[文章编号] 1003－4684(2025)05-0024-07

基于无传感器控制 PMSM 的高性能扰动观测器研究

韩 琨，张长征，袁 雷

（湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 为了提高无传感器控制电机的性能，引入超螺旋算法，提出一种超螺旋滑模扰动观测器对电机内外扰动进行估计，前馈至电机控制环来提高参数精确度。同时，模拟无传感器控制过程中受到扰动导致估计转子位置失准的工况，并与普通滑模扰动观测器进行比较，验证所设计的超螺旋滑模扰动观测器的性能。仿真结果表明，在转子位置不准确的工况下，所设计的超螺旋滑模扰动观测器抗扰动调整速度较传统滑模扰动观测器快 1.5 倍以上，提高了系统的鲁棒性，辅助低可靠性无传感器控制达到了预设控制效果。

[关键词] 无传感器控制；超螺旋算法；滑模扰动观测器；永磁同步电机

[中图分类号] TM351 [文献标识码] A

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor，PMSM)具有体积小、转动惯量比高、功率密度高、调速范围宽等优点，近年来在电动汽车、包装行业、航空航天、工业控制等诸多领域获得了越来越广泛地应用[1]。电控行业的蓬勃发展，机械式传感器的市场占比逐渐降低，常为控制成本而导致系统产生兼容性差、易受电磁干扰等问题，一旦发生故障，极易造成不可避免的损失。无传感器控制技术[2]通过利用电机绕组中的电信号，采用一定的控制算法对转子位置及速度进行估算，无传感器控制技术逐渐成为 PMSM 的控制趋势。国内外很多学者对 PMSM 无传感器控制理论开展研究并取得大量卓有成效的工作[3]，提出了很多先进的控制策略，包括模型参考自适应控制、预测控制、神经网络控制、滑模控制[4]等。

其中，滑模控制(sliding model control，SMC)对系统模型精度包容性高，对参数变化和外部扰动不敏感，是一种鲁棒性很强的控制方法[4]。在实际控制过程中，滑模控制容易出现因增益分配不均而产生过大的抖振现象，抑制抖振现象成为滑模控制的研究重点，设置不同的趋近律会有不同的趋近结果[5]。当系统扰动突增时，滑模控制需要通过扩大增益达到滑模条件，满足系统要求[6]。文献[7]通过设置扰动观测器对滑模控制中的误差值进行补偿，有效缓解了抖振现象，并且提高了系统的响应速度。文献[8]介绍了一种超螺旋算法，其二阶结构应用于模型参考自适应控制提高了控制效率。文献[9]介绍了滑模扰动观测器对电机负载进行实时追踪，但在负载突变时刻，增益过大引起的超调和抖振现象未作处理。文献[10]介绍了无传感器控制下 PMSM 高效的工作，体现了无传感器控制高精准电机参数估计效果，但考虑负载扰动变化单一，未考虑无传感器控制算法出现错误的情况。文献[11]通过设置一种新的滑模趋近律，有效降低了抖振现象，提高了滑模控制的效率。

基于上述问题，并考虑到内部参数摄动和外部负载扰动，本文设计了一种超螺旋滑模扰动观测器(STSMO)，可以对负载变化及内部参数进行误差估计前馈至控制环，提高了系统的鲁棒性能，也明显降低滑模控制中的抖振现象。除此之外，模拟无传感器控制出现故障的情况，设计仿真对比扰动观测器的性能，发现超螺旋滑模扰动观测器在转子位置不准确的情况下，依然保持良好的负载追踪效果，保持了滑模控制的鲁棒性能，也降低了抖振现象，不仅能够快速响应达到稳定状态，同时还有效减小电流脉动，抗扰动能力更强。

1 传统扰动观测器

1.1 永磁同步电机数学模型

表贴式永磁同步电机(SPMSM)是一个强耦合且复杂难以控制的非线性系统，其本体结构复杂。为了更好地控制 SPMSM，一般做如下假设：忽略定

[收稿日期] 2023－03－16

[基金项目] 国家自然科学基金(51507188)；国防科技重点实验室基金(6142217210301)；湖北工业大学博士科研启动基金(XJ2021000302)

[第一作者] 韩 琨(1999－)，男，山西长治人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为永磁同步电机交流电机控制。

