

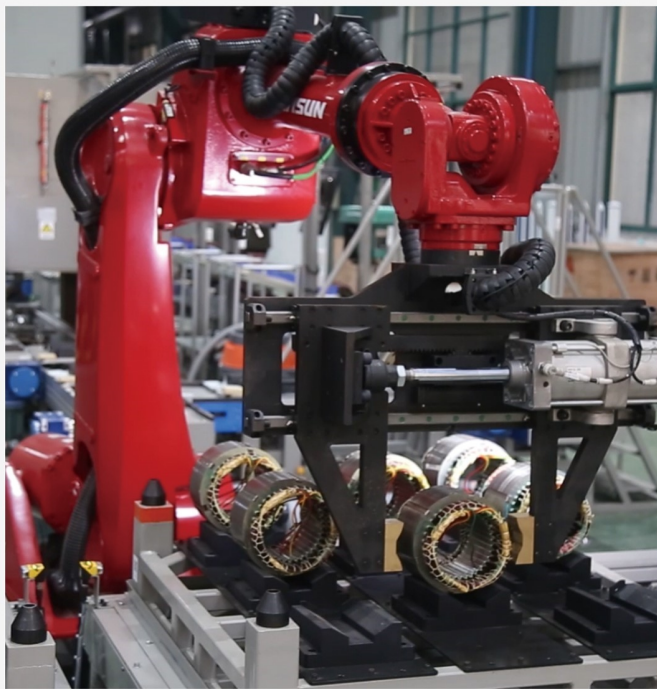
本文全文线上首发由  
上海电器科学研究所  
(集团) 有限公司  
支持

王晓东, 马强, 钱思琪, 杨桃桃.  
基于协同观测器的永磁同步电机  
无传感控制.  
电机与控制应用, 2021, 48(11):1.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)  
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

# 电机 · 智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系  
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388  
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司  
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司  
上海市武宁路505号9号楼6层

# 基于协同观测器的永磁同步电机无传感控制<sup>\*</sup>

王晓东<sup>1</sup>, 马 强<sup>1</sup>, 钱思琪<sup>1</sup>, 杨桃桃<sup>2</sup>

(1. 湖北文理学院 纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室, 湖北 襄阳 441053;

2. 中克骆瑞新能源科技有限公司, 湖北 襄阳 441116)

**摘 要:** 针对传统滑模观测器使用符号函数引起的抖振问题, 提出了一种基于连续函数的协同观测器方法, 实现永磁同步电机(PMSM)的无传感控制。首先, 研究 PMSM 的离散数学模型。其次, 建立  $k+1$  时刻的电流偏差和  $k$  时刻的电流偏差之间的函数关系。最后, 利用反正切函数计算转子位置并加入角度补偿, 提高观测精度。仿真结果表明, 所设计的协同观测器不仅无抖振现象, 还具有更高的估算精度及良好的抗干扰性能, 比传统滑模观测器可以更好地实现 PMSM 的无传感控制。

**关键词:** 永磁同步电机; 无传感控制; 协同观测器; 抖振

中图分类号: TM 341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)11-0001-05

doi: 10.12177/emca.2021.106

## Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Synergetic Observer<sup>\*</sup>

WANG Xiaodong<sup>1</sup>, MA Qiang<sup>1</sup>, QIAN Siqu<sup>1</sup>, YANG Taotao<sup>2</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle,

Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China;

2. Camel & Rimac New Energy Technology Co., Ltd., Xiangyang 441116, China)

**Abstract:** The chattering caused by using symbolic functions exists in the traditional sliding mode observer. In order to solve the problem, a synergetic observer method based on continuous function is proposed to realize the sensorless control of permanent magnet synchronous motor (PMSM). The discrete mathematical model of the PMSM is studied. The functional relationship between the current deviation at time  $k+1$  and that at time  $k$  is established. The arctangent function calculates the rotor position and adds angle compensation to improve the observation accuracy. The simulation results show that the designed synergetic observer has no chattering and has higher estimation accuracy and good anti-interference performance. It can better realize the sensorless control of the PMSM than the traditional sliding mode observer.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); sensorless control; synergetic observer; chattering

