

基于模糊滑模观测器的永磁同步电机 进给系统速度估计*

崔皆凡, 马桂新, 谢 炜

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 为解决目前伺服系统中采用机械位置传感器所存在的诸多缺点, 提出一种用于永磁同步电机(PMSM)进给系统的模糊滑模速度观测器, 实现无速度传感器控制。针对传统滑模观测器的抖振问题, 采用 Sigmoid 函数代替传统理想开关函数, 并引用模糊控制器自适应调整滑模增益以减小抖振, 实现软切换连续控制。估计反电动势可以直接由控制函数的输出获得, 省略了传统观测器中的低通滤波器和相角补偿。利用李亚普诺夫函数证明了设计的滑模观测器的渐进稳定性。仿真结果表明: 设计的模糊滑模观测器能够对 PMSM 转子速度进行精确辨识, 并具有良好的动、稳态性能。

关键词: 永磁同步电机; 模糊滑模观测器; Sigmoid 函数; 无速度传感器

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)06-0031-04

Speed Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Fuzzy Sliding Mode Observer*

CUI Jiefan, MA Guixin, XIE Wei

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: To solve many defects existing in the mechanical speed sensor of servo system, a fuzzy sliding mode speed observer was proposed for the feed system of the permanent magnet synchronous motor. Focused on the chattering problem of conventional sliding mode observer (SMO), sigmoid function was used instead of the traditional ideal switch function and fuzzy control system was used to adjust the gain of the SMO. This method could decrease undesirable chattering phenomenon and realized the soft control. Detecting back EMF could be done directly from switching signal without any low pass filter. So the delay time because of low-pass filter, in the proposed observer was eliminated and there was no need to compensate phase fault in position estimating. The asymptotic stability of the designed sliding mode observer was proved by Lyapunov function. The simulation results showed that the designed fuzzy sliding mode observer could accurately identify the rotor speed of PMSM, and had good dynamic and static performance.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); fuzzy sliding mode observer; sigmoid function; sensorless control

0 引 言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有效率高、功率密度大、调速范围宽、动态响应快等优点, 在数控机床

高性能进给伺服中有广泛应用。传统 PMSM 进给系统一般采用光电编码器来完成速度、位置检测和系统定位等功能。但由于机械式传感器在空间尺寸、使用环境、系统成本及运行可靠性等方面存在诸多缺陷, 因此无速度传感器控制的研究在

* 基金项目: 辽宁省特聘教授专项资助基金(辽教发[2012]145号)

作者简介: 崔皆凡(1963—), 女, 博士研究生, 教授, 研究方向为特种电机及其控制。

高速高精度的进给伺服应用中有重要的意义。

目前常用的无速度传感器转子位置检测方法,一种是利用凸极效应的高频信号注入法^[1],但该方法不适用于隐极式 PMSM;另一种是利用磁链或反电动势估计转子位置,常用的方法有模型参考自适应法^[2]、滑模观测器法、扩展卡尔曼滤波法^[3]等。其中滑模观测器法(Sliding Mode Observer, SMO)具有设计简单、鲁棒性强的优点,但同时也存在低速抖振问题。通常采取低通滤波的方式来滤除高频噪声^[4,5],但这也带来相位滞后,延迟的相位与输入信号角频率和截止频率有关,且随输入信号角频率变化而改变。文献[6]采用变截止频率相位补偿的方法,但增加了系统复杂性。另外可以通过改进理想开关函数来抑制抖振。文献[7]对传统理想开关函数、饱和函数和 Sigmoid 函数作了比较,验证了 Sigmoid 函数在抑制抖振方面的优越性。文献[8]通过引入模糊控制自适应调节开关函数的幅值,使控制函数输出更连续化,在一定程度上抑制了抖振。本文在通常电流型滑模观测器基础上,采用 Sigmoid 函数代替传统的开关函数,并以模糊控制来实现滑模增益的自适应调节,以减小抖振并省略低通滤波器和相位补偿。通过仿真验证了所设计模糊滑模速度观测器可以快速而精确地跟踪给定信号,从而有效提高进给系统加工精度和定位精度。