[通信作者] 袁 雷(1984－)，男，河南虞城人，工学博士，湖北工业大学副教授，研究方向为电力电子与电力传动。

子转子铁芯磁阻、磁滞损耗和涡流损耗,保持转子永磁体的磁导率不变且与空气保持一致[12]。根据 SPMSM 中 d 轴、q 轴电感量相等,有 $L=L_d=L_q$,得到 d、q 轴下的定子电压方程:

$$\begin{cases} U_d = Ri_d + \dfrac{\mathrm{d}\psi_d}{\mathrm{d}t} - w_r\psi_q \\ U_q = Ri_q + \dfrac{\mathrm{d}\psi_q}{\mathrm{d}t} + w_r\psi_d \end{cases} \tag{1}$$

定子磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \tag{2}$$

电磁转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_q \left[i_d (L_d - L_q) + \psi_f \right] \tag{3}$$

运动方程为:

$$J\frac{\mathrm{d}w_m}{\mathrm{d}t} = T_e - T_L - Bw_m \tag{4}$$

$$w_r = p_n w_m \tag{5}$$

结合式(1)—(5),可得永磁同步电机模型:

$$\begin{cases} U_d = Ri_d + L_d\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} - \omega_r L_q i_q \\ U_q = Ri_q + L_q\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} + \omega_r(L_d i_d + \psi_f) \\ T_e = \dfrac{3}{2} p_n i_q \psi_f \\ \dfrac{J}{p_n}\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}w_r = T_e - T_L - \dfrac{B}{p_n}w_r \end{cases} \tag{6}$$

其中:U_d、U_q 分别为定子电压 d、q 轴分量;i_d、i_q 分别为定子电流 d、q 轴分量;R 为定子电阻;ψ_d、ψ_q 为定子磁链 d、q 轴分量;w_r 为电角速度,w_m 为电机机械角速度;L_d、L_q 分别为 d、q 轴电感分量;ψ_f 为永磁体磁链。

1.2　滑模扰动观测器

扰动观测器的实质是将系统运行过程中存在的扰动因素进行考虑,对运行过程中被控制系统本身参数变化带来的影响进行精确估计,对外界扰动和系统内部扰动进行动态观测,然后将扰动估计值前馈补偿至控制器消除扰动[13]。扰动观测器的基本结构如图 1 所示。

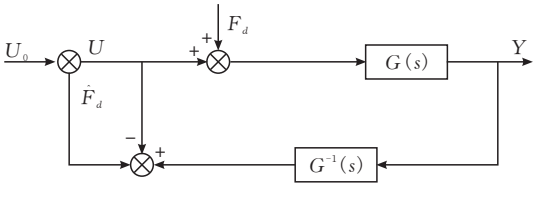


图 1　扰动观测器结构

如图 1 所示,U_0 是控制器的输出;U 是控制器的总输入;$G(s)$ 是被控对象;F_d 是外界扰动;$\hat{F}_d$ 是观测扰动,即:

$$\hat{F}_d = (U + F_d)G(s)G^{(-1)}(s) - U = F_d \tag{7}$$

当扰动观测器所估计到的观测扰动值与外界扰动值一致时,被控制对象可以有效避免扰动对系统带来的不利影响。

SPMSM 动态系统中易受到内外多重扰动,本体内部的电阻、电感、永磁体发生变化以及在紧急工作情况下的负载突变等[14]。在维持动态系统稳定的同时,保证扰动影响最小化并追求高的工作效率会是衡量 SPMSM 动态系统的一个标准。引入高性能扰动观测器对系统扰动值进行实时观测和精准估计,前馈至控制器中消除扰动。

由 SPMSM 的运动方程和电磁转矩方程可以得到 SPMSM 动态方程:

$$\frac{\mathrm{d}w_r}{\mathrm{d}t} = \frac{3p_n{}^2 i_q\psi_f}{2J} i_q - \frac{p_n}{J}T_L - \frac{B}{J}w_r \tag{8}$$

$$\text{定义}\begin{cases} a = a_n + \Delta a = \dfrac{3p_n\psi_f}{2J} \\ b = b_n + \Delta b = \dfrac{p_n}{J} \\ c = c_n + \Delta c = \dfrac{B}{J} \end{cases} \tag{9}$$

其中 a_n,b_n,c_n 为常规参数变量;Δa,Δb,Δc 为参数变化量。设 $r(t)$ 为扰动总和,满足下限制:$|r(t)| \leqslant l$,l 为系统扰动的限定值。在考虑电机运行过程中内部参数变化和外部扰动情况下:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}w_e}{\mathrm{d}t} = a_n i_q - cw_e + r(t) \\ \dfrac{\mathrm{d}r(t)}{\mathrm{d}t} = \delta(t) \end{cases} \tag{10}$$