## 0 引 言

永磁同步电机(PMSM)无传感器控制技术通

过实时检测电机绕组中的电信号, 利用反电动势实现电机转子位置及速度的估算, 常用的基于反电动势的模型方法有滑模观测器<sup>[1]</sup>、模型参考自

收稿日期: 2021-08-02; 收到修改稿日期: 2021-09-18

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51307047); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201815); 中央引导地方科技发展专项项目(2020ZYD001)

作者简介: 王晓东(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源汽车动力系统测控。

马 强(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为控制理论及其在电机驱动中的应用。

适应<sup>[2]</sup>和扰动观测器<sup>[3]</sup>等。滑模观测器具有抗扰动强、鲁棒性好、对参数变化和外部干扰不敏感的优点,广泛应用于PMSM无传感控制中<sup>[4-5]</sup>,但传统的滑模观测器存在明显的抖振问题。祝新阳等<sup>[6]</sup>设计了全阶滑模观测器,采用Sigmoid作为切换函数,引入模糊控制柔化控制信号,有效降低了抖振。周贝贝等<sup>[7]</sup>提出一种基于幂次趋近律的滑模观测器,选择合适的幂次趋近律指数值能有效地削弱抖振。王国平等<sup>[8]</sup>在传统指数趋近律的基础上设计了增益随系统状态自适应变化的滑模控制律,抖振抑制效果明显,提高了系统稳定性。申永鹏等<sup>[9]</sup>设计了扩展滑模观测器,将扩展反电动势估算值反馈至定子电流观测环节,采用sat函数代替传统的sign函数,有效地改善了抖振现象。

本文提出了一种协同观测器方法用来完成PMSM的无传感控制。结合PMSM的离散数学模型和电流偏差函数关系建立观测器系统,并引入角度补偿提高观测精度。通过改变电机的转动惯量参数,实现扰动的加入。仿真验证了协同观测

器不存在抖振且具备良好的抗干扰性能,保证了系统估计的准确性。

## 1 PMSM 离散数学模型

PMSM在两相静止 $\alpha$ - $\beta$ 坐标系下的电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_\alpha/dt \\ di_\beta/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

式中: $u_\alpha$ 、 $u_\beta$ 为 $\alpha$ - $\beta$ 坐标系下的定子电压; $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ 为 $\alpha$ - $\beta$ 坐标系下的定子电流; $R_s$ 为定子电阻; $L_s$ 为定子等效电感; $e_\alpha$ 、 $e_\beta$ 为 $\alpha$ - $\beta$ 坐标系下的反电动势; $\psi_f$ 为永磁体磁链; $\theta$ 为转子位置角; $\omega_e$ 为转子角速度。

将式(1)的电压方程改写为电流状态方程形式:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \\ \frac{de_\alpha}{dt} \\ \frac{de_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & 0 & -\frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_s} & 0 & -\frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 & -p\omega_m \\ 0 & 0 & p\omega_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $p$ 为PMSM极对数; $\omega_m$ 为转子机械角速度。

对式(3)进行离散化处理,可得:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) \\ i_\beta(k+1) \\ e_\alpha(k+1) \\ e_\beta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s T_s}{L_s} & 0 & -\frac{T_s}{L_s} & 0 \\ 0 & 1 - \frac{R_s T_s}{L_s} & 0 & -\frac{T_s}{L_s} \\ 0 & 0 & 1 & -p\omega_m T_s \\ 0 & 0 & p\omega_m T_s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(k) \\ i_\beta(k) \\ e_\alpha(k) \\ e_\beta(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha(k) \\ u_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 2 协同观测器的设计

根据对PMSM数学模型的分析,设计基于协同观测器的无传感器矢量控制系统,连接观测系统与估计系统的输入输出信号,实时观测调整估计系统的内部状态,重构观测系统<sup>[10]</sup>。则协同观

