

一种用于异步电机矢量控制的新型滑模转子 磁链观测器研究*

黄刚 张昌凡

(湖南工业大学电气与信息工程学院, 株洲 412008)

摘要 针对异步电机矢量控制需要实现定、转子电路解耦的一个关键问题是准确地观测转子磁链. 提出了一种以异步电机在两相同步旋转坐标系下的定子电流和转子磁链为状态变量的基于滑模变结构思想的转子磁链观测器, 对滑模变结构输入控制信号的设计使得滑模运动速度与轨迹和滑模面的距离相关联, 并利用李亚普诺夫理论证明了算法的收敛性. 通过仿真表明, 该方法具有较高的转子磁链观测准确度, 对转子电阻的变化具有很强的鲁棒性, 能够改善异步电机矢量控制调速系统的动静态性能.

关键词 异步电机, 转子磁链, 滑模观测器

引言

异步电机在工业领域中已广泛的应用并发挥了巨大的作用, 但异步电机本身是一个多变量、强耦合的非线性系统, 需对其采用适当的控制策略. 目前, 矢量控制策略广泛地用于高性能异步电机的控制中, 虽然采用矢量控制设计的异步电机驱动系统具有很好的控制性能, 但其控制器在设计时需要具有真实准确的电机参数来实现定、转子电路的解耦. 即无论是转子磁场定向矢量控制, 还是其他一些非线性控制方法, 都需要知道转子磁链矢量的幅值和相位. 由于转子磁链难以直接测量, 通常的方法是利用方便检测到的量, 例如定子电流、电压及转速等, 来构造观测器以获得转子磁链. 然而由于种种原因及转子电阻等电机参数的不确定性导致了转子磁链观测的难度.

为了构造高精度的转子磁链观测器, 进而设计高性能的异步电机控制系统, 许多专家学者至今一直在进行广泛和深入的研究. 目前主要有 Luenberger、Kalman 滤波、自适应观测器、Backstepping、滑模观测器与智能观测器等设计方法^{[1][2]}, 最近 H_∞ 方法也被用于转子磁链的观测上来^[3]. 如果能够精确获取电机模型, 那么状态观测法就比较有效. 但是由于电机模型存在多变量、未知输入扰动和测量噪声等原因, 使得状态观测法在非线性不确定系统中的实际应用受到限制. 近年来, 滑模变结

构控制理论在解决复杂的非线性系统问题时取得了相当的进展. 由于滑模变结构控制本质上是一类特殊的非线性控制, 在一定条件下, 它具有对系统参数和外部干扰呈现不变性^[4], 正是这一特性使得用滑模变结构方法设计非线性状态观测器成为一个重要的研究方向^[5]. 对于滑模观测器, Utkin 最早进行了研究工作^[6], Slotine 等^[7]把滑模变结构观测器在非线性系统加以应用, Walcott 和 Zak^[8]采用一种基于 Lyapunov 原理来构造不连续项的滑模观测器. Zheng Y H 等^[3]设计了一种非线性自适应滑模观测器, 并将该观测器应用于电机控制中. Abdelkrim 等^[9]利用滑模观测器对交流电机的转子磁链进行了估计. Kim S M 等^[3]采用自适应滑模观测器, 实现了电机转子磁链的精确估计.

滑模观测器对电机的参数有着很好的鲁棒性, 在很宽调速范围内也拥有良好的动态性能, 具有很好的应用前景. 然而普通滑模系统在跟踪指令信号时, 如果遇到扰动, 稳态误差会变大, 以至于达不到要求, 虽然可以做到把系统稳态误差无穷地趋向于零, 但是在实际应用中, 这个稳态误差的存在会造成诸如抖振加重等许多问题. 文献[10]中提出的具有积分形式增益的滑模控制器, 其在滑动模态阶段, 当切换函数趋近于零时, 切换函数的积分也趋近于零, 其跟踪性能更优, 可以解决抖振和稳态误差过大等问题. 由于电机系统的参数是不断变化的, 我们希望与电机相关的滑模控制量离滑模面较远时速度较大, 从而可以保证到

达滑模面的时间尽可能的短,离滑模面较近时,希望趋近速度较小,以保证滑模的抖振尽可能小,并减小惯性超调,即趋近速度应该是与到达滑模面的距离有关的,此即为自适应趋近律滑模变结构控制的思想,它为有效解决参数不确定或时变参数系统控制问题提供了一种控制策略,但其也存在一定的稳态误差.结合积分增益滑模和自适应滑模的优点,本文以异步电机矢量控制系统转子磁链观测器为对象设计了一种滑模变结构观测器,使所设计的滑模运动速度与轨迹和滑模面的距离相关联,以有效减小滑模变结构所固有的抖振问题.仿真结果表明,该方法有效减小了时变参数控制问题中的稳态误差,具有较高的转子磁链观测准确度,因而改善了电机转速估计的精度,同时系统具有抗参数变化的鲁棒性.

