

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.01.005

基于分段幂次函数滑模观测器的 永磁同步电机速度控制

田其章, 文定都, 刘建华, 周志宇, 罗 达, 张 阳

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为了提高永磁同步电机的控制性能, 解决传统滑模控制器中存在的抖振和响应速度慢等问题, 提出一种采用分段幂次函数的新型滑模观测器。利用 Lyapunov 稳定判据对系统稳定性进行了证明, 并在新型滑模观测器前设计了滑模速度控制器, 最后与传统的 PI 控制器进行仿真比较。Matlab 仿真和实验结果表明, 新型滑模观测器结合滑模速度控制器的控制方法具有更强的鲁棒性和更快的收敛速度, 在抑制系统抖振方面具有更优的性能, 所得结果验证了所提出方法的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 滑模控制器; 新型滑模观测器; 分段幂次函数

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2021)01-0031-08

引文格式: 田其章, 文定都, 刘建华, 等. 基于分段幂次函数滑模观测器的永磁同步电机速度控制[J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(1): 31-38.

Research on Controlling Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Piece-Wise Power Function Sliding Mode Observer

TIAN Qizhang, WEN Dingdou, LIU Jianhua, ZHUO Zhiyu, LUO Da, ZHANG Yang

(College of Electrical and Informatica Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of an improvement of the control performance of permanent magnet synchronous motors and a solution to the problems of chattering and slow response in traditional sliding mode control (SMC), a new sliding mode observer using a piecewise power function has thus been proposed. By adopting Lyapunov stability criterion, the stability of the system can be proved, with a sliding mode speed controller designed before the new sliding mode observer, followed by a subsequent comparison with the traditional PI controller. The Matlab simulation and experimental results show that the control method of the new sliding mode observer combined with the sliding mode speed controller is characterized with a stronger robustness and faster convergence speed, thus exhibiting an improved ability in suppressing system chattering. The results verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; sliding mode controller; sliding mode observer; piecewise power function

收稿日期: 2020-09-06

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2100), 湖南省教育厅科研基金资助项目(17C0475)

作者简介: 田其章(1995-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力电子与电力传动,

E-mail: 1191540818@qq.com

通信作者: 张 阳(1988-), 男, 山东潍坊人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要从事电力电子与新能源技术方面的教学与研究, E-mail: 459387623@qq.com

1 研究背景

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 具有运行效率高、损耗小、体积小、功率因数高, 以及结构简单等优点^[1]。因此, 永磁同步电机在交流驱动和控制领域得到了广泛的应用^[2]。在传统的 PMSM 控制中, 为了提高永磁同步电机的精确控制, 需要对电机安装位置传感器和速度传感器, 这些传感器不仅增加了电机的体积, 而且降低了控制系统的鲁棒性, 因而使得永磁同步电机的应用受到了一定的限制^[3]。因此, 近年来, 永磁同步电机的传感器控制研究, 成为了国内外相关学者们研究的热点领域之一^[4]。

目前, 常见的无传感器控制方法, 主要有高频注入法^[5]、卡尔曼滤波器法^[6], 以及滑模观测器 (sliding mode observer, SMO) 估算法^[7]。采用滑模观测器时因其会有抖振现象产生, 从而会影响观测精度, 为了解决滑模观测器中固有的抖振问题, 文献 [8] 利用 sigmoid 函数代替开关函数, 从而抑制了抖振现象, 但是无法保证控制系统的鲁棒性。文献 [9] 在滑模观测器中设计了具有变截止频率的低通滤波器, 有效地抑制了系统抖振现象。文献 [10] 采用扩展卡尔曼滤波器对电机反电动势进行了观测与滤波, 达到了抑制抖振的效果。文献 [11] 在传统滑模观测器的基础上引用了指数趋近律, 设计了一种新型的趋近律, 达到了降低系统抖振的目的。文献 [12] 采用分数阶滑模, 有效地削弱了系统抖振现象。文献 [13] 采用具有非奇异终端滑模的低通滤波器进行观测, 并且将其和传统的滑模观测器进行了对比分析, 证明了该观测器在抑制抖振方面有了明显的改善。

本文拟针对传统滑模控制中存在的抖振现象, 提出一种新型的滑模观测器。所提出的观测器在传统滑模观测器的基础上, 构造了一种新型的 S 函数, 以有效地抑制滑模固有的抖振问题。同时, 为了进一步提高永磁同步电机的动态跟踪性能, 加入了滑模控制器, 以提高调速系统的收敛速度和控制性能。最后, 通过理论分析与实验仿真对比, 证明了所提出的新型滑模观测器结合滑模速度控制系统的收敛迅速、控制性能较高, 能有效地削弱滑模观测器中固有的抖振问题, 且具有很强的鲁棒性。

2 PMSM 数学模型

表贴式 PMSM 在两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压方程如下:

$$\begin{cases} u_\alpha = Ri_\alpha + L_s \frac{di_\alpha}{dt} + e_\alpha, \\ u_\beta = Ri_\beta + L_s \frac{di_\beta}{dt} + e_\beta. \end{cases} \quad (1)$$

