

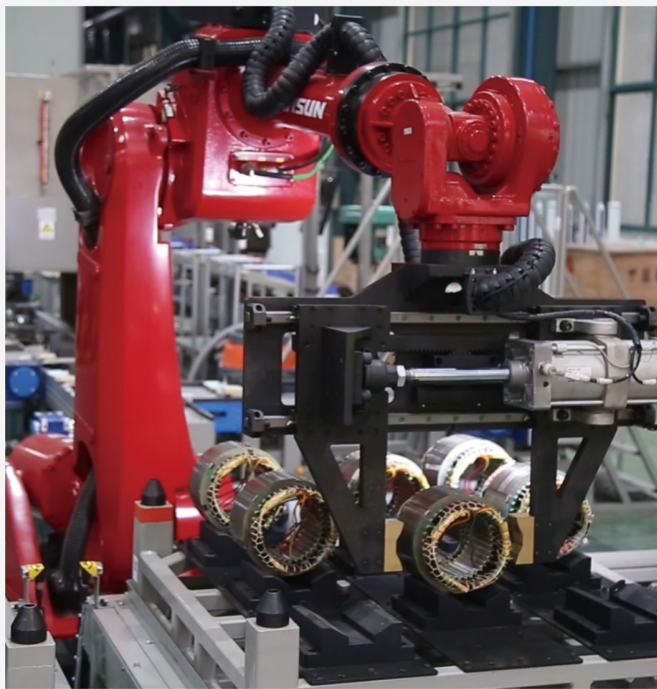
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

杨晨, 黄平林, 袁磊.
基于人工神经网络的永磁电机无传感器控制与实现.
电机与控制应用, 2022, 49(2): 20.



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

基于人工神经网络的永磁电机无传感器控制与实现

杨 晨, 黄平林, 袁 磊
(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212000)

摘 要: 无传感器控制可以降低永磁电机的成本, 并且提高系统的可靠性。永磁电机的电感等参数受运行工况影响会发生变化, 因而准确识别电机参数对提高电机的控制精度具有积极意义。基于永磁电机的电感模型, 采用人工神经网络对电机电感进行参数辨识, 再通过滑模观测器对转子角度进行观测, 实现永磁电机无位置传感器的矢量控制。利用 TI 公司的 TMS320F28379d DSP 作为控制芯片, 搭建了电机控制电路, 对所提控制策略进行了验证。结果表明, 该控制策略能实时准确地辨识电机参数, 提高控制精度, 改善控制性能。

关键词: 永磁电机; 人工神经网络; 滑模观测器; DSP

中图分类号: TM351; TM341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)02-0020-05

doi: 10.12177/emca.2021.190

Design and Realization of Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Artificial Neural Network

YANG Chen, HUANG Pinglin, YUAN Lei

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Sensorless control can reduce the cost of permanent magnet motor and improve the reliability of the system. Because the inductance and other parameters of permanent magnet motor change with the operating conditions, the accurate identification of motor parameters has a positive significance to improve the control accuracy of motor. Based on the mathematical model of permanent magnet motor, the parameters of motor inductance are identified by artificial neural network, and then the rotor angle is observed by sliding mode observer (SMO) to realize the sensorless vector control of permanent magnet motor. Using TI's TMS320F28379d DSP as the control chip, a motor control circuit is built to verify the above control strategy. The results show that the control strategy can accurately identify the motor parameters in real time, as well as improve the control precision and performance.

Key words: permanent magnet motor; artificial neural network; sliding mode observer (SMO); DSP

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)因其结构简单、可控性高、鲁棒性好、效率高和高功率因数运行等诸多优点而得到广泛应用^[1-3]。

在传统的磁场定向控制(FOC)中, PMSM 转子的位置角度信息由编码器测量和反馈。编码器存在潜在的不准确性和故障的风险, 还会增加控

制系统的成本与体积, 降低功率密度。因此, 采用无位置传感器的矢量控制也是该领域内的一个研究热点。文献[4]将模型参考自适应法(MRAS)用于船舶永磁同步推进电机的电阻与电感参数在线辨识, 使用低通滤波器过滤辨识电机参数后用于更新 MRAS 的电机模型。文献[5]提出了一种使用扩展卡尔曼滤波观测器(EKF)在线辨识内置式永磁电机磁链参数, 同时使用 MRAS 估计转子