测器可定义为

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = A\hat{x}_k + Bu_k + G(S_{k+1} - TS_k) \\ \hat{y}_k = C\hat{x}_k \end{cases} \quad (5)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为系数矩阵。

电流实际值与观测值误差矩阵 $S_k$ 为

$$S_k = \begin{bmatrix} i_\alpha - \hat{i}_\alpha \\ i_\beta - \hat{i}_\beta \end{bmatrix}_k \quad (6)$$

参考龙伯格观测器的设计过程<sup>[11]</sup>和协同控制器的收敛证明过程<sup>[12]</sup>,合理定义增益矩阵  $\mathbf{G}$  和速度收敛矩阵  $\mathbf{T}$ :

$$\begin{cases} \mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 \\ 0 & g_1 \\ g_2 & 0 \\ 0 & g_2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_1 & 0 \\ 0 & T_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

结合式(4)和式(5)可得协同观测器的数学模型为

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha(k+1) \\ \hat{i}_\beta(k+1) \\ \hat{e}_\alpha(k+1) \\ \hat{e}_\beta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s T_s}{L_s} & 0 & -\frac{T_s}{L_s} & 0 \\ 0 & 1 - \frac{R_s T_s}{L_s} & 0 & -\frac{T_s}{L_s} \\ 0 & 0 & 1 & -p\omega_m T_s \\ 0 & 0 & p\omega_m T_s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha(k) \\ \hat{i}_\beta(k) \\ \hat{e}_\alpha(k) \\ \hat{e}_\beta(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha(k) \\ u_\beta(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 & 0 \\ 0 & g_1 \\ g_2 & 0 \\ 0 & g_2 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) - \hat{i}_\alpha(k+1) \\ i_\beta(k+1) - \hat{i}_\beta(k+1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_1 & 0 \\ 0 & T_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(k) - \hat{i}_\alpha(k) \\ i_\beta(k) - \hat{i}_\beta(k) \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

式中:  $\hat{i}_\alpha$ 、 $\hat{i}_\beta$  为观测器估算电流;  $g_1$ 、 $g_2$  为观测器增益系数;  $T_1$ 、 $T_2$  为观测器收敛系数;  $\hat{e}_\alpha$ 、 $\hat{e}_\beta$  为观测器

估算的电机反电动势。

根据式(2)可通过反正切函数获得转子位置信息,即:

$$\hat{\theta}_e = -\arctan(\hat{e}_\alpha / \hat{e}_\beta) \quad (9)$$

在无传感控制过程中得到的反电动势估计值会含有高频信号分量,基于反正切函数的转子位置估计方法会放大这一误差,从而影响系统的控制性能<sup>[13]</sup>。因此,需要加入角度补偿<sup>[14]</sup>:

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}_e + \arctan(\hat{\omega}_e / \omega_c) \quad (10)$$

式中:  $\omega_c$  为低通滤波器的截止频率。

为获得转速信息,将式(10)进行求微分运算。对于表贴式三相 PMSM,此时转速估计值的表达式为

$$\hat{\omega}_e = \frac{\sqrt{\hat{e}_\alpha^2 + \hat{e}_\beta^2}}{\psi_f} \quad (11)$$