反电动势方程如下:

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

式 (1) (2) 中:

u_α 、 u_β 分别为两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的定子电压;
 i_α 、 i_β 分别为两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的定子电流;
 R 为定子电阻;
 L_s 为定子电感;
 e_α 、 e_β 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下的电机反电动势;
 ψ_f 为永磁体磁链;
 ω_r 为转子转速;
 θ 为转子位置信息。

由式 (1) 可以得出 PMSM 在两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的电流方程如下:

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_s} i_\alpha + \frac{1}{L_s} u_\alpha - \frac{1}{L_s} e_\alpha, \\ \frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_s} i_\beta + \frac{1}{L_s} u_\beta - \frac{1}{L_s} e_\beta. \end{cases} \quad (3)$$

3 滑模观测器的设计

根据电流方程式 (3) 和滑模变结构控制基本原理, 定义滑模结构控制的切换函数如下:

$$S(\mathbf{x}) = \hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s, \quad (4)$$

式中: \mathbf{x} 为状态向量;

$\hat{\mathbf{i}}_s = [\hat{i}_\alpha \ \hat{i}_\beta]^T$, \hat{i}_s 、 \hat{i}_α 、 \hat{i}_β 均为估测电流;

$\mathbf{i}_s = [i_\alpha \ i_\beta]^T$, 为实际电流值。

以估测电流与实际电流之间的误差构成的切换面, 为

$$S(\mathbf{x}) = \hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s = 0. \quad (5)$$

3.1 传统滑模观测器

根据式 (3) 与滑模变原理, 设计传统滑模观测器的电流方程如下:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_s} \hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s} \hat{u}_\alpha - \frac{k_s}{L_s} \text{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha), \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_s} \hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s} \hat{u}_\beta - \frac{k_s}{L_s} \text{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta). \end{cases} \quad (6)$$

式中: \hat{u}_α 、 \hat{u}_β 分别为滑模观测器的观测电压估测值;

sgn() 为开关函数;

k_s 为滑模观测器切换增益。

由式 (6) 与式 (3) 作差, 可以得到如下定子电流的误差方程:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_s}\bar{i}_\alpha + \frac{1}{L_s}e_\alpha - \frac{k_s}{L_s}\text{sgn}(\bar{i}_\alpha), \\ \frac{d\bar{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_s}\bar{i}_\beta + \frac{1}{L_s}e_\beta - \frac{k_s}{L_s}\text{sgn}(\bar{i}_\beta). \end{cases} \quad (7)$$

式中, \bar{i}_α 、 \bar{i}_β 分别为观测电流误差。

当系统存在并且稳定运行于滑模面时, $S(x)=0$, 可得:

$$\begin{cases} e_\alpha = k_s \text{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha), \\ e_\beta = k_s \text{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta). \end{cases} \quad (8)$$

通过滤波后, 根据公式 (2) 与公式 (8), 即可以从反电动势中提取估算的转子位置信息以及转子的电角速度:

$$\theta_c = -\arctan(e_\alpha/e_\beta), \quad (9)$$

$$\omega_c = \frac{d\theta_c}{dt}. \quad (10)$$

式 (9) (10) 中: θ_c 为转子位置估算的角度;

ω_c 为转子估算的电角速度。

通过上述推导, 可以得到传统滑模观测器的原理图, 如图 1 所示, 图中 s 为拉普拉斯变换复频域变量。

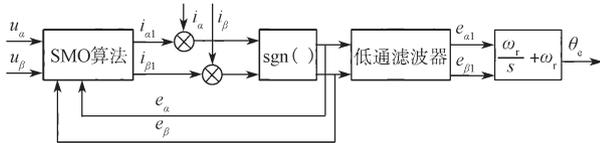


图 1 传统滑模观测器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a traditional sliding mode observer

3.2 新型滑模观测器

由于传统滑模观测器中存在固有的抖振现象, 高频率抖振不仅会增加系统能耗, 而且会直接影响观测精度, 为了削弱系统中存在的抖振现象, 本文设计了一个分段幂次函数, 其公式如下:

$$y(x) = \begin{cases} 1, & x \geq b; \\ \frac{1}{b^2}x^4, & 0 \leq x < b; \\ -\frac{1}{b^2}x^4, & -b \leq x < 0; \\ -1, & x < -b. \end{cases} \quad (11)$$

式中: b 为边界层厚度;

x 为观测电流值和实际电流值之间的误差。

由式 (10) 可以看出, 系统的稳定性和曲线的斜

率有关, 故可以通过改变常数 b 的值来检测对系统的优化效果以及反电动势的稳定性程度, 改变后发现, 当 b 的取值为 0.001 时, 其对该系统的优化和稳定反电动势具有最佳的效果。该函数在不同 b 值下的曲线如图 2 所示。

