

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.023

PMSM 变结构 MRAS 无位置传感器 控制研究^{*}

周佳华¹, 贾洪平^{1*}, 张 鹏¹, 胡桢喆²

(1. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江, 212013; 2. 中国矿业大学 电气工程学院, 江苏 徐州, 221000)

摘要:针对永磁同步电机低速无感运行时系统抖震以及估计转速不准确的问题,将变结构模型参考自适应观测器(SM-MRAS)应用到永磁同步电机无传感器控制中。开展了模型参考自适应观测器的基本原理分析,提出了用连续函数替代传统滑模变结构控制中的开关函数,给出了滑模面和自适应率的设计方法以及优化后的SM-MRAS转速辨识算法的框图,并对该算法的稳定性进行了严格的数学论证。在Matlab软件平台进行了仿真实验。研究结果表明,改进后的变结构模型参考自适应转速辨识算法有效消除了电机在低速时由于频繁开关而造成的系统震荡,避免了电机参数对算法的影响,在很宽的调速范围内都有良好的稳定性能。

关键词:永磁同步电机;滑模变结构;模型参考自适应观测器;无位置传感器

中图分类号:TM301;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)11-1410-05

Variable structure MRAS for PMSM sensor-less control

ZHOU Jia-hua¹, JIA Hong-ping¹, ZHANG Peng¹, HU Ya-zhe

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Aiming at the problem of system shock and inaccurate estimating speed in a low-speed PMSM sensor-less control, the model reference adaption observer of variable structures (SM-MRAS) was investigated to the PMSM sensor-less control. A method which used a continuous function to replace the switching function in traditional SM-MRAS was presented. The design method of sliding surface and adaptive rate was also presented. A block diagram of optimized SM-MRAS algorithm to identify motor speed was presented with rigorous math proof. This method was tested on the MATLAB. The results show that the model reference adaption observer of variable structures effectively eliminates the system shock causes by frequent switching, and the interference from motor parameter. It also has a good stability over a wide speed range.

Key words: PMSM; variable structure; MRAS; speed sensor-less

0 引 言

由于永磁同步电机具有体积小,效率高,转矩脉动小,转速高的优点,其被广泛应用于大功率压缩机,鼓风机,新能源电动汽车领域。为了实现高精度的转速闭环控制,一般使用机械式位置传感器测量电机转子

位置,但是高分辨率的位置传感器价值昂贵,且无法应用于恶劣环境,因此无传感器控制近年来成为国内外学者研究的重点。

目前,常用的无位置传感器检测算法主要包括高频信号注入法、滑模观测器算法、模型参考自适应算法以及扩展卡尔曼滤波算法。高频信号注入法要求电机

收稿日期:2016-05-31

基金项目:江苏大学高级人才启动基金资助项目(07JG013)

作者简介:周佳华(1990-),男,江苏常州人,硕士研究生,主要从事永磁同步电机控制方案方面的研究. E-mail: 497877583@qq.com

通信联系人:贾洪平,男,副教授,硕士生导师. E-mail: jiahongping5555@163.com

转子具有凸极效应,不适用于隐极永磁同步电机^[1]。滑模观测器利用了滑动模态的概念,把一般状态观测器中的控制回路以滑模变结构的形式设计,该方法对参数变化以及外部扰动不敏感,鲁棒性强,但进入滑动模态后的开关时间会使得滑模观测器呈现抖动现象^[2]。扩展卡尔曼滤波算法无需电机的机械参数和马达的初始位置信息,对参数变化具有鲁棒性,但该方法算法复杂,需要进行矩阵求逆运算,实现困难^[3-5]。传统的模型参考自适应算法(MRAS)是以 PMSM 电机自身作为参考模型,以其电流模型作为可调模型,利用两个模型输出的差值估算电机转速,再利用估算的转速值修正可调模型。但其动稳态性能只能在某一范围的速度内取得较好的效果,转速低于该范围容易引起检测转子位置的震荡,转速高于该范围会导致检测的位置相对于实际位置有较大的延迟^[6-7]。

本研究将滑模变结构控制引入到基于 MRAS 的永磁同步电机无位置传感器控制中,提出滑模变结构 MRAS 的转速辨识方法;以 PMSM 电机本体作为参考模型,PMSM 电机定子电流模型作为可调模型,利用两种模型输出的差值构造滑模面,避免电机参数对 MRAS 的影响;采用连续函数代替传统变结构控制中的开关函数,消除系统在低速时的抖震,并通过 Matlab 仿真验证该算法的可行性。