构建滑模扰动观测器:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\hat{w}_e}{\mathrm{d}t} = a_n i_q - c\hat{w}_e + \hat{r}(t) + u_{\mathrm{smo}} \\ \dfrac{\mathrm{d}\hat{r}(t)}{\mathrm{d}t} = g u_{\mathrm{smo}} \end{cases} \tag{11}$$

滑模扰动观测器的基本结构如图 2 所示。

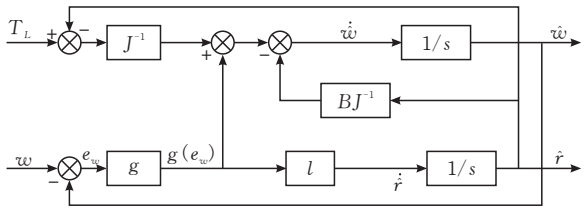


图 2　滑模扰动观测器结构

2　超螺旋滑模扰动观测器

无传感器控制永磁同步电机技术逐渐代表了电机控制的趋势[15],无传感器控制技术革新了电机控制的方式,但同时带来了潜在问题,电机在运行过程中受到扰动会出现转子位置估算不准确的情况,这会带来电机工作的安全问题,导致不可避免的后果。高性能的扰动观测器应当具有这种辅助无传感器控

制的能力，当无传感器控制中的转子位置出现偏差时，扰动观测器可以实时观测，并且提供高效的扰动补偿。

2.1 超螺旋算法

无传感器控制因扰动导致转子位置因为受到扰动而变得不精确时，则常见扰动观测器提供不了准确的估计值，严重影响电机控制的效率[16]。为解决此类问题，本文引入超螺旋算法[17]，设计了一种高性能的超螺旋滑模扰动观测器，当无传感器控制出现转子误差时，依然可以提供准确的扰动估计，使电机达到预设目标。

引入超螺旋算法并结合滑模控制得到超螺旋滑模，滑模控制具有良好的动态稳定性，超螺旋滑模是一种二阶滑模，二阶滑模的结构有效地抑制了抖振现象[18]。下面给出超螺旋滑模的基本形式：

$$\begin{cases}\dot{s}=-k_1\mid s\mid^{\frac{1}{2}}\operatorname{sign}(s)-u\\ \dot{u}=-k_2\operatorname{sign}(s)\end{cases}\tag{12}$$

式中：s、u 为状态变量；k_1、k_2 为滑模增益系数。得到超螺旋滑模扰动观测器表达式：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\hat{w}_e}{\mathrm{d}t}=a_n i_q-c\hat{w}_e+\hat{r}(t)+k_1\mid s\mid^{\frac{1}{2}}\operatorname{sign}(s)\\ \dfrac{\mathrm{d}\hat{r}(t)}{\mathrm{d}t}=k_2\operatorname{sign}(s)\end{cases}\tag{13}$$

误差动态方程：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}e_1}{\mathrm{d}t}=-c_n e_1+e_2+k_1\mid s\mid^{\frac{1}{2}}\operatorname{sign}(s)\\ \dfrac{\mathrm{d}e_2}{\mathrm{d}t}=k_2\operatorname{sign}(s)-\delta(t)\end{cases}\tag{14}$$

其中：

$$\begin{cases}e_1=\hat{w}_e-w_e\\ e_2=\hat{r}(t)-r(t)\end{cases}\tag{15}$$

$s=e_1$ 为滑模面。

2.2 稳定性验证

根据 Lyapunov 定理[19]，选取状态矢量为：

$$\boldsymbol{Z}=[Z_1\quad Z_2]^{\mathrm{T}}=\left[\mid s\mid^{\frac{1}{2}}\operatorname{sign}(s)\quad u\right]^{\mathrm{T}}\tag{16}$$

式中：Z_1、Z_2 为选取得状态变量，对状态变量求导有：

$$\begin{cases}\dot{Z}_1=\dfrac{1}{2}\mid s\mid^{-\frac{1}{2}}\dot{s}=\\ \qquad\dfrac{1}{2}\mid s\mid^{-\frac{1}{2}}(-k_1\mid s\mid^{\frac{1}{2}}\operatorname{sign}(s)-u)\\ \dot{Z}_2=\dot{u}=-k_2\operatorname{sign}(s)\end{cases}\tag{17}$$

又有 $\mid Z_1\mid=\mid s\mid^{\frac{1}{2}}$，$\dfrac{1}{\mid Z_1\mid}=\mid s\mid^{-\frac{1}{2}}$，则

$$\begin{cases}\dot{Z}_1=\dfrac{1}{2\mid Z_1\mid}(-k_1Z_1+Z_2)\\ \dot{Z}_2=-\dfrac{k_2}{\mid Z_1\mid}Z_1\end{cases}\tag{18}$$