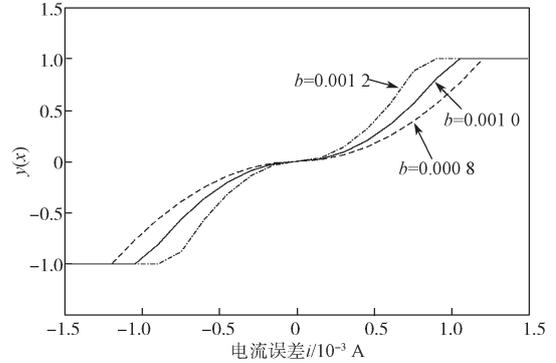


图 2 不同 b 值下的分段幂次函数

Fig. 2 Piecewise power function with different b values

根据式 (2) (3) (6) (11), 可以推算出新型滑模观测器的数学模型, 为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_s}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s}\hat{u}_\alpha - \frac{k_s}{L_s}y(\hat{i}_\alpha - i_\alpha), \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_s}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s}\hat{u}_\beta - \frac{k_s}{L_s}y(\hat{i}_\beta - i_\beta). \end{cases} \quad (12)$$

通过式 (12) 构成的新型滑模观测器滤波后, 可以从反电动势中提取出估算的转子位置信息以及转子速度。

新型滑模观测器的原理图如图 3 所示。

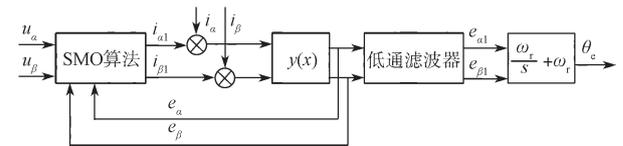


图 3 新型滑模观测器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the new sliding mode observer

3.3 新型滑模观测器的稳定性证明

为了证明新型滑模观测器的稳定性, 选取李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2}S^T S, \quad (13)$$

式中 V 为 Lyapunov 函数。

要使得新型滑模观测器稳定运行, 则其导数应该满足:

$$\dot{V} = \frac{1}{2}S^T \dot{S} = \frac{1}{2}(\bar{i}_\alpha \dot{\bar{i}}_\alpha + \bar{i}_\beta \dot{\bar{i}}_\beta) < 0. \quad (14)$$

即当 $\bar{i}_\alpha \dot{\bar{i}}_\alpha < 0$ 且 $\bar{i}_\beta \dot{\bar{i}}_\beta < 0$ 时, 有 $\dot{V} < 0$, 此时滑模观

测器进入滑模面运动, 根据式(12)可得:

$$\begin{cases} \dot{\bar{i}}_{\alpha} = \frac{1}{L_s} [-R\bar{i}_{\alpha} + e_{\alpha} - k_s y(\bar{i}_{\alpha})], \\ \dot{\bar{i}}_{\beta} = \frac{1}{L_s} [-R\bar{i}_{\beta} + e_{\beta} - k_s y(\bar{i}_{\beta})]. \end{cases} \quad (15)$$

从而可得:

$$\begin{cases} \bar{i}_{\alpha} \dot{\bar{i}}_{\alpha} = \frac{\bar{i}_{\alpha}}{L_s} [-R\bar{i}_{\alpha} + e_{\alpha} - k_s y(\bar{i}_{\alpha})], \\ \bar{i}_{\beta} \dot{\bar{i}}_{\beta} = \frac{\bar{i}_{\beta}}{L_s} [-R\bar{i}_{\beta} + e_{\beta} - k_s y(\bar{i}_{\beta})]. \end{cases} \quad (16)$$

由此讨论: 当 $x > 0$ 时, 即 $\bar{i}_{\alpha} > 0$, 此时有 $y(x) > 0$, 从而可得:

$$\bar{i}_{\alpha} \dot{\bar{i}}_{\alpha} = \frac{\bar{i}_{\alpha}}{L_s} [-R\bar{i}_{\alpha} + e_{\alpha} - k_s y(\bar{i}_{\alpha})] = \frac{\bar{i}_{\alpha}}{L_s} [(e_{\alpha} - k_s) - R\bar{i}_{\alpha}], \quad (17)$$

$$\bar{i}_{\beta} \dot{\bar{i}}_{\beta} = \frac{\bar{i}_{\beta}}{L_s} [-R\bar{i}_{\beta} + e_{\beta} - k_s y(\bar{i}_{\beta})] = \frac{\bar{i}_{\beta}}{L_s} [(e_{\beta} - k_s) - R\bar{i}_{\beta}]. \quad (18)$$

当 $x < 0$ 时, 即 $\bar{i}_{\alpha} < 0$, 此时有 $y(x) < 0$, 从而可得:

$$\bar{i}_{\alpha} \dot{\bar{i}}_{\alpha} = \frac{\bar{i}_{\alpha}}{L_s} [-R\bar{i}_{\alpha} + e_{\alpha} - k_s y(\bar{i}_{\alpha})] = \frac{\bar{i}_{\alpha}}{L_s} [(e_{\alpha} + k_s) - R\bar{i}_{\alpha}], \quad (19)$$

$$\bar{i}_{\beta} \dot{\bar{i}}_{\beta} = \frac{\bar{i}_{\beta}}{L_s} [-R\bar{i}_{\beta} + e_{\beta} - k_s y(\bar{i}_{\beta})] = \frac{\bar{i}_{\beta}}{L_s} [(e_{\beta} + k_s) - R\bar{i}_{\beta}]. \quad (20)$$