1 模型参考自适应速度观测器

1.1 永磁同步电机的数学模型

PMSM 电机在 dq 旋转坐标系中的数学模型为^[8-10]:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d, u_q —dq 轴定子电压; R —定子电阻; i_d, i_q —dq 轴定子电流; L_d, L_q —dq 轴电感; ω —电角速度; ψ_r —转子磁链。

1.2 传统的 MRAS 速度辨识系统

由于电机的定子电流方程中已经包含了转子角速度 ω ,PMSM 电机本身可以作为参考模型,其电流模型作为可调模型,两个模型的输出都是 i_d, i_q ,利用两个模型输出的差值,设计合适的自适应算法,估算转子位置和转速值,并利用估算的转速值来修正可调模型,这就是经典的模型参考自适应方法。

将式(1)中的 i_d, i_q 作为状态变量,得到其参考模型为^[11-12]:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L_d} i_d + \omega \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{1}{L_d} u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L_q} i_q - \omega \frac{L_d}{L_q} i_d - \omega \frac{\psi_r}{L_q} + \frac{u_q}{L_q} \end{cases} \quad (2)$$

其可调模型为:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_d}{dt} = -\frac{R}{L_d} \hat{i}_d + \hat{\omega} \frac{L_q}{L_d} \hat{i}_q + \frac{u_d}{L_d} \\ \frac{d\hat{i}_q}{dt} = -\frac{R}{L_q} \hat{i}_q - \hat{\omega} \frac{L_d}{L_q} \hat{i}_d - \hat{\omega} \frac{\psi_r}{L_q} + \frac{u_q}{L_q} \end{cases} \quad (3)$$

再根据 Popov 超稳定性理论可以得到电机角速度的估算式如下:

$$\begin{aligned} \hat{\omega} = & \int_0^t K_i \left[i_d \hat{i}_q - i_q \hat{i}_d - \frac{\psi_r}{L_d} (i_q - \hat{i}_q) \right] dt \\ & + K_p \left[i_d \hat{i}_q - i_q \hat{i}_d - \frac{\psi_r}{L_d} (i_q - \hat{i}_q) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

其中, i_d, i_q 可以从电机本身检测得到; $\hat{i}_d, \hat{i}_q$ 由可调模型估; K_p, K_i 为自适应率; $\hat{i}_d, \hat{i}_q, \hat{\omega}$ 的初始值应设置为 0。

给定合适的 PI 控制器参数,则可调模型估计的电流 $\hat{i}$ 和参考实际检测的电流 i 趋于一致,此时估计转速 $\hat{\omega}_r$ 和电机实际转速 ω_r 也近似相等,系统框图如图 1 所示。

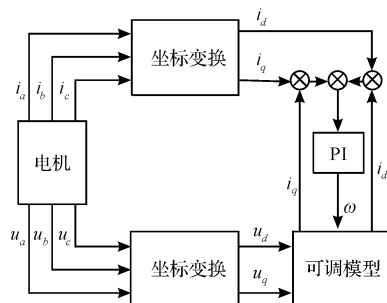


图 1 传统 MRAS 转速估计框图

2 滑模变结构 MRAS 的设计

2.1 滑模面的选取

滑模变结构 MRAS 的主要思想是选取可调模型作为永磁同步电机的电流模型,电机本体作为参考模型,利用好两个模型输出的电机的实际电流和估算电流的差构造滑模面,在进一步计算出电机的转速和转子位置。根据传统的 MRAS 的特点,构造滑模面如下:

$$S = i_d \hat{i}_q - \hat{i}_d i_q \quad (5)$$

2.2 控制律设计

在传统滑模变结构算法中,由于受到开关惯性以及系统采样频率的影响,滑动模态并不是理想的光滑

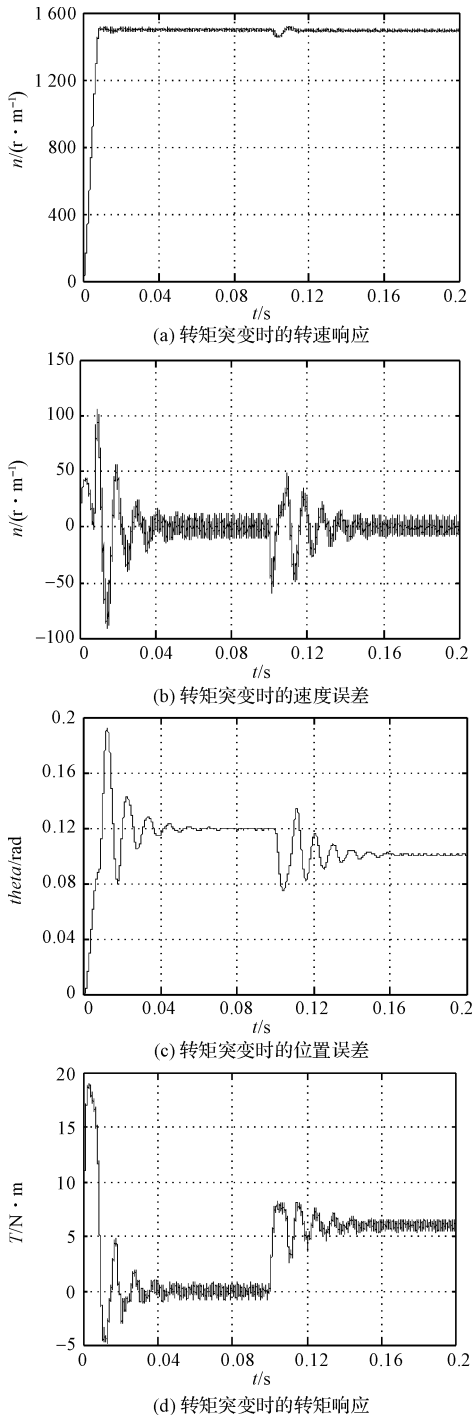


图 4 转矩突变时的系统响应

4 结束语

通过对传统的模型参考自适应观测器转速辨识算法的深入研究,并分析该算法的不足之处,本研究将滑模变结构控制与模型参考自适应算法相结合,并进行了严格的数学推导过程,从理论上论证了该算法的可行性。最后,在 Matlab 平台上搭建了仿真模型,通过对仿真结果的分析可以看出变结构模型参考自适应转速辨识算法具有良好的自适应性能和鲁棒性,并且能

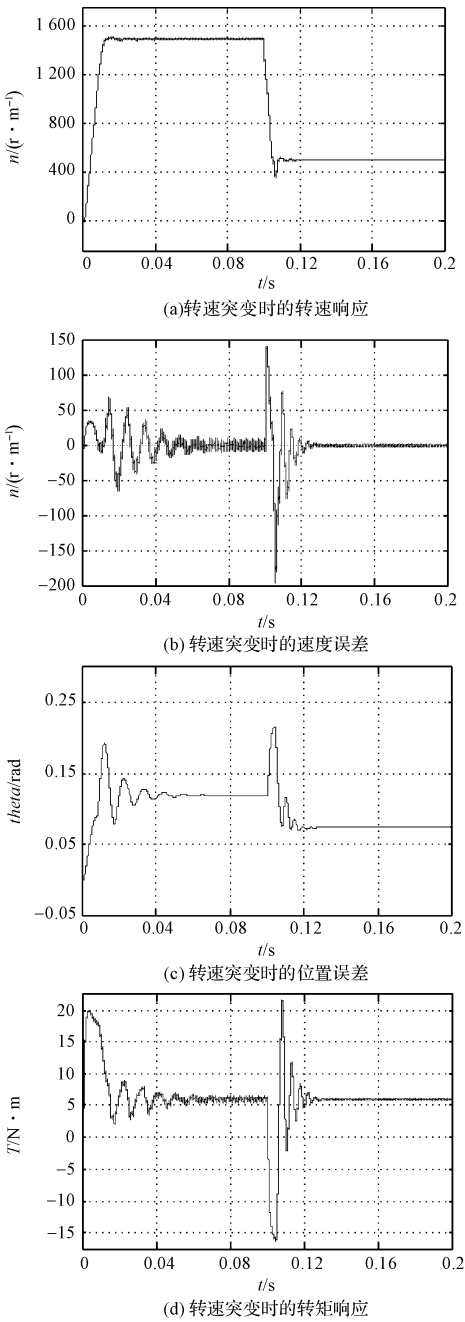


图 5 转速突变时的系统响应

有效减小电机低速运行时的系统抖震现象。

本研究的算法采用了连续函数替代了传统的 SM-MRAS 中的开关函数,导致了系统响应速度有所降低,因此在启动瞬间以及负载突变时,估算的转速会出现瞬间的震荡,稳态下估计转子位置和实际转子位置仍存在微小相差,没有彻底消除。因此,在接下来的研究中需要寻求合适的方法提高该算法的响应速度,消除系统稳态误差。

参考文献 (References):

[1] 贾洪平,贺益康. 基于高频注入法的永磁同步电机初始位置检测研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 15-