收稿日期: 2021-08-02; 收到修改稿日期: 2022-01-19

作者简介: 杨 晨(1995—), 硕士研究生, 研究方向为机电控制。

黄平林(1976—), 博士, 高级工程师, 研究方向为机电控制、特种电机开发、电力电子技术。

袁 磊(1995—), 硕士研究生, 研究方向为电机电磁设计与仿真。

的转速与位置角的矢量控制策略,降低了位置角的估计误差。

无位置传感器控制算法需要使用电机的电气参数,如 d 、 q 轴电感等,构建电机模型参与运算。文献[6]将滑模观测器(SMO)与遗传算法辨识电机参数相结合,仿真结果验证了该控制方案具有较好的电机参数辨识能力。文献[7]使用神经网络动态调节滑模观测器的增益,仿真结果表明提高了滑模控制的稳定性。文献[8]验证了利用RBF神经网络代替传统的滑模观测器估算转子位置与转速的有效性。

PMSM 的电感参数在电机不同工况下容易发生变化^[9-10],因而影响电机的位置和速度的估计与控制精度。

本文在对 PMSM 电感分析的基础上,提出了一种人工神经网络(ANN)参数辨识与 SMO 相结合的无位置传感器矢量控制策略。利用人工神经网络对电机的 d 、 q 轴电感参数进行在线辨识,并将参数输入滑模观测器,对转子角度进行观测,进而实现电机的无位置矢量控制。采用TMS320F28379d DSP 作为主控芯片,开发了电机控制器,运用上述算法,实现了 PMSM 的精确控制,验证了上述方法的有效性。

1 永磁电机电感模型分析

为了研究 PMSM 的电感特性,本文选取研究的 PMSM 基本参数如表 1 所示。

表 1 电机的基本参数		
参数名称	参数值	
定子槽数	12	
转子极数	10	
定子外径/mm	76.0	
定子内径/mm	30.0	
槽深/mm	86.0	
气隙/mm	1.5	
磁钢厚/mm	3.0	
电机长度/mm	12.0	
绕组连接	星形	

本文通过建立该电机的二维有限元仿真模型,如图 1 所示,对电机不同工况下的电感参数进行仿真计算,再通过试验进行修正,得到 d 、 q 轴电

感在某一电流下随相位角变化、某一相位角随电流变化的波形如图 2 所示。

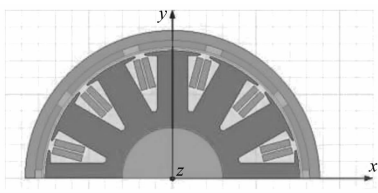


图 1 样机二维电磁仿真模型

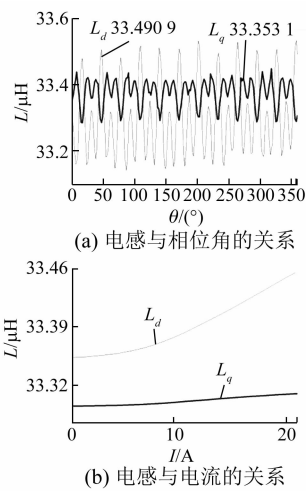


图 2 不同角度和电流下的 d 、 q 轴电感

从图 2 中可以看出, PMSM 的电感参数 L_d 与 L_q 随着负载电流的大小和相位变化,且三者之间相互耦合,互相影响,这为 PMSM 的参数辨识增加了困难。

2 电感参数的神经网络辨识

近年来,ANN 在参数辨识应用中得到了广泛关注。ANN 可以在不需要任何预定模型的前提下提供参数的非线性映射,适用于对电机电感参数的辨识。

本文采用 BP ANN 算法,利用前文获得的电机电感参数样本,对神经网络进行离线训练,得到输入层、隐含层与输出层之间相应的权重值与阈值,构建的神经网络模型如图 3 所示,神经网络的输入变量取 PMSM 定子电流有效值 I 和三相电流的相位角 θ 。网络输出变量为对应的 d 、 q 轴电感 L_d 和 L_q 。