由上述分析可得, 要满足 $\bar{i}_{\alpha} \dot{\bar{i}}_{\alpha} < 0$ 且 $\bar{i}_{\beta} \dot{\bar{i}}_{\beta} < 0$, k_s 必须大于 e_{α} 与 e_{β} 绝对值的最大值, 根据式(17)~(20), 可以推导出新型滑模观测器的稳定条件, 最后可得 k_s 的取值范围为

$$k_s > \max(|e_{\alpha}|, |e_{\beta}|). \quad (21)$$

当式(21)满足时, 可以保证其导数 $\dot{V} < 0$, 从而保证了系统的滑模面到达了滑模的稳定性条件, 确保滑模观测器收敛。

4 滑模速度控制器的设计

本研究是在表贴式 PMSM 下设计滑模控制器, 首先在两相旋转坐标 d - q 轴系下建立如下永磁同步电机的数学模型:

$$\begin{cases} u_d = R i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - p_n \omega_r L_s i_q, \\ u_q = R i_q + L_s \frac{di_q}{dt} - p_n \omega_r L_s i_d + p_n \omega_r \psi_f, \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q - B \omega_r - T_L. \end{cases} \quad (22)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为定子电压在两相旋转坐标 d 、 q 轴下的分量;

i_d 、 i_q 分别为定子电流在两相旋转坐标 d 、 q 轴下的分量;

p_n 为电机相数;

J 为转动惯量;

T_L 为负载转矩;

B 为转矩阻尼系数。

本文根据表贴式 PMSM 的特点, 选取了 $i_d = 0$ 的矢量控制策略。此时式(22)的数学模型变为

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} (-R i_q - p_n \omega_m \psi_f + u_q), \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p_n \psi_f i_q - B \omega_m - T_L \right). \end{cases} \quad (23)$$

定义永磁同步电机系统的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_m, \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m. \end{cases} \quad (24)$$

式(23)~(24)中: ω_{ref} 为电机的给定转速; ω_m 为实际转速。

将式(23)和式(24)联立可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = \frac{1}{J} \left(T_L - \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q \right), \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m = -\frac{3}{2J} p_n \psi_f \dot{i}_q + \frac{B}{J} \dot{\omega}_m. \end{cases} \quad (25)$$

即

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{B}{J} x_2 - \frac{3}{2J} p_n \psi_f \dot{i}_q. \end{cases} \quad (26)$$

定义 $u = \dot{i}_q$, $D = \frac{3}{2J} p_n \psi_f$, 则式(26)可变为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} u. \quad (27)$$

对于转速滑模控制器, 选取滑模面函数为

$$s = c x_1 + x_2, \quad (28)$$

式中, c 为设计参数, 且 $c > 0$ 。

对式(28)求导, 可得:

$$\dot{s} = c \dot{x}_1 + \dot{x}_2 = c x_2 + \dot{x}_2 = c x_2 - \frac{B}{J} x_2 - D u. \quad (29)$$

选择如下指数趋近律:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - q s, \quad (30)$$

式中, ε 、 q 均为设计参数, 且 $\varepsilon > 0$ 、 $q > 0$ 。

由式(29)与式(30)可得:

$$-\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - q s = c x_2 - \frac{B}{J} x_2 - D u. \quad (31)$$

由式(31)可得 u 的表达式为

$$u = \frac{1}{D} \left[\varepsilon \operatorname{sgn}(s) + qs + cx_2 - \frac{B}{J} x_2 \right]. \quad (32)$$

从而可得到 q 轴的参考电流为

$$i_q^* = \frac{1}{D} \int_0^t \left[cx_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + qs - \frac{B}{J} x_2 \right] dt. \quad (33)$$

根据式 (33) 可以得出, q 轴的参考电流控制器中包含有积分项, 一方面, 它可以加快初始转速的响应速度, 减小调节时间; 另一方面, 它可以减少系统的抖振现象。而由滑模的可达性条件 $ss < 0$, 容易验证在控制器 (如式 (33) 所示) 的作用下, 系统将逐渐趋于稳定。

5 控制系统建模仿真与分析

5.1 仿真模型的搭建

为了验证上文中所给出的滑模速度控制器的正确性, 接下来根据滑模面函数式 (28) 以及 q 轴的参考电流表达式 (33), 在 Matlab/Simulink 环境下, 搭建了滑模速度控制器的仿真模型, 具体如图 4 所示。仿真模型中, 滑模速度控制器的参数设定如下: $c=50, \varepsilon=180, q=300$ 。