设新的状态变量为 $Z=[Z_1\quad Z_2]^{\mathrm{T}}$，并定义 Lyapunov 函数为：

$$V_0=(\beta+4\varepsilon^2)Z_1^2+Z_2^2-4\varepsilon Z_1Z_2=Z^{T}PZ\tag{19}$$

其中：$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}\beta+4\varepsilon^2 & -2\varepsilon\\ -2\varepsilon & 1\end{bmatrix}$，显然矩阵 $\boldsymbol{P}$ 为正定矩阵，因而 Lyapunov 函数 $V_0\geqslant 0$。

对 Lyapunov 函数求导：

$$\begin{aligned}\dot{V}_0&=2(\beta+4\varepsilon^2)Z_1\dot{Z}_1+2Z_2\dot{Z}_2-4\varepsilon\dot{Z}_1Z_2-4\varepsilon Z_1\dot{Z}_2=\\ &-\frac{k_1}{\mid Z_1\mid}(\beta+4\varepsilon^2)Z_1^2+\frac{1}{\mid Z_1\mid}(\beta+4\varepsilon^2)Z_1Z_2-\\ &\frac{2k_2}{\mid Z_1\mid}Z_1Z_2+\frac{2k_1\varepsilon}{\mid Z_1\mid}Z_1Z_2-\frac{2\varepsilon}{\mid Z_1\mid}Z_2^2+\frac{4k_2\varepsilon}{\mid Z_1\mid}Z_1^2=\\ &-\frac{1}{\mid Z_1\mid}Z^{\mathrm{T}}QZ\end{aligned}\tag{20}$$

其中：

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}-4k_2\varepsilon+k_1(\beta+4\varepsilon^2) & -\frac{1}{2}(\beta+4\varepsilon^2)+k_2-k_1\varepsilon\\ -\frac{1}{2}(\beta+4\varepsilon^2)+k_2-k_1\varepsilon & 2\varepsilon\end{bmatrix}\tag{21}$$

为确保矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 为正定矩阵，令：

$$k_2=k_1\varepsilon+\frac{1}{2}(\beta+4\varepsilon^2)\tag{22}$$

则矩阵变为：

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}(k_1-2\varepsilon)(\beta+4\varepsilon^2)-4k_1\varepsilon^2 & 0\\ 0 & 2\varepsilon\end{bmatrix}\tag{23}$$

当 $k_1>\dfrac{2\varepsilon(\beta+4\varepsilon^2)}{\beta}$，确保矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 特征值大于 0，为正定矩阵。

根据 Lyapunov 函数稳定性判断依据，当矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 是正定矩阵时，矩阵 $\dot{\boldsymbol{V}}_0$ 是负定的，当超螺旋滑模增益系数 k_1，$k_2>0$ 时，矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 满足正定条件，所以系统在平衡点是渐近稳定的，即所设计的超螺旋滑模是稳定的。

2.3 控制策略

无传感器控制永磁同步电机首先要保证无传感器控制提供准确转子位置角[20]，可靠性能高的无传感器控制算法具有强抗干扰性能，在受到系统强烈扰动情况下输出误差在可承受范围的转子位置角，确保被控电机可以完成预设工作，达到预设目标。

一般无传感控制中的算法可靠性较低，在受到突然扰动会出现大的转子误差，因此本文采取扰动观测器对无传感器控制进行补偿，这也势必会成为之后的无传感器控制电机的一大趋势。所设置扰动观测器应当对系统扰动反应敏感，且具有强的鲁棒性能，以提高无传感器控制的抗干扰能力。

本文采取低可靠性无传感控制提供转子位置角，当系统扰动明显时，转子位置角会出现严重失

准，设计超螺旋滑模扰动观测器对转子位置角和系统进行补偿，对电机无传感控制系统进行辅助补偿，达到了良好效果，验证了所设计超螺旋滑模扰动观测器对无传感控制的高性能（图 3）。