### 3 仿真与分析

基于 MATLAB/Simulink 搭建 PMSM 无传感控制的仿真模型,如图 1 所示。仿真相关参数如表 1 所示。

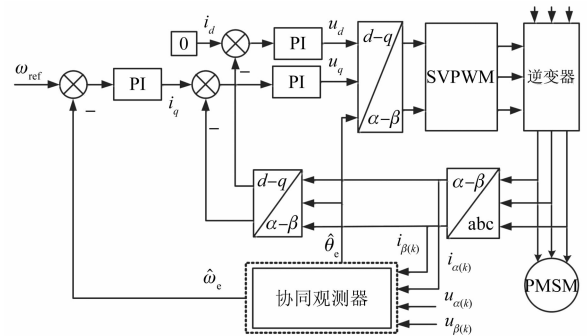


图 1 基于协同观测器的 PMSM 无传感控制系统

为验证协同观测器的速度突变性能,设置初始转速为 600 r/min, 0.03 s 时加速至 1 000 r/min, 0.06 s 时减速至 800 r/min。结果如图 2~图 4 所示,分别为转速估计波形、转速估计误差波形、位置估计误差波形。由图 2 可知,电机加减速阶段,传统滑模观测器波形整体抖动明显且线条较粗,而协同观测器的波形基本无抖动幅度较小且线条较细。由图 3 和图 4 可知,传统滑模观测器的转速估算误差范围为 -20 ~ 20 r/min 及位置估算最大误差约为 0.05 rad,且波形线条较粗。协同观测器的转速估算误差范围为 -0.1 ~

0.2 r/min 及位置估算最大误差约为 0.03 rad, 且波形线条较细。

表 1 电机仿真参数

| 参数名称                                 | 参数值                      |
|--------------------------------------|--------------------------|
| 定子电阻/ $\Omega$                       | 2.875                    |
| 电机极对数                                | 4                        |
| 转子磁链/Wb                              | 0.175                    |
| 直流侧电压/V                              | 311                      |
| 电感/mH                                | 8.5                      |
| 开关频率/kHz                             | 10                       |
| 阻尼系数                                 | 0                        |
| 转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | 0.001                    |
| $g_1, g_2, T_1, T_2$                 | 1, -70 722.497, 0.1, 0.1 |

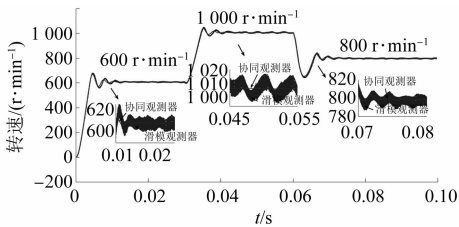


图 2 转速估计波形

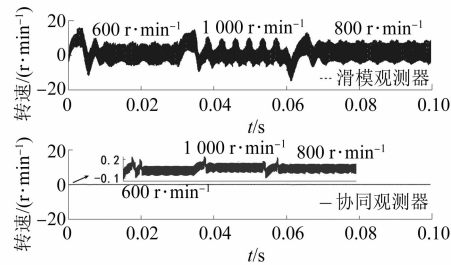


图 3 转速估计误差波形

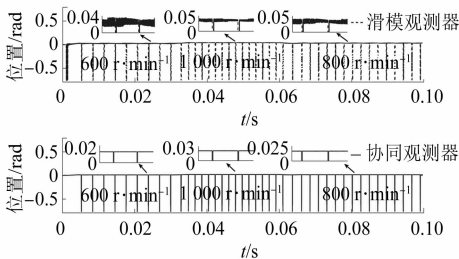


图 4 位置估计误差波形

为验证协同观测器的负载突变性能, 设置 0.03 s 时加载 5 N·m, 0.06 s 时加载至 10 N·m。结

果如图 5 所示, 在不同的转速阶段施加不同的负载, 传统滑模观测器的转矩波形抖动明显, 而协同观测器的转矩波形较平滑稳定。

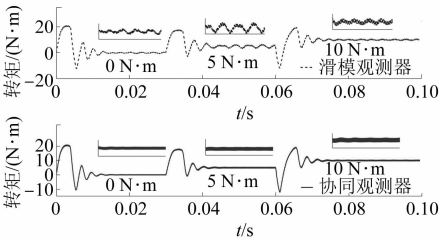


图 5 电机转矩波形

为验证协同观测器对参数变化的抗干扰性能, 改变转动惯量。50%  $J$  变化下的电机转矩波形、100%  $J$  变化下的电机转矩波形结果如图 6 和图 7 所示, 由图 6 和图 7 可知, 当电机转动惯量发生变化时, 协同观测器方法下的转矩波动幅度小、稳态响应时间短。特别是转动惯量降低时, 该方法比滑模观测器优势明显。