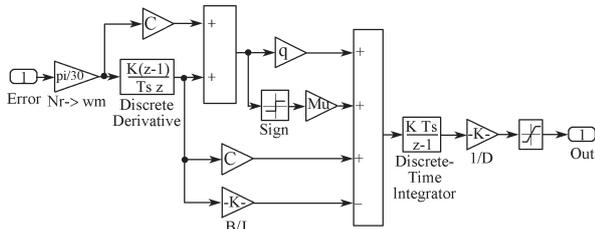


图 4 滑模速度控制器仿真模型

Fig. 4 Sliding mode speed controller simulation model

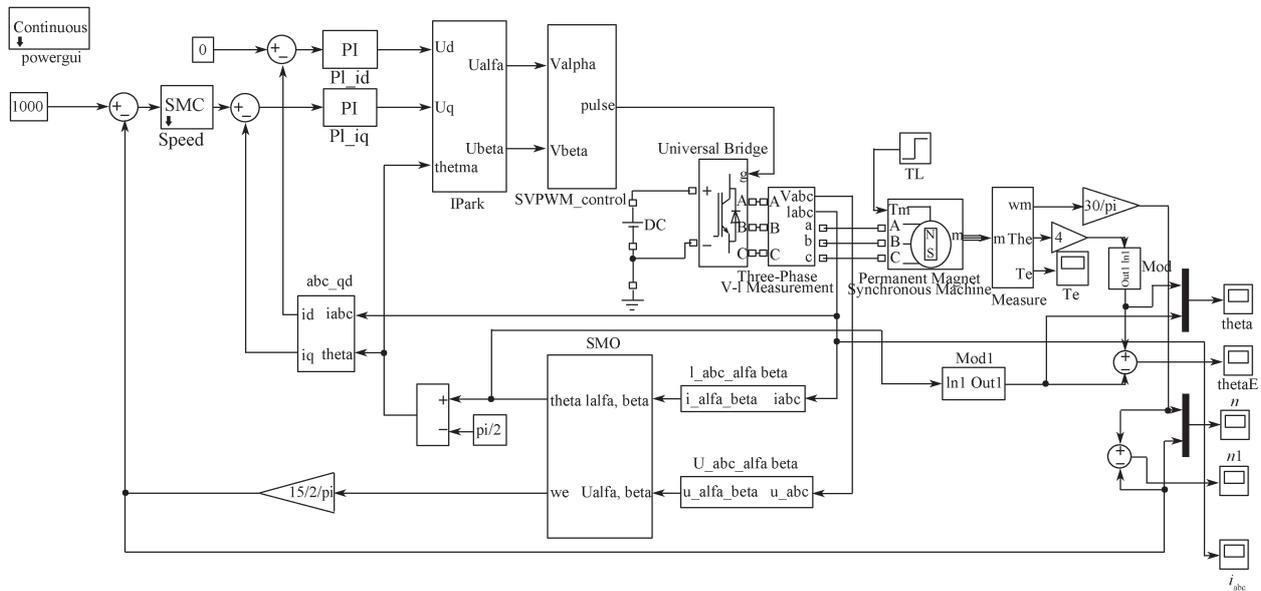


图 6 基于新型滑模观测器的永磁同步电机仿真模型

Fig. 6 Simulation model of permanent magnet synchronous motor based on a new sliding mode observer

基于新型滑模观测器结合滑模控制器的永磁同步调速系统的控制原理图如图 5 所示, 基于新型的滑模观测器永磁同步电机的仿真模型如图 6 所示。在该新型滑模观测器中, 采用分段幂次函数代替开关函数后的部分仿真模型图如图 7 所示, 其中的参数设置如下: 常数 $b=0.001$, 增益 $k_{sw}=73.5$, 低通截止滤波器 $f=20\ 000$ 。

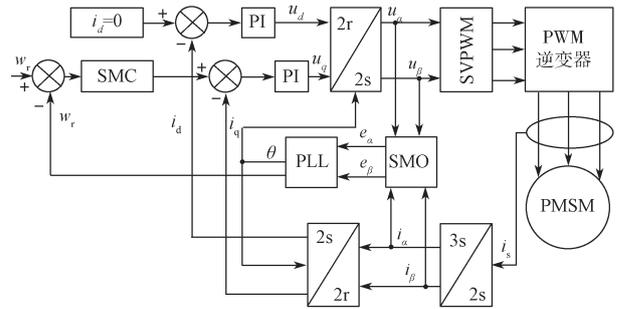


图 5 基于新型滑模观测器结合滑模控制器的永磁同步调速系统控制原理图

Fig. 5 Schematic diagram of permanent magnet synchronous speed control system based on a new sliding mode observer combined with sliding mode controller