- 20.
- [2] 陈 东,贺益康,年 珩,等. 基于滑模观测器的永磁无轴
承电机控制[J]. 电机与控制应用,2008,35(10):9-13.
- [3] 尹忠刚,张瑞峰,钟彦儒. 基于抗差扩展卡尔曼滤波器的
永磁同步电机转速估计策略[J]. 控制理论与应用,2012,
29(7):921-927.
- [4] 王鑫博,白保东,于江华. 等. 基于改进模糊卡尔曼滤波的
感应电机转速估计策略[J]. 电机与控制学报,2014,18
(11):8-14.
- [5] 陈 振,刘向东,靳永强,等. 采用抗差扩展卡尔曼滤波磁
链观测器的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工
程学报,2014,18(11):8-14.
- [6] 夏长亮,祁温雅,杨 荣,等. 基于 RBF 神经网络的超声
波电机参数辨识与模型参考自适应控制[J]. 中国电机工
程学报,2004,24(7):117-121.
- [7] 李 岚,王娟平. 模型参考自适应转速辨识算法比较[J].
电气应用,2006,25(4):126-129.
- [8] 徐 静,段 芳,江天炎. 模糊 MRAS 方法在永磁同步电
机无速度传感器控制系统中的应用[J]. 电气应用,2015,
42(12):55-58.
- [9] 白 浩,崔建华,徐晓辉. 永磁无刷直流电机控制器研究
及展望[J]. 机电工程,2004,21(4):59-64.
- [10] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统:运动控制系统[M]. 北
京:机械工业出版社,2003.
- [11] FUKUMOTO T, HMAMA H, HAYASHI Y. PMSM Posi-
tion Sensor-less Drive System for Compressors using an A-
daptable Observer and Ajustment Method[J]. **Journal of
the Japan Institute of Power Electronics**,2006,32(0):
37-43.
- [12] Hua-Fen LV, Yun-Yue YE. Sensor-less control of low-
speed PMSM based on MRAS[J]. **Journal of Mechanical
& Electrical Engineering**. 2012,29(3):307-310.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

周佳华,贾洪平,张 鹏,等. PMSM 变结构 MRAS 无位置传感器控制研究[J]. 机电工程,2016,33(11):1410-1414.

ZHOU Jia-hua, JIA Hong-ping, ZHANG Peng, et al. Variable structure MRAS for PMSM sensor-less control[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2016,33(11):1410-1414.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1385 页)

- [11] EFE M O, KAYNAK O, YU X. Sliding mode control of a
three degrees of freedom anthropoid robot by driving the
controller parameters to an equivalent regime[J]. **Journal
of Dynamic Systems, Measurement and Control**,2001,
122(4):632-640.
- [12] TOPALOV A V, KAYNAK O. Online learning in adaptive
neurocontrolschemes with a sliding mode algorithm[J].
**IEEE Transactionson Systems, Man, and Cybernetics-
Part B: Cybernetics**,2001,31(2):445-450.
- [13] TOPALOV A V, CASCELLA G L, GIORDANO V F. et
al. Kaynak, Sliding mode neuro-adaptive control of electric
drives[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electron-
ics**,2007,54(1):671-679.
- [14] TOPALOV A V, KAYACAN E, ONIZ Y, et al. Adaptive
neurofuzzy control with sliding mode learning algorithm: ap-
plicationto antilock braking system[C]. **Proceeding of the
7th Asian Control Conference, Hong Kong: IEEE**,
2009,784-789.
- [15] Rafiq M, Rehman S, Rehman F, et al. Awan, A secon-
dorder sliding mode control design of a switched reluctance
motorusing super twisting algorithm[J]. **Simulation Mod-
elling Practice andTheory**,2012,25(6):106-117.
- [16] ISLAM M S, HUSAIN I, VEILLETTE R J, et al, Design
andperformance analysis of sliding-mode observers for sen-
sorlessoperation of switched reluctance motors[J]. **IEEE
Transactions onControl Systems Technology**, 2003, 11
(3):383-389.
- [17] ZHAN Y J, CHAN C C, CHAU K T. A novel sliding-mode
observerfor indirect position sensing of switched reluctance
motor drives[J]. **IEEE Transactions on IndustrialElec-
tronics**,1999,46(2):390-397.
- [18] UTKIN V, GULDNER G, SHI J. Sliding Mode Control in-
ElectroMechanical Systems (Second Edition) [M]. Boca
Raton: CRC Press LLC,2009.
- [19] SHTESSEL Y, EDWARDS C, FRIDMAN L A. Levant,
Sliding ModeControl and Observation [M]. NewYork:
Springer Science + Business Media,2014.
- [20] ZHANG P, CASSANI P A, WILLIAMSON S S. An accu-
rateinductance profile measurement technique for switched
reluctancemachines[J]. **IEEE Transactions on Industri-
al Electronics**,2010,57(9):2972-2979.
- [21] CHEOK A D, FUKUDA Y. A New Torque and Flux Con-
trol Methodfor Switched Reluctance Motor Drives [J].
IEEE Transactions on PowerElectronics,2002,17(4):
543-557.

[编辑:张 豪]