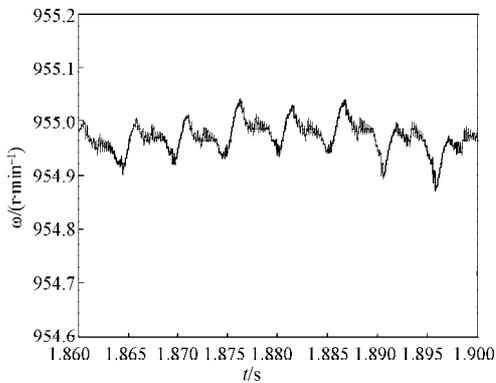
c) 部分转矩波形

图1 离散滑模变结构控制仿真波形

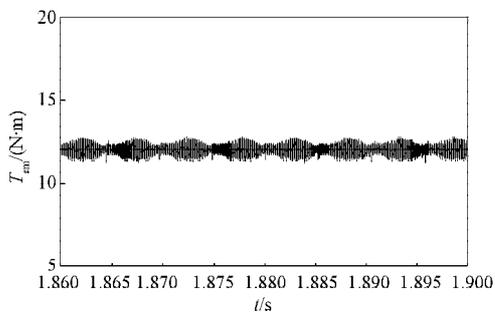
Fig. 1 The simulation waveform for variable structure sliding control



a) 转速波形



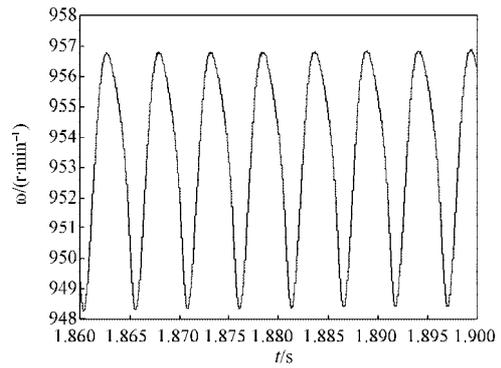
b) 部分转速波形放大图



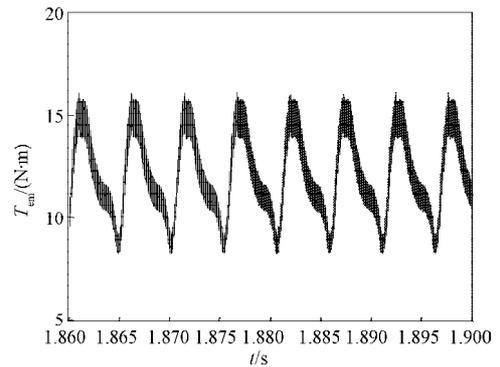
c) 部分转矩波形图

图2 PI转速闭环直接转矩控制仿真波形

Fig. 2 The simulation waveform of PI speed loop direct torque control



a) 转速波形放大图



b) 转矩波形放大图

图3 电流斩波控制仿真波形

Fig. 3 The simulation waveform of current chopper control

从图1中分图a)可看出,开关磁阻电机采用离散滑模变结构控制的响应时间是0.73 s,而图2中分图a)所示,PI转速闭环直接转矩控制的响应时间是1.8 s。可见,离散滑模变结构控制的响应时间更快。

图1中分图b)所示,离散滑模变结构控制达到稳定状态时,电机转速幅值的波动范围954.84~954.98 r/min,波动幅度为0.14 r/min。图2中分图b)所示,PI转速闭环直接转矩控制时,电机转速波动幅度为0.22 r/min。图3中分图a)所示,电流斩波控制下的电机转速波动幅度为8.2 r/min。通过对比可知,离散滑模变结构控制的电机转速波动幅度较小。

图1中分图c)所示,离散滑模变结构控制下电机转矩脉动范围是11.3~12.6 N·m,转矩脉动系数 $K_t$ 为0.108。图2中分图c)所示,PI转速闭环直接转矩控制时,电机转矩脉动范围是11.2~12.7 N·m,转矩脉动系数 $K_t$ 为0.125。图3中分图b)所示,电流斩波控制下的电机转矩脉动范围是8.8~15.3 N·m,转矩脉动系数 $K_t$ 为0.541。小的波动是由斩波带来的,大的波动则是由换相带来的。显然,离散滑模变结构控制在抑制转矩脉动上效果更好。

由仿真结果可知:滑模变结构控制有明显的优

点, 响应速度快, 电机转速波动小, 电机转矩脉动小, 控制简单, 对系统参数变化不敏感, 运行稳定, 有较强的鲁棒性, 并能够降低开关磁阻电机的振动与噪声。

## 4 结论

本文将离散滑模变结构控制方法应用到开关磁阻电机控制系统中, 对系统进行了仿真, 并与PI转速闭环直接转矩控制和电流斩波控制结果做了对比分析, 得到以下结论:

1) SRM的离散滑模变结构控制的响应速度更快, 只需0.7 s就能到达稳态;

2) SRM的离散滑模变结构控制能更有效地降低电机转速波动, 分别比PI转速闭环直接转矩控制和电流斩波控制减小0.08和8.06 r/min;