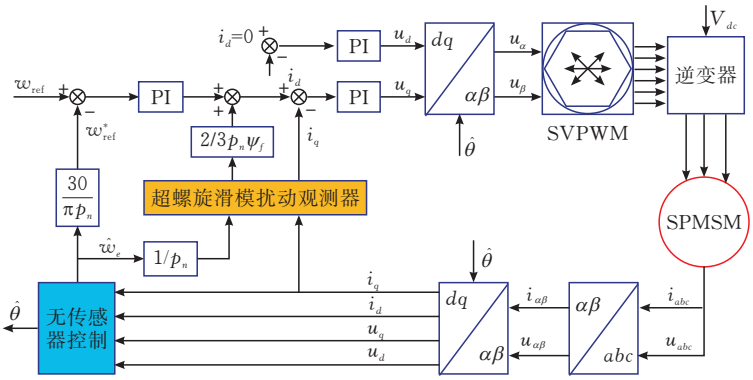


图 3　基于超螺旋滑模扰动观测器的无传感器控制系统结构

3　仿真验证

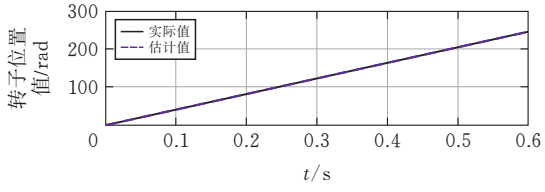
本文以 Matlab/SIMULINK 为平台进行仿真研究，来验证两种观测器的有效性。为了验证所设计超螺旋滑模扰动观测器的性能，仿真参数见表 1。

表 1　永磁同步电机仿真参数

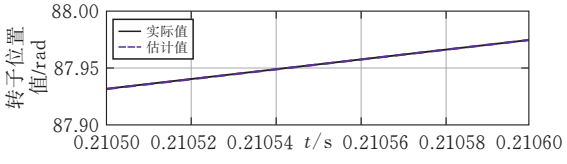
参数名称	参数值
阻尼系数/(N·m·s)	0.003
转动惯量/(kg·m²)	0.006
定子电阻/Ω	2.875
直交轴电感/mH	8.5
极对数	4
磁链/Wb	0.175

本文设计了两种仿真研究方案：

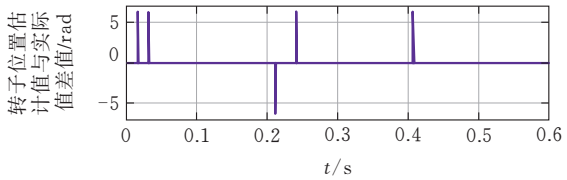
方案一，模拟无传感器控制下提供准确转子位置角的工况见图 4，分别采用滑模扰动观测器和超螺旋滑模扰动观测器进行对比仿真分析。



(a)转子位置跟踪情况 1



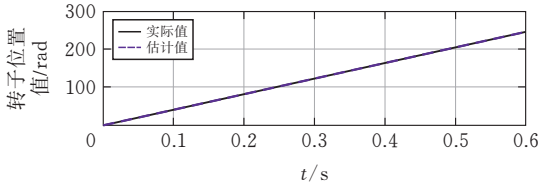
(b)转子位置跟踪情况 2



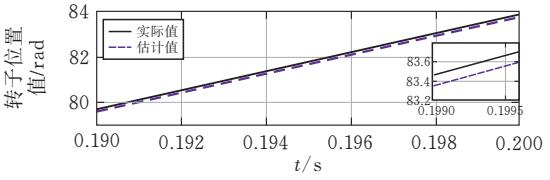
(c)转子位置估计误差

图 4　转子位置估计准确

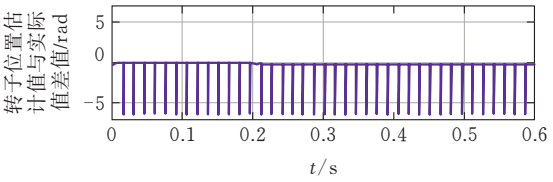
方案二，模拟无传感器控制下因扰动无法提供准确的转子位置角的工况见图 5，分别采用滑模扰动观测器和超螺旋滑模扰动观测器进行对比仿真分析。



(a)转子位置跟踪情况 1



(b)转子位置跟踪情况 2



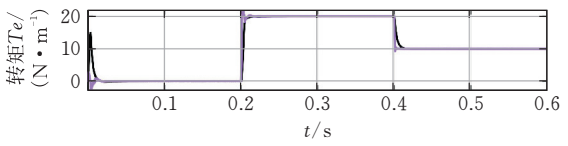
(c)转子位置估计误差

图 5　转子位置估计失准

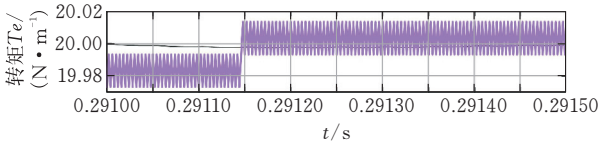
3.1　基于无传感器控制提供准确转子位置角的仿真分析

仿真中，系统参考转速为 1 000 r/min，电机空载启动，在 0.2 s 时突加负载 20 N·m，0.4 s 时突降负载至 10 N·m，系统采取无传感器控制，提供准确转子位置角，对两种扰动观测器设置合适参数，使系统达到稳定，分别从负载追踪情况，系统动态性能以及转矩估计误差来进行对比，仿真结果如图 6、图 7 所示。

