20100000077006
第 34 卷 第 10 期
2020 年 10 月
电子测量与仪器学报
JOURNAL OF ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENTATION
06 赵凯辉. fbd
Vol. 34 *No*. 10
· 39 ·

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2002946

基于超螺旋滑模观测器的六相永磁同步电机失磁故障重构*

赵凯辉 冷傲杰 何 静 陈 跃 周瑞睿 戴旺珂 吴思成
(湖南工业大学 电气与信息工程学院 株洲 412007)

摘 要:针对六相永磁同步电机在复杂运行工况下永磁体容易发生失磁故障的问题,提出一种基于超螺旋算法的永磁体失磁故障重构方法。首先,利用矢量空间解耦坐标变换(VSD)进行降阶和解耦,构建了六相永磁同步电机失磁故障数学模型。其次,以定子电流为状态变量,设计基于超螺旋算法的滑模观测器(STA-SMO),根据滑模等值原理实现转子磁链的实时重构,并采用一种类二次型 Lyapunov 函数证明了所设计 STA-SMO 的稳定性。最后通过仿真与实验验证了该方法的有效性,与传统滑模观测器(SMO)相比,所设计的 STA-SMO 准确地实现了对失磁故障的重构,有效抑制了抖振,且鲁棒性更强。

关键词: 六相永磁同步电机;失磁故障;超螺旋算法;滑模观测器
中图分类号: TM351 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510. 80

Reconstruction of demagnetization fault of six-phase permanent magnet synchronous motor based on super-twisting sliding-mode observer

Zhao Kaihui Leng Aojie He Jing Chen Yue Zhou Ruirui Dai Wangke Wu Sicheng
(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Aiming at the problem that the permanent magnet of the six-phase permanent magnet synchronous motor (SP-PMSM) is prone to demagnetize under complex operating conditions, a reconstruction method of permanent demagnetization fault is proposed based on the super-twisting algorithm. Firstly, the mathematical model of the demagnetization fault for SP-PMSM is constructed based on the vector space decomposition (VSD) theory through order reduction and decoupling. Secondly, taking the stator current as the state variables, the sliding-mode observer is designed using the super-twisting algorithm. The real-time reconstruction of rotor flux is realized according to the principle of sliding mode equivalence. A kind of strong quadratic Lyapunov function is used to ensure the stability of STA-SMO. Finally, the simulation and experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method. Compared with the traditional sliding mode observer (SMO), the STA-SMO can reconstruct the demagnetization fault accurately, reduce chattering effectively and has a good robustness.

Keywords: six-phase permanent magnet synchronous motor (SP-PMSM); demagnetization; super-twisting algorithm; sliding mode observer

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)具有功率因数高、可靠性高、效率高等优点,随着控制技术的进步和高级磁材料的发展,永磁牵引电机得到快速发展,逐步成为最有发展潜质的电机,广泛应用于风能水电、交通工程、新能源产业等领域[1-3]。但是温度、磁场、化学腐蚀或氧化等因素都会影响永磁体的稳定性[4],甚至会引起转子永磁体的失磁现象。失磁故障不仅影响电机系统的运行性能,严重时可能会导致电机的报废而发生重大安全事故。因此从观测永磁体磁链入手,对电机失磁故障进行实时重构,具有重要的理论与工程意义[5]。

在实际工程应用中,针对转子永磁体失磁故障问题,

收稿日期: 2020-02-05 Received Date: 2020-02-05
*基金项目:国家自然科学基金(61773159)、湖南省自然科学基金(2020JJ6083,2018JJ4066,2019JJ40072)、湖南省研究生科研创新项目(CX20190861)资助

从电机的设计角度优化磁路结构,可以降低转子失磁的可能性,但这只是一种静态预防的方法[6]。

近年来开始引入观测器进行在线辨识[7-10]。文献[11]提出了基于传统滑模观测器(sliding-mode observer, SMO)的故障估计方法,利用等价输出介入信号来估计故障。但是由于滑模观测器中引入了不连续项,不可避免的引起抖振,进而影响整个系统的稳定性。饱和函数的引入虽然替代了不连续的有界符号函数,但是依然不能使收敛更为快速精准[12],准滑动模态、更改趋近律也只能克服些许抖动,这是传统一阶滑模观测器不能克服的弊端。

高阶滑模控制技术[13-14]能够大幅度抑制抖振,通过调整控制率和增益能让滑模控制在有限时间内收敛。超螺旋算法(super-twisting algorithm, STA)是一种高阶滑模控制方案,因其形似螺旋式结构,所以被称为超螺旋算法。基于超螺旋算法的滑模观测器(super-twisting algorithm based sliding mode observer, STA-SMO)能够有效权衡抖振的减弱和系统的鲁棒性之间的关系,同时可以快速估计变化的不确定度和抑制抖振。文献[15]提出了一种离散型变增益超螺旋观测器,有效克服了固有抖振的弊端。文献[16-17]设计 STA-SMO 实现了转子位置和速度的估计,该系统具有良好的精度。文献[18]通过设计超螺旋滑模控制器对开关磁阻电机输出转速进行跟踪控制,较好的消除了抖振。