为检验网络的准确性,随机抽取 100 组样本数据,输入网络,得到如图 4 所示的估算电感与样

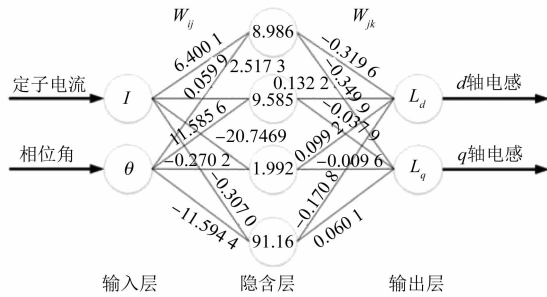


图3 神经网络拓扑图

本电感的拟合图及其误差图。

从图4中可以看出,当样本电感发生变化时,估算出来的电感值可以较好地跟随样本电感而相应变化,且估算的电感值较好地拟合了样本电感。估算电感 L_d 的绝对误差范围在 $[-0.028\ 4, 0.019\ 6]$ 内,相对误差不超过 0.059%,估算出来的电感 L_q 绝对误差的绝对值不超过 0.009 4,相对误差则小于 0.028 2%,两者辨识出来的误差均相对较小,说明辨识结果较为精准,可以将其运用到控制程序中,实现对复杂工况下电机参数的在线识别。

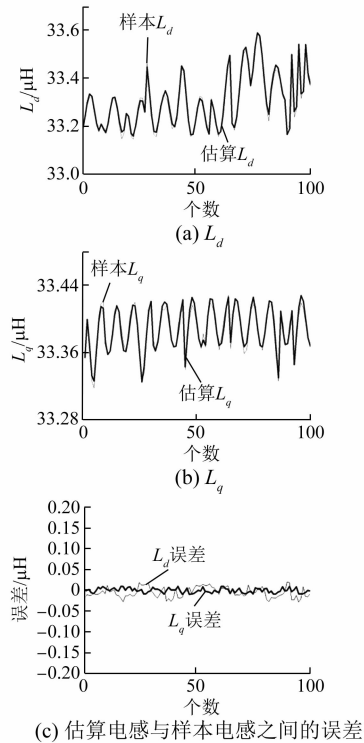


图4 估算电感与样本电感图

3 SMO 设计

为实现无位置传感器的矢量控制,本文采用 SMO 对电机转子角度进行观测。

选择滑模函数如下:

$$s(x) = \hat{i} - i \quad (1)$$

式中: $\hat{i}$ 为估计的电流值; i 为实际的电流值。

滑模面为

$$s(x) = \hat{i} - i = 0 \quad (2)$$

根据永磁电机的数学模型:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: i_α 和 i_β 为 $\alpha\beta$ 轴定子电流; V_α 和 V_β 为 $\alpha\beta$ 轴电压矢量; e_α 和 e_β 为 $\alpha\beta$ 轴反电动势。

给出滑模观测器的状态空间方程为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s}V_\alpha - \frac{k}{L_s}\text{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s}V_\beta - \frac{k}{L_s}\text{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{cases} \quad (4)$$

式中: k 为常数增益; sgn 为切换函数。

而

$$\text{sgn}(\hat{i}_s - i_s) = \begin{cases} -1, & \hat{i}_s - i_s < 0, \\ 1, & \hat{i}_s - i_s > 0. \end{cases} \quad (5)$$

这里令:

$$\begin{bmatrix} Z_\alpha \\ Z_\beta \end{bmatrix} = k \cdot \text{sgn} \begin{bmatrix} s_\alpha(x) \\ s_\beta(x) \end{bmatrix} \quad (6)$$

而:

$$\begin{bmatrix} s_\alpha(x) \\ s_\beta(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(6)、式(7)对比可得:

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = k \cdot \text{sgn} \begin{bmatrix} s_\alpha(x) \\ s_\beta(x) \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据 Z_α 与 Z_β 得到反电动势的估计值 $\hat{e}_\alpha$ 和 $\hat{e}_\beta$ 。

而反电动势与转子磁链、位置角的关系如下:

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \omega_r \psi_f \begin{bmatrix} -\sin\theta_r \\ \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: ψ_f 为转子磁链; ω_r 为转子角速度。

于是有:

$$\hat{\theta}_r = -\arctan\left(\frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}\right) + \Delta\theta_r \quad (10)$$