在本研究中, 三相永磁同步电机仿真的电机参数设置如下: 极对数 $P_n=4$, 定子电阻 $R=2.875\ \Omega$, 定子电感 $L_s=8.5\ \text{mH}$, 转动惯量 $J=10^{-3}\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$, 磁链 $\psi_f=0.175\ \text{Wb}$, 阻尼系数 $B=0.008\ \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ 。系统的具体仿真条件设置如下: 直流侧的电压 $U_{dc}=311\ \text{V}$, PWM 的开关频率 $f_{pwm}=10\ \text{kHz}$, 仿真时间设为 $0.2\ \text{s}$, 给定的初始转速为 $1\ 000\ \text{r/min}$, 并且在 $0.05\ \text{s}$ 时突加 $5\ \text{N}\cdot\text{m}$ 的负载转矩。

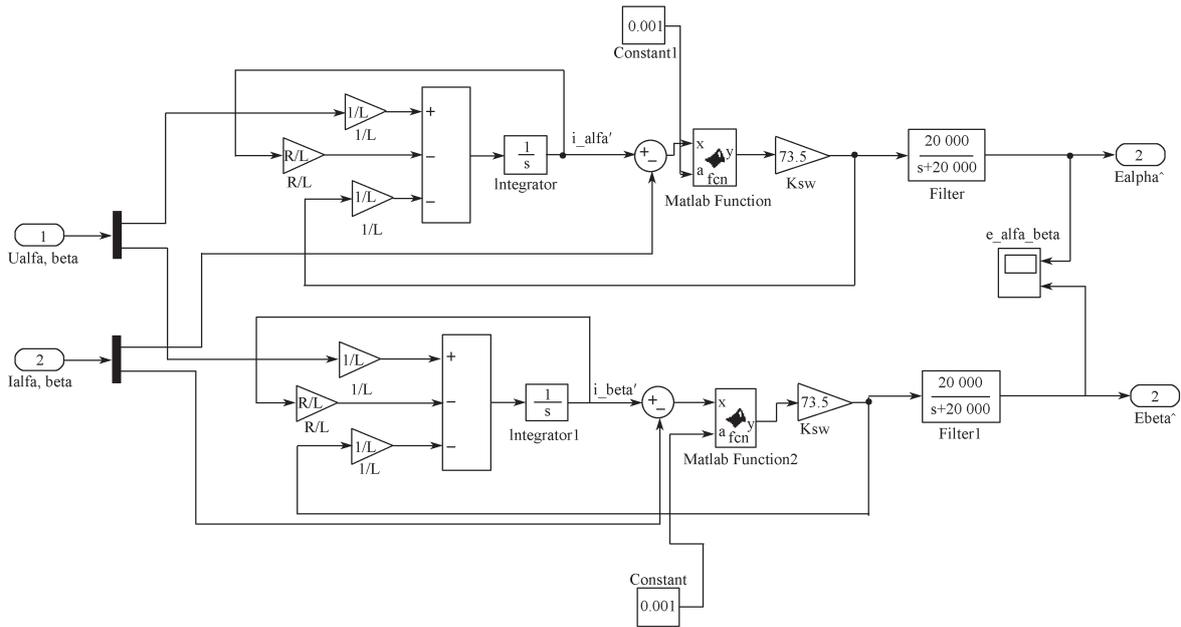
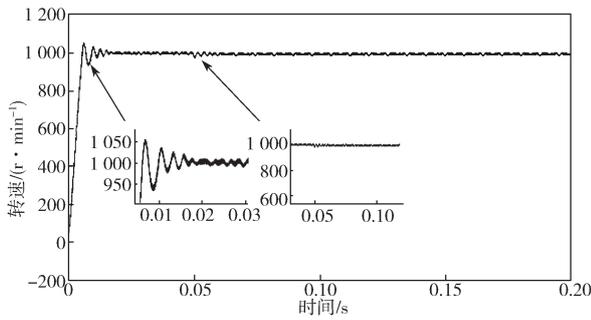


图7 新型滑模观测器中使用分段 S 函数部分仿真模型

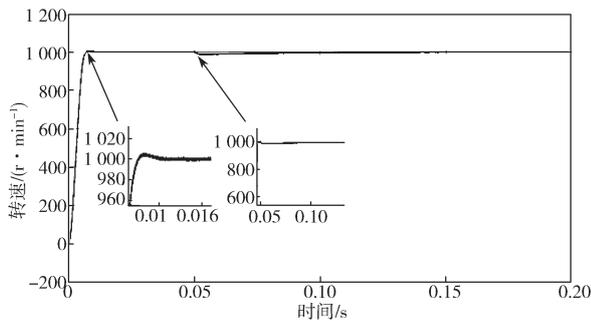
Fig. 7 Partial simulation model using piecewise S function in the proposed sliding mode observer

5.2 仿真结果与分析

基于传统滑模观测器和基于新型滑模观测器的 PMSM 仿真结果如图 8~10 所示。其中，图 8 为传统滑模观测器的转速仿真波形与新型滑模观测器的转速仿真波形，图 9 为传统滑模观测器与新型滑模观测器结合滑模速度控制器的三相电流仿真曲线，图 10 为传统滑模观测器与新型滑模观测器结合滑模速度控制器的转速误差仿真曲线。