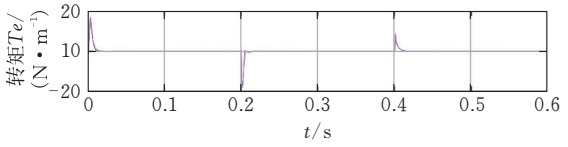
从仿真结果可以看出，当电机从零速上升到参考转速 1 000 r/min 时，两种扰动观测器都有一定



(a)跟踪情况



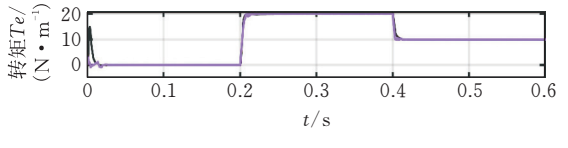
(b)抖振情况



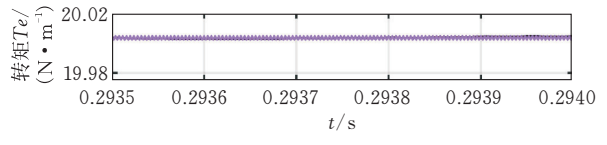
(c)转矩估计误差

图 6 滑模扰动观测器的仿真结果

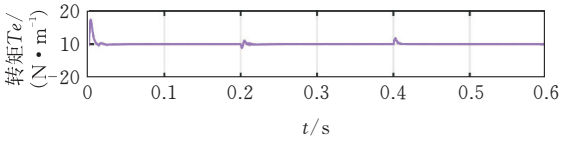
的超调量,0.2 s 负载突变时,对比两种扰动观测器,超螺旋滑模扰动观测器转矩恢复时间为 0.054 s,滑模扰动观测器转矩恢复时间为 0.061 s;0.4 s 负载突变时,对比两种扰动观测器,超螺旋滑模扰动观测器转矩恢复时间为 0.025 s,滑模扰动观测器转矩恢复时间为 0.051 s。



(a)跟踪情况



(b)抖振情况



(c)转矩估计误差

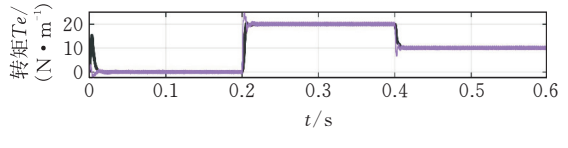
图 7 超螺旋滑模扰动观测器的仿真结果

由图 6、图 7 来看,超螺旋滑模扰动观测器在负载突变时超调恢复时间较短,滑模动态稳定性好,较滑模扰动观测器抖振大幅度降低。在负载突变时分析转矩估计误差,滑模扰动观测器受到大负载扰动瞬间,估计转矩误差波动量较大,分别为 18.7 N·m 和 4.7 N·m,超螺旋滑模扰动观测器转矩估计误差波动量稳定在 0.65 N·m。

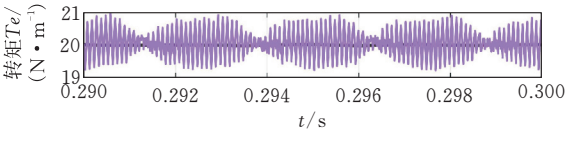
仿真结果表明,改进后的超螺旋滑模扰动观测器的有效性,提高了系统受到扰动后的反应灵敏度,在无传感器控制提供准确转子位置角情况下,达到了转矩误差小和转矩跟踪效果良好的预设目的,明显降低了滑模控制中的抖振现象,具有光滑平稳的工作波形,提高了系统的鲁棒性能和动态稳定性。

3.2 基于无传感器控制提供转子位置角失准仿真分析

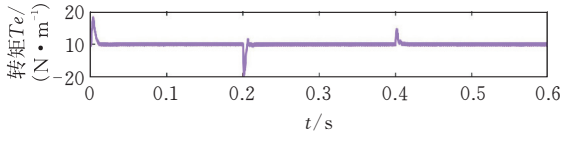
仿真中,系统参考转速为 1 000 r/min,电机空载启动,在 0.2 s 时突加负载 20 N·m,0.4 s 时突降负载至 10 N·m,模拟系统无传感器控制提供转子位置角不准确的情况,对两种扰动观测器设置合适参数,使系统达到稳定,分别从负载追踪情况,系统动态性能以及转矩估计误差来进行对比,仿真结果见图 8、图 9。