1 PMSM 数学模型

PMSM 在两相静止坐标系下数学模型为

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}i_\alpha + \frac{u_\alpha}{L_s} - \frac{e_\alpha}{L_s} \\ \frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}i_\beta + \frac{u_\beta}{L_s} - \frac{e_\beta}{L_s} \end{cases} \quad (1)$$

其中,反电势方程:

$$\begin{cases} e_\alpha = -\psi_r \omega_r \sin\theta \\ e_\beta = \psi_r \omega_r \cos\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_α, i_β —— α, β 轴的定子电流分量;

L_s ——定子电感;

R_s ——定子电阻;

ψ_r ——永磁体的磁链;

ω_r ——转子角速度;

θ ——转子角度。

2 模糊滑模观测器的设计与分析

2.1 模糊滑模观测器的数学模型

根据电机在两相静止坐标系下的数学模型和滑模变结构的理论定义切换函数为

$$s(x) = \hat{i}_s - i_s \quad (3)$$

式中: \hat{i}_s ——估计电流值, $\hat{i}_s = [\hat{i}_\alpha \ \hat{i}_\beta]^T$;

i_s ——实际电流值, $i_s = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ 。

选取切换面为

$$s(x) = \hat{i}_s - i_s = 0 \quad (4)$$

选取 Sigmoid 函数为控制函数,其表达式为

$$F(s) = \frac{2}{1 + e^{(-as)}} - 1 \quad (5)$$

式中: a ——正常数,是可调参数。

由于 Sigmoid 函数具有连续开关特性,边界层内函数值为连续曲线变化,因此采用 Sigmoid 函数代替传统滑模观测器中的理想开关函数,可以降低控制量中的高频部分,有效地减少抖振。

构造基于 Sigmoid 函数的滑模观测器为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s}u_\alpha - \frac{1}{L_s}kF(\bar{i}_\alpha) \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s}u_\beta - \frac{1}{L_s}kF(\bar{i}_\beta) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\bar{i}_\alpha, \bar{i}_\beta$ ——电流观测误差;

k ——滑模增益。

反电动势的估计值为

$$\begin{cases} \hat{e}_\alpha = kF(\bar{i}_\alpha) = \frac{2k}{1 + e^{(-a\bar{i}_\alpha)}} - k \\ \hat{e}_\beta = kF(\bar{i}_\beta) = \frac{2k}{1 + e^{(-a\bar{i}_\beta)}} - k \end{cases} \quad (7)$$

由此可得估算角度和估计转速为

$$\begin{cases} \hat{\theta} = \arctan\left(-\frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}\right) \\ \hat{\omega} = \frac{d\hat{\theta}}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

2.2 稳定性分析

将式(6)和式(1)做差,可得

$$\begin{cases} \frac{d\bar{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\bar{i}_\alpha + \frac{1}{L_s}e_\alpha - \frac{k}{L_s}F(\bar{i}_\alpha) \\ \frac{d\bar{i}_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\bar{i}_\beta + \frac{1}{L_s}e_\beta - \frac{k}{L_s}F(\bar{i}_\beta) \end{cases} \quad (9)$$