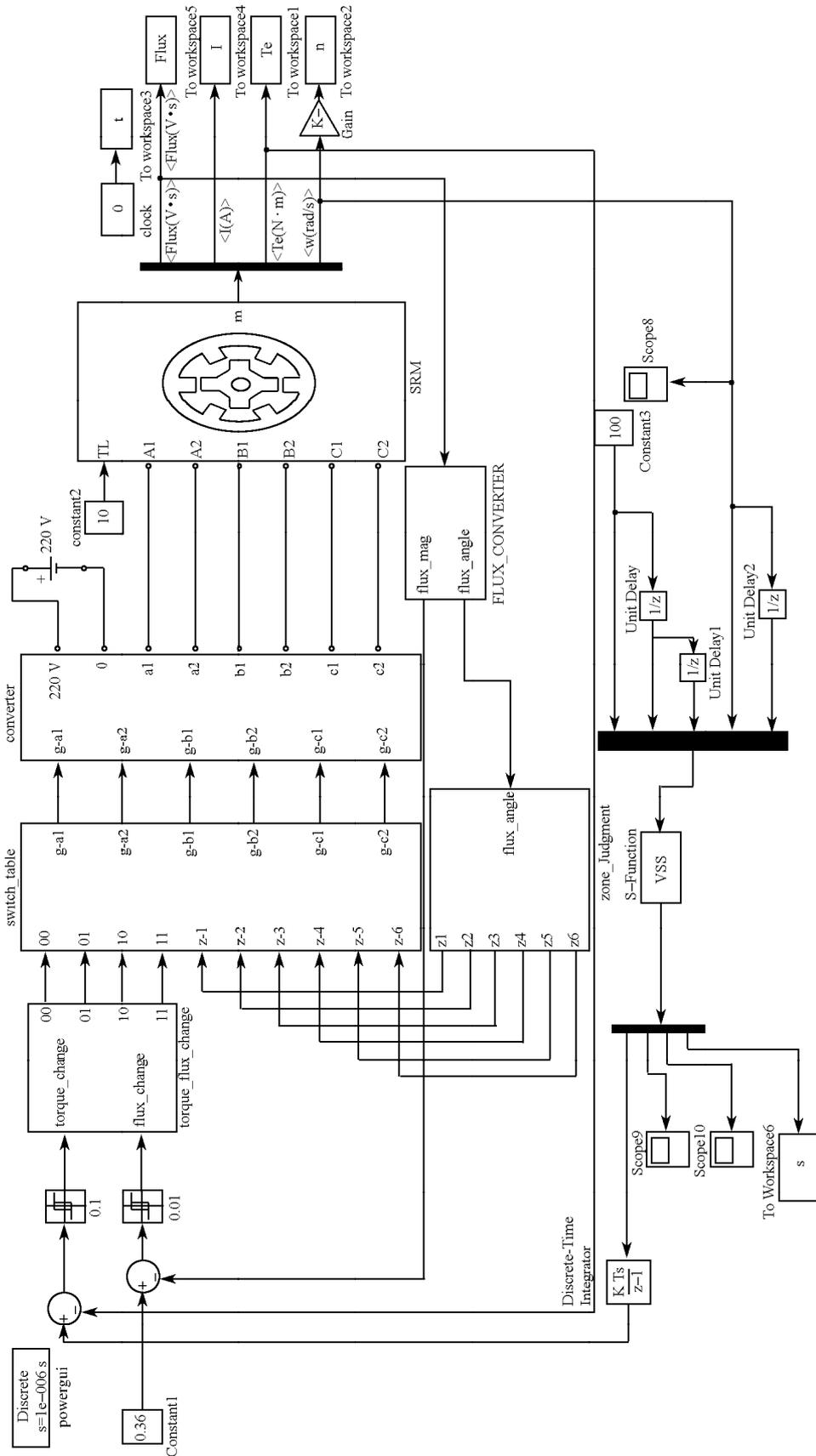
3) 在降低转矩脉动方面, SRM的离散滑模变结构控制更胜一筹, 电机转矩脉动系数可分别降低0.017和0.433。

上述结论表明: 离散滑模变结构控制是一种较理想地降低开关磁阻电机转矩脉动的控制方法, 同时可提高系统的响应速度。

### 参考文献:

- [1] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制技术[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 1998: 5-6.  
Wang Honghua. Speed Regulation Control Technology of SRM[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 1998: 5-6.
- [2] Buja G S, Menis R, Valla M I. Variable Structure Control of an SRM Drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(1): 56-63.
- [3] 曲荣海, 姚若萍, 刘大庆, 等. 开关磁阻电机滑模变结构控制与仿真[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1997, 37(4): 11-13.  
Qu Ronghai, Yao Ruoping, Liu Daqing, et al. The Variable Structure Control with Sliding Mode of SRM and Simulation [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1997, 37(4): 11-13.
- [4] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990.  
Gao Weibing. The Basis of Variable Structure Control Theory [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990.
- [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: 82.  
Liu Jinkun. Variable Structure Sliding Control and MATLAB Simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 82.
- [6] 黄操, 张奕黄. 开关磁阻电机的滑模变结构控制[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 35-37.  
Huang Cao, Zhang Yihuang. Variable-Structure Control of Switched Reluctance Motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 35-37.
- [7] 李维波. MATLAB 在电气工程中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 166-194.  
Li Weibo. Application of MATLAB in Electrical Engineering [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 166-194.
- [8] 张国澎. 开关磁阻电机直接转矩控制系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009: 15-20.  
Zhang Guopeng. The Research of SRM Direct Torque Control System[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009: 15-20.

(责任编辑: 李玉珍)



附图1 离散滑模变结构控制系统仿真图

Additional Fig. 1 The simulation diagram of discrete variable structure sliding mode controller