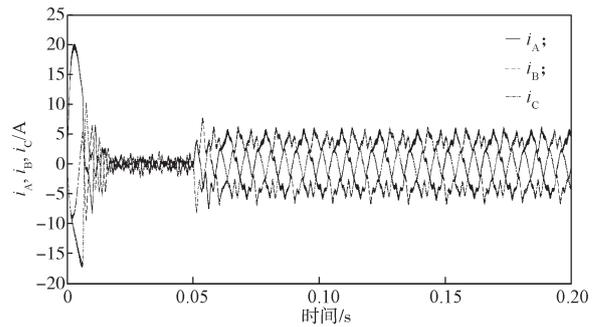
a) 传统滑模观测器



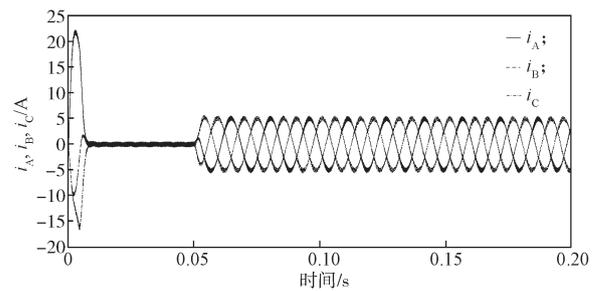
b) 新型滑模观测器

图8 滑模观测器的转速仿真波形

Fig. 8 Speed simulation waveforms of sliding mode observer



a) 传统滑模观测器



b) 新型滑模观测器

图9 滑模观测器的三相电流仿真曲线

Fig. 9 Three-phase current simulation curves of sliding mode observer

根据图 8 所示滑模观测器的转速仿真波形可以得知，传统的滑模观测器在转速观测过程中，超调现象较为严重，电机的转速从 0 r/min 上升到给定转速 1000 r/min 的调节时间较长，达到给定转速后的抖振现象较大，系统稳定性较差，突加负载后的超调量 $\sigma=2.5\%$ ；而新型观测器结合滑模速度控制器在转速观测过程中，其超调量非常小，电机的转速从 0 r/min

上升到给定转速 1 000 r/min 的调节时间很短, 具有良好的动态响应速度, 达到稳定后, 抖振现象非常小, 突加负载后的超调量 $\sigma=1.5\%$ 。

由图 9 所示的滑模观测器的三相电流仿真曲线可以得知, 传统的滑模观测器估算出的三相电流可以呈现出基本的正弦波形, 但是整个波形的波动幅度非常大, 并且在突加负载后, 三相电流恢复的速度较慢; 而基于新型滑模观测器的三相电流呈现为标准的电流正弦波形变化, 并且在突加负载后, 三相电流的恢复速度非常快。

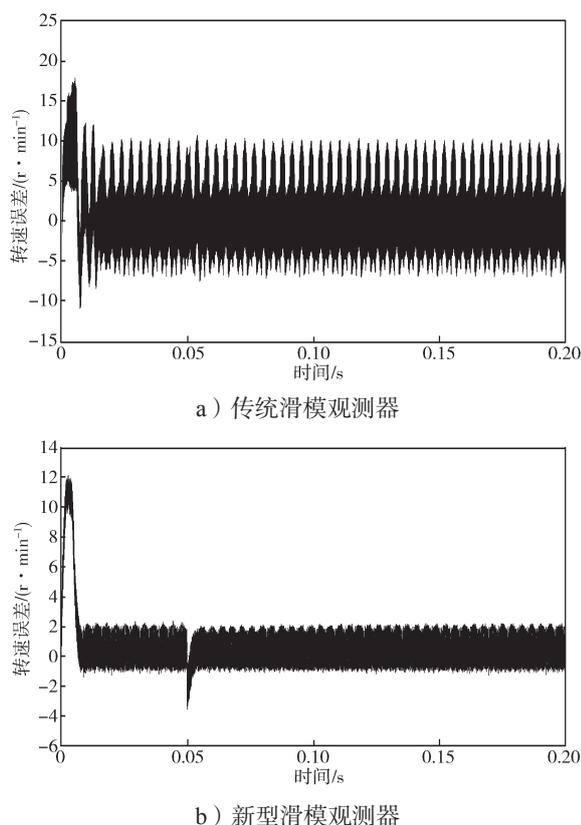


图 10 滑模观测器的转速误差仿真曲线

Fig. 10 Simulation curves of rotational speed error of sliding mode observer

由图 10 所示滑模观测器的转速误差曲线可以得知, 传统滑模观测器的实际转速与估测转速的误差在 $-5\sim 10$ r/min 大范围内剧烈波动, 抖振现象非常严重; 而新型滑模观测器的实际转速与估测转速的误差在 $-1\sim 2$ r/min 范围内波动, 抖振现象很小, 且相较于传统滑模观测器, 新型滑模观测器在应对突加负载时, 转速误差变化较小。

根据上述仿真结果与分析可以得知, 传统的滑模观测器产生的超调现象较为严重, 系统动态响应速度较慢, 抖振现象较严重, 且突加负载时, 系统抗干扰能力较差, 调节时间较长; 而新型滑模观测器结合滑模速度控制器产生的超调量较小, 系统具有良好的响