时,给定转速产生阶跃变化,由 500 r/min 突变为 700 r/min,仿真得到的结果如图 4~图 6 所示。

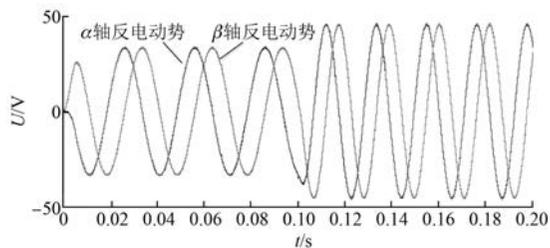


图 4 估算反电动势波形图

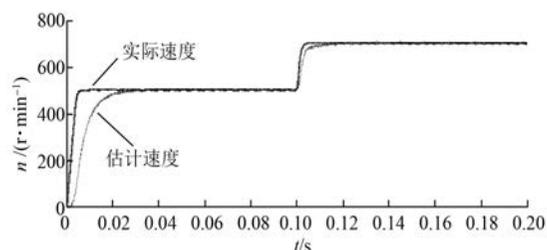


图 5 实际转速和估计转速波形图

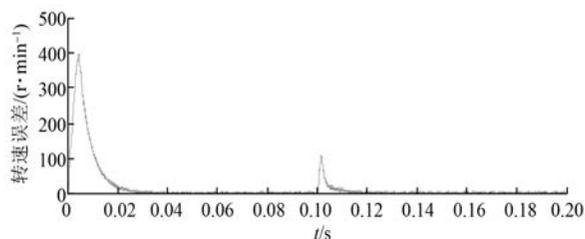


图 6 转速误差(实际值-估计值)

图 4 为估计反电动势波形,可以看出波形平滑且具有较好的正弦特性,谐波分量较小。图 5~图 6 为估计转速和实际转速波形以及转速估计误差波形,可以看出估计转速达到稳态的时间为 0.03 s,之后可以精确地跟随给定速度,在 0.1 s 时的转速阶跃变化情况下,估计转速可以在较短时间内跟随给定值,约为 0.015 s,因此系统响应快速且稳态误差较小。图 7 为估计位置和实际位置波形。由于省略了传统滑模观测器中的低通滤波器,因此估计转子位置波形没有明显的滞后,可以较好地跟随实际位置。

4 结 语

本文将模糊滑模控制应用于 PMSM 进给伺服系统中,并搭建仿真模型,通过观测电机恒定负载下起动响应、转速阶跃响应下转速、位置估计值

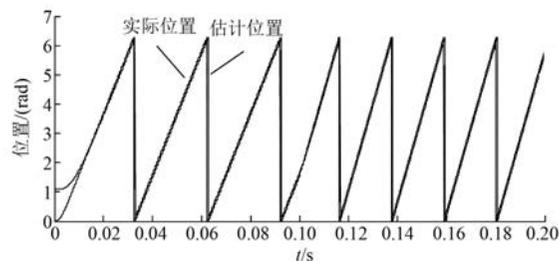


图 7 实际位置和估计位置波形图

与实际值的对比,结果表明本文构建模糊滑模速度观测器可以准确而快速地跟随实际信号,并对抖振有较好的抑制作用,具有优良的动、静态特性和鲁棒性,能够满足高性能机床进给伺服的快速性、稳定性和精确性要求。

【参考文献】

- [1] 寿利宾,袁登科.基于高频旋转电压信号注入的无位置传感器控制[J].电机与控制应用,2014,41(12): 10-14.
- [2] 韩世东,张广明,梅磊,等.基于 MRAS 参数辨识的 PMSM 无速度传感器控制[J].电机与控制应用,2016,43(1): 7-11.
- [3] 赵伟,黄文娟,马亮.基于 EKF 的 PMSM 无传感器检测技术仿真研究[J].组合机床与自动化加工技术,2015(3): 121-128.
- [4] 王正,王一平.基于滑模观测器的 PMSM 无速度传感器研究[J].微电机,2012,45(5): 52-54.
- [5] 郭超伟,高艳霞,张曲遥,等.基于滑模观测器的交流伺服电机无传感器控制[J].电机与控制应用,2015,42(4): 1-5.
- [6] JIANG D, ZHAO Z M, WANG F. A sliding mode observer for PMSM speed and rotor position considering saliency [C] // IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2008: 809-814.
- [7] KIM H R, SOON J B, LEE J M. A high-speed sliding mode observer for the sensorless speed control of a PMSM [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2011, 58(9): 4069-4077.
- [8] 王巍,汪玉凤,郭凤仪.基于滑模观测器的 PMSM 模糊滑模控制[J].微特电机,2010,38(8): 44-47.
- [9] 刘春芳,杜昭童.快速刀具伺服系统的模糊自适应滑模控制[J].沈阳工业大学学报,2015,37(2): 126-131.
- [10] 张洪帅,王平,韩邦成,等.基于模糊滑模观测器的磁悬浮高速永磁同步电机转子位置检测方法[J].电工技术学报,2014,29(7): 147-153.

收稿日期: 2016-09-19