式中: $\Delta\theta_r$ 为初始的转子位置角。

转子角速度的估计值 $\hat{\omega}_r$ 为

$$\hat{\omega}_r = \frac{d\hat{\theta}_r}{dt} \quad (11)$$

根据上述的分析,得到 SMO 的结构框图如图 5 所示。

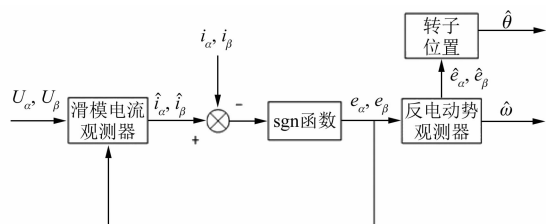


图 5 SMO 结构框图

4 DSP 控制实现与验证

为实现上述控制策略,选用 TI 公司 TMS320F28379d 型号的 DSP 作为主控芯片,开发了控制电路。TMS320F28379d 是一款功能强大的 32 位浮点 MCU,具有双核构架,每个内核可提供 200 MHz 的信号处理功能,能满足在线神经网络辨识和滑模运算的需求。根据控制策略,编写基于 SMO 的 SVPWM 无位置传感器矢量控制程序,程序框图如图 6 所示。完整的电机控制测试系统如图 7 所示。

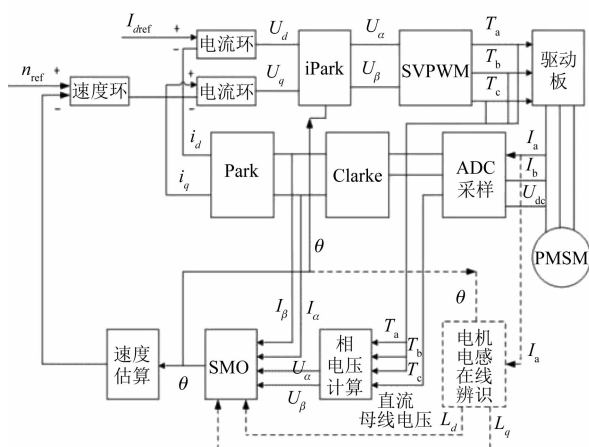


图 6 控制程序框图

在控制程序中,神经网络根据输入的滑模观测角与采样得到的相电流实时在线辨识电机的电

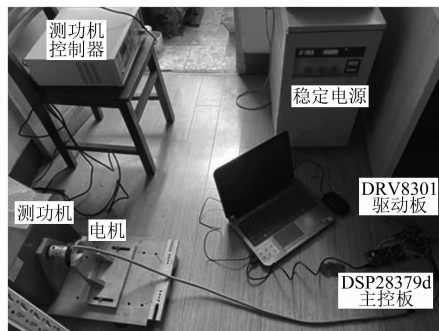


图 7 电机控制测试系统实物图

感 L_d 和 L_q ,而得到的 L_d 和 L_q 参与滑模观测器的运算来得到估算的位置角与电机转速完成矢量控制程序的闭环运算。

试验中,将离线训练好的神经网络程序加入到控制程序中,进行参数辨识。当给定 PWM 频率为 5 kHz,即神经网络每隔 0.2 ms 辨识一次电感参数,SMO 部分的电感参数每隔 0.2 ms 更新一次电感参数完成位置估计的运算。

在电机的运行过程中,随着电机位置角度的变化,估算的 d 、 q 轴电感值也随之变化,如图 8 所示,SMO 的电感参数也随之更新用于 SMO 的运算,该控制策略具有较好的实时性。

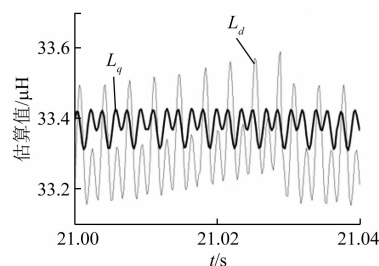


图 8 电机相电流为 2 A 时程序估算的 d 、 q 轴电感

在电机相电流为 2 A 时,在线辨识运行得到的 d 轴估计电感的平均值 $L_d = 33.529 \mu\text{H}$, q 轴估计电感的平均值 $L_q = 33.377 \mu\text{H}$ 。而仿真计算的平均数据为 $L_d = 33.409 \mu\text{H}$, $L_q = 33.334 \mu\text{H}$ 。试验结果与经过仿真计算得到的数据 L_d 相对误差约为 0.36%, L_q 相对误差约为 0.13%,辨识结果较为准确。