(a)跟踪情况

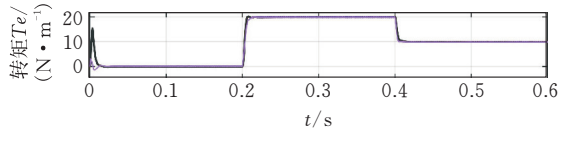


(b)抖振情况

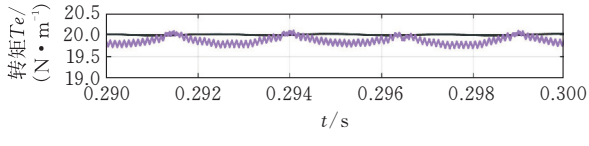


(c)转矩估计误差

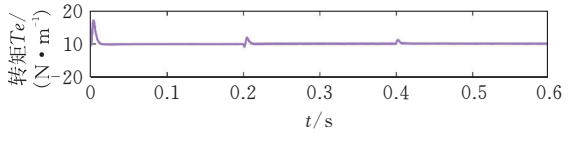
图 8 滑模扰动观测器的仿真结果



(a)跟踪情况



(b)抖振情况



(c)转矩估计误差

图 9 超螺旋滑模扰动观测器的仿真结果

从以上仿真结果可以看出,当电机从零速上升到参考转速 1 000 r/min 时,两种扰动观测器都有一定的超调量,0.2 s 负载突变时对比两种扰动观测器,超螺旋滑模扰动观测器转矩恢复时间为 0.054 s,滑模扰动观测器转矩恢复时间为 0.081 s;

0.4 s负载突变时对比两种扰动观测器，超螺旋滑模扰动观测器转矩恢复时间为 0.019 s，滑模扰动观测器转矩恢复时间为 0.062 s；由图 8、图 9 来看，超螺旋滑模扰动观测器在负载突变时超调恢复时间极短，滑模动态稳定性好，较滑模扰动观测器抖振大幅度降低。在负载突变时分析转矩估计误差，滑模扰动观测器受到大负载扰动瞬间，估计转矩误差波动量较大，分别为 19.7 N·m 和 3.9 N·m，超螺旋滑模扰动观测器转矩估计误差波动量稳定在 0.75 N·m。

仿真结果表明，超螺旋滑模扰动观测器的有效性，在无传感器控制不能提供准确转子位置角情况下，保持了系统受到扰动后的反应灵敏度，达到了转矩误差小和转矩跟踪效果良好的预设目的，明显降低了滑模控制中的抖振现象，具有平稳的工作波形，提高了系统的鲁棒性能和动态稳定性。

4　结论

本文对无传感器控制永磁同步电机的可靠性进行探究，将低可靠性无传感器控制电机过程中转子位置估计不转确设计为主要设计工况，探寻无传感器控制电机的普遍性、广泛性。所引用超螺旋算法和滑模控制设计一种高性能扰动观测器，对低可靠性无传感器控制电机进行辅助控制，可以补偿无传感器控制因扰动失准的工况，代表了无传感器控制电机的下一个大趋势，即利用高性能的扰动观测器对系统进行动态调稳。

经仿真验证，所设计超螺旋滑模扰动观测器在无传感器估计转子位置准确工况下表现出远超常规扰动观测器的性能；在无传感器估计转子位置失准的工况下，误差范围较常规扰动观测器大大缩小，并且表现出良好的动态稳定性、也体现所设计超螺旋滑模扰动观测器的高性能，抗扰动性能优越，对无传感器控制电机有极佳的辅助作用。

[参 考 文 献]

[1] 袁雷，胡冰新，魏克银，等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京航空航天大学出版社，2016.

[2] 韩琨，张长征，袁雷.基于超螺旋滑模扰动观测器的永磁同步电机无传感器抗干扰控制策略研究[J].包装工程，2023，44(03)：139-147.

[3] 陆娆泉. 永磁同步电机无传感器矢量控制技术研究[D].南京：东南大学，2016.

[4] 刘旭东，李珂，张奇，等.基于非线性扰动观测器的永磁同步电机单环预测控制[J].中国电机工程学报，2018，38(07)：2153-2162.

[5] 刘京，李洪文，邓永停.基于扰动观测器的永磁同步电机电流环自适应滑模控制[J].光学精密工程，2017，25(05)：1229-1241.