1 异步电机模型

异步电机在两相同步旋转坐标系下的以定子电流和转子磁链为状态变量、定子电压为输入、定子电流为输出的状态方程表示如下^[11]:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_s \\ \dot{\psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

输出方程:

$$Y = \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \psi_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_{11} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r T_r}\right)I - \omega_1 J,$$

$$A_{12} = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \left(\frac{1}{T_r}I - \omega_r J\right), A_{21} = \frac{L_m}{T_r}I,$$

$$A_{22} = -\frac{1}{T_r}I - (\omega_1 - \omega_r)J, B_1 = \frac{1}{\sigma T_s}I.$$

其中: $i_s^T = [i_{sd} \ i_{sq}]$ 为定子电流; $\psi_r^T = [\psi_{rd} \ \psi_{rq}]$ 为转子磁链; $u = [u_{sd} \ u_{sq}]^T$ 为定子电压; $I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$;

$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ 为漏感系数; $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ 为转子时间常数; ω_r 为转子电角速度; ω_1 为同步旋转角速度,是一常量; R_s 、 R_r 、 L_s 、 L_r 和 L_m 分别为定子电阻、转子电阻、定子电感、转子电感和绕组互感.

2 滑模变结构状态观测器设计及稳定性分析

异步电动机的磁链观测实质上即是对电动机进行状态观测,以 Luenberger 观测器理论为基础,从电

动机的状态方程出发,可以获得电动机磁链观测模型的一般形式,各种常见磁链观测模型都只是 Luenberger 观测器的特例^[11].本节利用电动机定子电流的 D 轴分量为可测状态变量来重构转子磁链,在设计中引入滑模变结构方法,利用其具有对系统参数和外部干扰呈现的不变性,从而使得磁链观测不受某些参数变化的影响,提高磁链观测的鲁棒性.

对上述电机模型,记可测状态变量为:

$$x_1^T = i_s^T = [i_{sd} \ i_{sq}] \quad (3)$$

待重构状态变量为:

$$x_2^T = \psi_r^T = [\psi_{rd} \ \psi_{rq}] \quad (4)$$

状态方程可写为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (5)$$

待观测部分子系统为:

$$\dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 \quad (6)$$

可观测部分子系统记为:

$$y = \dot{x}_1 - A_{11}x_1 - B_1 u = A_{12}x_2 \quad (7)$$

构造滑模变结构观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}\hat{x}_2 + v \\ \hat{y} = A_{12}\hat{x}_2 \end{cases} \quad (8)$$

其中,若假设 $v = K \text{sgns}$,此即为传统常用的基于等速趋近律的滑模变结构输入控制信号.为了克服在到达滑模面的过程中因为需减小到达时间而要求的趋近速度大,与当在滑模面上滑动的过程中为减小抖振而要求速度小的这一矛盾,在常用的趋近律的基础上,本文提出 $v = K \left| \int_0^t s dt \right| \text{sgns}$ 为滑模变结构输入信号,使得滑模轨迹的运动速度与轨迹和滑模面的距离及其积分相关联; $K = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix}$ 为滑模增益矩阵, k 为大于零的待定值; \hat{x} 、 \hat{y} 分别为 x_2 、 y 的观测值.定义滑模线为 $s = e = y - \hat{y}$,则:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{y} - \dot{\hat{y}} = A_{12}\dot{x}_2 - A_{12}\dot{\hat{x}}_2 = A_{12}[A_{21}x_1 + \\ & A_{22}x_2 - A_{21}x_1 - A_{22}\hat{x}_2 - K \left| \int_0^t s dt \right| \text{sgns}] = \\ & A_{22}s - A_{12}K \left| \int_0^t s dt \right| \text{sgns} \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $\text{sgns} = \begin{cases} +1 & e > 0 \\ -1 & e < 0 \end{cases}$.