图 9 为电机处于闭环时的转速,可以看出,当给定转速为 600 r/min 时,带参数辨识系统时的转速在 600 r/min 左右,转速误差在 2~7 r/min 左右,转速平稳。而无参数辨识系统时的转速在

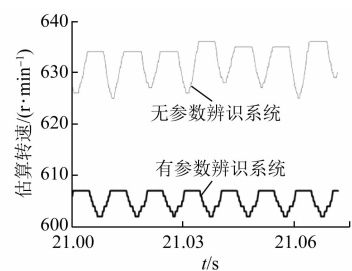


图9 600 r/min 估算转速比较

620 r/min 左右,而且误差大概在 25~36 r/min 左右,转速波动较大。

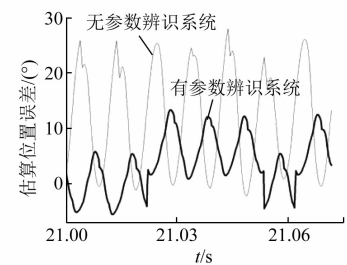


图10 600 r/min 转子位置估算误差角度比较

图10为转速闭环控制时滑模观测器估算的转子位置误差的比较,从图10中可以看出,有参数辨识系统估算出来的位置误差在-5°~13°之间,相对误差较小,而无参数辨识系统的位置误差最大值达到了27°,远大于有参数辨识系统的误差,且误差的波动较大。

在电机的负载试验过程中,电机同样设定转速为600 r/min,分别施加0.06、0.07和0.08 N·m的负载转矩,测得电源输出电流数值如表2所示。

表2 电机负载试验电流数值			
负载转矩/(N·m)	0.06	0.07	0.08
有参数辨识/A	1.35	1.40	1.45
无参数辨识/A	1.40	1.45	1.50

从表2中可以看出,在同一负载下,有参数辨识系统的电流值比无辨识小0.05 A左右,带参数辨识系统的矢量控制表现出更高的电流利用率,说明该控制策略具有更高的效率。

试验表明,基于神经网络参数辨识的滑模观测方法,在无传感器矢量控制中表现出了较好的实时性和控制精度,为电机的精确控制提供了思路。

5 结 语

(1) 本文采用 ANN 算法辨识永磁电机电感,通过对神经网络进行训练,实现了对不同工况下电机电感的准确识别。

(2) 将 ANN 参数辨识与 SMO 相结合,实现了永磁电机转子位置的准确识别,进而应用于永磁电机的无传感器矢量控制中。

(3) 应用功能强大的 DSP 芯片 TMS320F28379d,开发了基于 ANN 和 SMO 的永磁电机无位置传感器矢量控制器,试验结果表明该控制器具有良好的位置估计能力,以及更高的控制精度和效率。

【参考文献】

[1] 王高林,李卓敏,詹瀚林,等. 考虑逆变器非线性的内置式永磁同步电机转子位置锁相环观测器[J]. 电工技术学报,2014,29(3): 172.

[2] 宋桂英,李佳伦. IF 结合改进滑模观测器的 PMSM 无传感器复合控制[J]. 电机与控制学报,2020,24(11): 63.

[3] 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.

[4] 陈再发,刘彦呈,卢亨宇. 具有参数辨识的船舶永磁同步推进电机无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报,2020,24(3): 53.

[5] 史宇超,孙凯,马鸿雁,等. 内埋式永磁同步电机永磁磁链的在线辨识[J]. 电工技术学报,2011,26(9): 48.

[6] 孔丽丽,易春求,刘文通. 永磁同步电机无传感器控制及在线参数辨识[J]. 组合机床与自动化加工技术,2021(4): 105.

[7] 孙一品,丁学明. 基于 RBF 神经网络-滑模观测器的 PMSM 无传感器矢量控制[J]. 测控技术,2019,38(2): 137.

[8] 史婷娜,王向超,夏长亮. 基于 RBF 神经网络的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电工电能新技术,2007(2): 16.

[9] 吴昌隆,储剑波. 永磁辅助同步磁阻电机改进型滑模观测器无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用,2021,48(7): 26.

[10] 张有林. 无传感器永磁同步电机参数辨识技术的研究[J]. 电力电子技术,2017,51(6): 121.