[6] 刘兴邦，付朝阳，刘铮，等.基于扰动补偿和非奇异终端滑模器的永磁同步电机矢量控制[J].西北工业大学学报，2022，40(02)：316-322.

[7] TEKLU A，GE X，HUIMIN W，et al. A new frequency adaptive second-order disturbance observer for sensorless vector control of interior permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2021，68(12)：11847-11857.

[8] ZHANG T，XU Z，LI J，et al. A third-order super-twisting extended state observer for dynamic performance enhancement of sensorless IPMSM drives [J]. Ieee Transactions on Industrial Electronics，2020，67(07)：5948-5958.

[9] SONG J，ZHENG W X，NIU Y .Self-triggered sliding mode control for networked pmsm speed regulation system：a PSO-optimized super-twisting algorithm. [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2022，69(01)：763-773.

[10] 胡蓉. 基于滑模观测器的永磁同步电机矢量控制研究[D].成都：西南交通大学，2014.

[11] 臧小龙. 基于自适应超螺旋算法的永磁同步电机调速控制[D].镇江：江苏大学，2021.

[12] 孙恺英，李冬辉，姚乐乐，等.基于新型超螺旋滑模自适应观测器的永磁同步电机转速估计策略[J].高电压技术，2020，46(11)：3771-3781.

[13] 王晓远，刘铭鑫，陈学永，等.电动汽车用 PMSM 带滤波补偿三阶滑模自抗扰控制[J].电机与控制学报，2021，25(11)：25-34.

[14] 张雅歌. 纯电动汽车用永磁同步电机无位置传感器控制研究[D].长春：吉林大学，2018.

[15] 英钊. Buck 变换器滑模控制系统的时域/频域分析[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2021.

[16] 程涛，李红岩.超螺旋滑模控制的永磁同步电机 DTC 优化[J].国外电子测量技术，2022，41(01)：1-7.

[17] HOU Q K，DING S H，XINGHUO YU. A super-twisting-like fractional controller for SPMSM drive system [J]. Ieee Transactions on Industrial Electronics，2022，69(09)：9376-9384.

[18] 杨洁. 高阶滑模控制理论及其在欠驱动系统中的应用研究[D].北京：北京理工大学，2015.

[19] 戴旺坷. 永磁同步电机无模型滑模鲁棒容错控制研究[D].株洲：湖南工业大学，2022.

[20] 薛建峰，王景芹，杨昭.多感应电机相邻交叉耦合快速终端滑模同步控制[J].包装工程，2017，38(07)：173-177.

Research on High Performance Disturbance Observers Based on Sensorless PMSM

HAN Kun, ZHANG Changzheng, YUAN Lei

(*Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: In order to improve the performance of sensorless controlled motors, this paper introduces a super-twisting algorithm and proposes a super-twisting sliding mode disturbance observer to estimate the internal and external disturbances of the motor, which feeds forward to the motor control loop to improve the parameter accuracy. What is more, the working condition of inaccurate rotor position estimation caused by disturbance during sensorless control is simulated, and the performance of the designed super-twisting sliding mode disturbance observer is verified by comparison with ordinary sliding mode disturbance observer. The simulation results show that the designed super-twisting sliding mode disturbance observer is more than 1～1.5 times faster than that of the traditional sliding mode disturbance observer under the condition of inaccurate rotor position, which assists low-reliability sensorless control to achieve the preset control effect.

Keywords: sensorless control; super-twisting algorithm; sliding mode disturbance observer; permanent magnet synchronous motor

[责任编校: 赵 瞳]

(上接第 10 页)

Textile Silk-screen Image Segmentation Algorithm Based on Multi-texture Features

SHEN Yang, ZHU Hao, SHEN Pingfeng, DU Lingwei, WANG Chongyu, ZHOU Minggang

(*School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: High accuracy is required in the detection of textile screen printing. Due to the complexity and variability of the texture background, it is difficult to segment images by a generalized algorithm accurately. Gray histogram is regarded as the probability density function of unimodal distribution. The double moving average value was applied to obtain the peak, and the maximum density interval was obtained. According to the maximum density interval, the background texture can be eliminated losslessly and the printed image can be segmented. Through a large number of experiments and comparative analysis with the Otsu algorithm and the traditional GrabCut algorithm, it is shown that the algorithm proposed in this article can eliminate various background textures of textile screen printing images, overcome noise, and accurately segment textile screen printing images. The correct segmentation rate of the algorithm reaches 91.93%. It well meets the needs of high precision segmentation and detection of textile screen printing image targets.

Keywords: faults of silk screening; multi-texture; gray histogram; maximum density interval

[责任编校: 张 众]