为考察所设计滑模观测器的收敛情况,选取李雅普诺夫函数 $V = s^T s = e^T e$ (正定),则:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{e}^T e + e^T \dot{e} = [A_{22}e - A_{12}K \left| \frac{\int_0^t edt}{e} \right| \text{sgne}]^T e + \\ &e^T [A_{22}e - A_{12}K \left| \frac{\int_0^t edt}{e} \right| \text{sgne}] = e^T A_{22}^T e - \\ &[A_{12}K \left| \frac{\int_0^t edt}{e} \right| \text{sgne}]^T e + e^T A_{22}e - \\ &e^T [A_{12}K \left| \frac{\int_0^t edt}{e} \right| \text{sgne}] = e^T [A_{22}^T + A_{22}]e - \\ &\left([A_{12}K \left| \frac{\int_0^t edt}{e} \right| \text{sgne}]^T e + e^T [A_{12}K \left| \frac{\int_0^t edt}{e} \right| \text{sgne}] \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{令 } e_1 = \psi_{rd} - \hat{\psi}_{rd}, e_2 = \psi_{rq} - \hat{\psi}_{rq}, \text{ 则 } e = A_{12} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}.$$

将 e, A_{12} 和 A_{22} 代入式(10)中的第一项可得:

$$\begin{aligned} e^T [A_{22}^T + A_{22}]e &= -\frac{2}{T_r} \left[\left(\frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} + \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} \right)^2 + \right. \\ &\left. \left(\frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} e_1 + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

由于 $\left| \frac{\int_0^t sdt}{s} \right|$ 为非负矩阵,以及 $\text{sgns} = \begin{cases} +1 & e > 0 \\ -1 & e < 0 \end{cases}$ 和

两相同步旋转坐标系下异步电机的状态方程系数 A_{12} 的存在,可得 $\dot{V} \leq 0$ (负定),即选择合适的 k 可以保证所设计滑模观测器收敛到实际值.由滑模成立条件可知滑模发生.当滑模发生时, $s = 0, \dot{s} = 0$,故由 $s = e = y - \hat{y} = 0 \Rightarrow y - \hat{y}$,即可得 $x_2 = \hat{x}_2$.

3 仿真与分析

根据上述设计算法,用 Matlab 软件进行仿真.仿真用异步电机具体参数为:电机额定电压 380V,额定频率 50Hz,给定转速为 1400rpm,给定转子磁链为 1.5Wb,定子电阻 $R_s = 0.435\Omega$,定子漏感 $L_{ls} = 2\text{mH}$,转子电阻 $R_r = 0.816\Omega$,转子漏感 $L_{lr} = 2\text{mH}$,互感 $L_m = 69.31\text{mH}$,转动惯量 $J = 2\text{kg} \cdot \text{m}^2$,极对数 $p = 2$.系统仿真采用变步长的 ode23 算法,相对误差和绝对误差均取 $1e^{-04}$.仿真结果如图 1 和图 2 所示,其中 r_1, r_2 和 r_3 分别为本文设计的滑模转子磁链观测值、基于等速趋近律的滑模磁链观

测值和本文设计的滑模转子磁链观测器在电机转子电阻增加 30% 时的观测值.

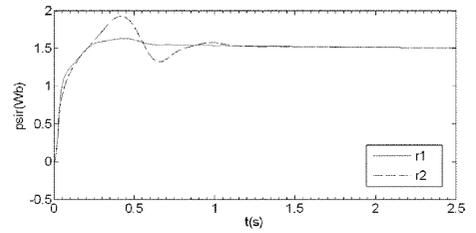


图 1 本文设计的滑模与基于趋近律的滑模转子磁链观测值比较
Fig. 1 The designed sliding mode in this paper compares with sliding mode rotor flux value based on reaching law

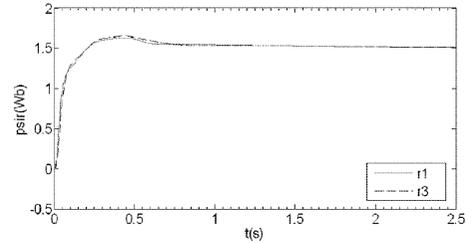


图 2 转子电阻为给定时和转子电阻增加 30% 时转子磁链观测值
Fig. 2 Rotor flux observation value when given rotor resistance and 30% increase in it

仿真分析:图 1 为本文设计的滑模变结构观测器与基于趋近律的滑模观测器对转子磁链观测值的比较,从图可知在启动阶段振荡波动较大,于 1s 左右基本达到了给定的 1.5Wb,证明了基于等速趋近律的滑模变结构控制能够很好的应用于异步电动机的转子磁链观测;在电动机启动阶段相对于波动更小,启动更为平滑,并能够在 0.7s 左右基本达到转子磁链给定值,可知本文所设计的滑模变结构转子磁链观测器的观测值波动更小,能够以相对更快的时间比较平滑地接近给定值,抖动也较小,因此也降低了系统观测时的稳态误差;为了验证所设计滑模变结构观测器的鲁棒性,将电动机转子电阻比标称值时增加 30%,由图 2 比较后可知转子磁链幅值在转子电阻增加前后波动不大,误差也很小,其充分说明了转子电阻的不确定性对文中所设计的方法几乎没有影响.通过对比分析充分验证了所设计滑模变结构观测器的跟踪性能优良,对参数变化具有较强的鲁棒性.