应速度, 抖振现象很小, 当突加负载时, 系统具有良好的抗干扰能力。

6 结语

本研究采用分段幂次函数设计了一滑模观测器, 提出了一种基于新型的分段幂次函数的滑模观测器结合滑模速度控制器的调速控制系统。经过仿真试验验证, 发现相对于传统的滑模观测器调速系统, 基于新型的滑模观测器结合滑模速度控制器的调速系统, 在电机控制过程中, 无论是在抗干扰能力、超调量、动态响应速度方面, 还是维持三相电流稳定方面, 都具有一定的优势。在整个仿真试验中, 基于新型的滑模观测器结合滑模速度控制器的调速系统, 能够明显地削弱抖动现象, 增强了系统的抗干扰能力。因此, 证明了所提出的新型的控制系统的鲁棒性较强, 达到了预期的设计目的。

参考文献:

- [1] 杜昭平, 李 凯, 张玉良, 等. 基于新型饱和函数滑模观测器的永磁同步电机控制系统 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(6): 6-11.
DU Zhaoping, LI Kai, ZHANG Yuliang, et al. Permanent Magnet Synchronous Motor Control System Based on a Novel Sliding Mode Observer of Saturation Function[J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(6): 6-11.
- [2] 李 闹. 基于滑模观测器的 PMSM 无位置传感器控制研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
LI Nao. Research on PMSM Positionless Transmitter Control Based on Sliding Mode Observer[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [3] 高子彦, 张 陈. 基于 MATLAB 的永磁同步电机位置观测器设计与仿真 [J]. 电子世界, 2018(21): 162, 164.
GAO Ziyan, ZHANG Chen. Design and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Position Observer Based on MATLAB[J]. Electronic World, 2018(21): 162, 164.
- [4] 包广清, 王 涛. 基于脉振高频注入法的永磁同步电机初始位置检测优化算法研究 [J]. 微电机, 2019, 52(5): 82-86.
BAO Guangqing, WANG Tao. Research on Control Optimize Algorithm of Pulsating High-Frequency Signals Injected into Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. Micromotors, 2019, 52(5): 82-86.
- [5] 王大志, 李汶浚, 袁天清, 等. 基于高频信号注入的永磁同步电机转子位置估计 [J]. 东北大学学报 (自然

- 科学版), 2019, 40(9): 1234-1239.
- WANG Dazhi, LI Wenhui, YUAN Tianqing, et al. Rotor Position Estimation of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on High-Frequency Signal Injection[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2019, 40(9): 1234-1239.
- [6] 王迪. 基于卡尔曼滤波的惯性导航技术[D]. 北京: 北方工业大学, 2018.
- WANG Di. Inertial Navigation Technology Based on Kalman Filter[D]. Beijing: North China University of Technology, 2018.
- [7] 王孟. 基于MRAS的永磁同步电机无传感器矢量控制系统的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- WANG Meng. Research on Sensorless Vector Control System of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on MRAS[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [8] 兰志勇, 王波, 王琳, 等. 基于滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制[J]. 微电机, 2018, 51(9): 32-37.
- LAN Zhiyong, WANG Bo, WANG Lin, et al. Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Sliding Mode Observer[J]. Micromotor, 2018, 51(9): 32-37.
- [9] 陶彩霞, 赵凯旋, 牛青. 考虑滑模抖振的永磁同步电机模糊超螺旋滑模观测器[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 11-18.
- TAO Caixia, ZHAO Kaixuan, NIU Qing. Fuzzy Super-Spiral Sliding Mode Observer for Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Sliding Mode Buffeting[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 11-18.
- [10] 倪禛霖, 贾洪平. 基于卡尔曼滤波滑模观测器的PMSM控制研究[J]. 大电机技术, 2019(4): 12-15, 20.
- NI Zhenlin, JIA Hongping. Research on Sensorless Control Method of PMSM Based on Kalman Filter Sliding Mode Observer[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2019(4): 12-15, 20.
- [11] 张晓光, 赵克, 孙力, 等. 永磁同步电动机滑模变结构调速系统新型趋近率控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 77-82.
- ZHANG Xiaoguang, ZHAO Ke, SUN Li, et al. A PMSM Sliding Mode Control System Based on a Novel Reaching Law[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 77-82.
- [12] 何克胜, 王英. 基于分数阶趋近律的永磁同步电机滑模控制[J]. 变频器世界, 2018(11): 79-81.
- HE Kesheng, WANG Ying. Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Fractional Order Reaching Law[J]. The World of Inverters, 2018(11): 79-81.
- [13] 常雪剑, 彭博, 刘凌, 等. 新型非奇异终端滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 85-91, 99.
- CHANG Xuejian, PENG Bo, LIU Ling, et al. A Novel Nonsingular Terminal Sliding Mode Observer for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 85-91, 99.

(责任编辑: 廖友媛)