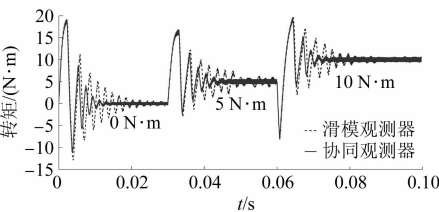


图 6 50%  $J$  变化下的电机转矩波形

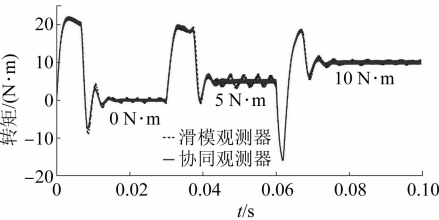


图 7 100%  $J$  变化下的电机转矩波形

由图 2~图 7 分析可知, 协同观测器相对滑模观测器无抖振现象, 电机转子位置及转速的估算精度提高, 对参数变化引起的干扰抵抗更强。

4 结 语

本文提出了一种协同观测器方法用于 PMSM 的无传感控制。通过对 PMSM 进行转速突变、负载突变和参数变化干扰, 仿真验证所设计的协同

观测器不存在抖振的问题,并且比传统的滑模观测器得到更精确的位置及转速估计信息,抗参数变化干扰能力更强,能够实现较好的 PMSM 无传感控制效果。

### 【参考文献】

- [1] 杨淑英,刘世园,李浩源,等. 永磁同步电机无位置传感器控制谐波抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(20): 6075.
- [2] 钟臻峰,金孟加,沈建新. 基于分段 PI 调节器的模型参考自适应永磁同步电动机全转速范围无传感器控制[J]. 中国电机工程学报,2018,38(4): 1203.
- [3] 赵春苗,舒志兵,王苏洲. 基于扰动观测器的 PMSM 鲁棒预测电流控制算法[J]. 机床与液压,2019,47(2): 130.
- [4] 丁立,和阳,吉敬华,等. 基于新型 SMO 的无位置传感器 PMSM 模型预测控制[J]. 电气传动,2020,50(7): 25.
- [5] 苏闯,侯龙,孙梦瑶. 基于滑模和自适应控制的无位置传感器 PMSM 换相研究[J]. 机床与液压,2020,48(14): 105.
- [6] 祝新阳,曾国辉,黄勃,等. 改进滑模观测器的永磁同步电机矢量控制[J]. 信息与控制,2020,49(6): 708.
- [7] 周贝贝,苏少平,徐会风,等. 基于幂次趋近律滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制系统研究[J]. 微电机,2019,52(5): 27.
- [8] 王国平,祝龙记. PMSM 无传感器控制新型滑模观测器设计[J]. 电力电子技术,2021,55(4): 12.
- [9] 申永鹏,刘安康,崔光照,等. 扩展滑模观测器永磁同步电机无传感器矢量控制[J]. 电机与控制学报,2020,24(8): 51.
- [10] ANDERSSON A, THIRINGER T. Motion sensorless IPMSM control using linear moving horizon estimation with Luenberger observer state feedback[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(2): 464.
- [11] 薛峰,储建华,魏海峰. 基于龙伯格扰动观测器的永磁同步电机 PWM 电流预测控制[J]. 电机与控制应用,2017,44(11): 1.
- [12] RADHIA E, KARIM C, DOMINIQUE S, et al. Design of faults detection synergetic observer[C]// 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2016.
- [13] 张文宾,缪仲翠,余现飞,等. 基于改进型滑模观测器的永磁同步电机分数阶微积分滑模控制[J]. 电机与控制应用,2018,45(7): 8.
- [14] 李江波,刘述喜,童磊. 基于滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制系统的优化研究[J]. 电机与控制应用,2018,45(11): 50.

### 【期刊简介】

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。