4 结论

本文在等速趋近律滑模变结构观测器设计的基础上,提出了一种用于异步电机矢量控制系统的新型滑模变结构转子磁链观测器,推广和丰富了滑

模变结构观测器设计理论,并采用李亚普诺夫理论证明了算法的收敛性.通过仿真验证了该方法对电动机转子磁链能够进行准确的观测,并对电动机转子电阻的变化具有极强的鲁棒性,有效减小了时变参数观测问题中的稳态误差,为实现更高精度的调速控制系统提供了更加精确的反馈参数,通过仿真验证了设计的正确性和有效性.

参 考 文 献

- 1 Chen X, Kano H. State observer for a class of nonlinear systems and its application to machine vision. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(11): 2085 ~ 2091
- 2 Marino R, Peresada S, Tomei P. On-line stator and rotor resistance estimation for induction motors. *IEEE Trans. Control Systems Tech*, 2000, 8(3): 570 ~ 579
- 3 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真. 北京: 清华大学出版社, 2005: 12 (Liu J K. MATLAB Simulation for Sliding Mode Control. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 12 (in Chinese))
- 4 郭益深, 陈力. 漂浮基柔性空间机械臂姿态与关节协调运动的 Terminal 滑模控制. *动力学与控制学报*, 2009, 7(2): 158 ~ 163 (Guo Y S, Chen L. Terminal sliding mode control of coordinated motion of free-floating flexible space manipulator. *Journal of Dynamics and Control*, 2009, 7(2): 158 ~ 163 (in Chinese))
- 5 Yu X H, Xu J X, Ed. Variable structure systems: towards the 21th century. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002
- 6 Edwards Christopher, Spurgeon Sarah K. On the development of discontinuous observers. *International Journal of Control*, 1994, 59(5): 1211 ~ 1229
- 7 Slotine J, Hedrick J, Misawa E. On sliding mode observers for nonlinear systems. *Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, 1987, 109: 245 ~ 252
- 8 Walcott B L, Corless M J, Zak S H. Comparative study of nonlinear state-observation techniques. *Int. Jour. of Control*, 1987, 45: 2109 ~ 2132
- 9 Abdelkrim B, Ahmed R, Eric A. Sliding mode input output linearization and field orientation for real time control of induction motors. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 1999, 14(1): 3 ~ 13
- 10 Tahara J I, Tsuboi K, Sawano T, Nagata Y. An adaptive VSS control method drive with integral type switching gain. Proceedings of the IASTED International Conference Robotics and Applications, Florida, USA, 2001: 106 ~ 111
- 11 金海. 三相异步电动机磁链观测器与参数辨识技术研究. 浙江大学博士学位论文, 2006 (Jin H. Research on observer and parameter identification of induction motor. Dissertation for the Doctoral Degree, Zhejiang University, 2006 (in Chinese))

STUDY OF A NEW SLIDING MODE ROTOR FLUX OBSERVER FOR INDUCTION MOTOR VECTOR CONTROL *

Huang Gang Zhang Changfan

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

Abstract Induction motor vector control system needs the decoupled of stator and rotor circuits, the key issue is how to observe the rotor flux accurately. Taken the stator current and rotor flux of induction motor in two-phase synchronous rotating coordinate system as state variables, a new rotor flux observer based on sliding mode variable structure theory was put forward. The design of sliding mode control input signal made sliding velocity and the distance between trajectory and sliding-mode surface associated, and the algorithm convergence was proved by the Lyapunov theory. Simulation results showed the high accuracy of rotor flux observer and strong robustness to the rotor resistance change of the proposed method, and can improve dynamic and static performance of the induction motor vector control and speed regulation system.

Key words induction motor, rotor flux, sliding mode observer

Received 26 November 2010, revised 23 December 2010.

* The project supported by the National Science Foundation of China (60774069), the Hunan Natural Science Foundation of China (07JJ3118), and the Science & Research Program of Hunan Province (2009FJ3008)