本文设计了一种基于超螺旋算法的二阶滑模观测器[19-20],对六相永磁同步电机失磁故障进行重构[21]。首先根据矢量空间解耦坐标变换(vector space decomposition, VSD),将其涉及机电能量转换的分量和产生谐波电流的分量分别解耦到不同的子平面中,仅对产生电磁转矩的子平面进行二维控制,建立失磁故障数学模型[22-23]。其次,设计超螺旋滑模观测器在线重构失磁故障,使磁链辨识精度和速度在一定程度上得到优化,并设计一种类二次型 Lyapunov 函数证明其稳定性[24]。最后通过仿真与实验验证了 STA-SMO 的优越性,与传统 SMO 相比,STA-SMO 有效地减少了抖振,提高了系统的动态性能。

1 系统描述

1.1 正常情况下六相永磁电机数学模型

六相电机在自然坐标系下的定子电压方程及定子磁链方程为[25]:

$$\boldsymbol{u}_{6s} = \boldsymbol{R}_{6s}\boldsymbol{i}_{6s} + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{6s}}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

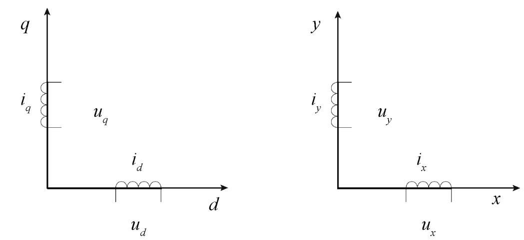
$$\boldsymbol{\psi}_{6s} = \boldsymbol{L}_{6s}\boldsymbol{i}_{6s} + \boldsymbol{\lambda}_{6s}\psi_{r0} \tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{u}_{6s}$、$\boldsymbol{i}_{6s}$ 分别为六相绕组的相电压、相电流; $\boldsymbol{R}_{6s}$ 和 $\boldsymbol{L}_{6s}$ 分别为相电阻、相电感系数矩阵; $\boldsymbol{\psi}_{6s}$ 为定子磁链; ψ_{r0} 为转子在每一相绕组中的磁链幅值; $\boldsymbol{\lambda}_{6s}$ 为磁系矩阵。

六相电机系统具有多变量、多维度、多耦合的特点。为了便于 STA-SMO 的设计,利用 VSD 变换对系统进行降阶和解耦。即把电机看成一个整体,将各变量分别解析到 3 个二维正交 $\alpha-\beta$、$x-y$、o_1-o_2 子平面。由于绕组的中性点彼此保持独立,其 o_1-o_2 中的分量都为 0,此时六相电机从六维系统降维成四维系统,再经过同步旋转变换可得同步坐标系如图 1 所示。在 $d-q$ 子平面与 $x-y$ 子平面,六相永磁同步电机的定子电压方程为:

$$\boldsymbol{u}_{4s} = \boldsymbol{R}_{4s}\boldsymbol{i}_{4s} + \boldsymbol{L}_{4s}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{i}_{4s}}{\mathrm{d}t} + \begin{bmatrix} -\omega_e L_q i_q \\ \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_{r0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中: $\boldsymbol{u}_{4s} = [u_d \quad u_q \quad u_x \quad u_y]^{\mathrm{T}}$ 为 $d-q$、$x-y$ 子平面的定子电压; $\boldsymbol{i}_{4s} = [i_d \quad i_q \quad i_x \quad i_y]^{\mathrm{T}}$ 为 $d-q$ 子平面、$x-y$ 子平面的定子电流; $\boldsymbol{L}_{4s} = \mathrm{diag}[L_d \quad L_q \quad L_z \quad L_z]$ 为电感矩阵; L_z 为漏自感; ω_e 为电角速度, ω_m 为机械角速度。



(a) d-q坐标系
(a) d-q coorsinates

(b) x-y坐标系
(b) x-y coorsinates

图 1 基于 VSD 变换的四维空间

Fig. 1 Four-dimensional space system based on vector space decomposition

选择电流分量为状态变量,根据式(3)可得正常情况下的六相电机状态方程为:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{R_s}{L_d}i_d + \omega_e\dfrac{L_q}{L_d}i_q + \dfrac{u_d}{L_d} \\ \dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{R_s}{L_q}i_q - \omega_e\dfrac{L_d}{L_q}i_d + \dfrac{u_q}{L_q} - \omega_e\dfrac{\psi_{r0}}{L_q} \\ \dfrac{\mathrm{d}i_x}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{R_s}{L_z}i_x + \dfrac{u_x}{L_z} \\ \dfrac{\mathrm{d}i_y}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{R_s}{L_z}i_y + \dfrac{u_y}{L_z} \end{cases} \tag{4}$$

式中: $x-y$ 子平面只会产生谐波变量 i_x、i_y,不产生旋转磁势和电磁转矩。$\alpha-\beta$ 子平面与定转子气隙磁通保持平行,其中的分量会在气隙中形成旋转磁势和作用力。所以经过同步旋转变换后,只有 $d-q$ 子平面分量涉及磁能转换。

1.2 失磁故障下六相永磁电机数学模型

当永磁体发生失磁故障时,转子磁链矢量会在幅值与方向上发生变化[22],即幅值由原来的 $|\psi_{r0}|$ 变为 $|\psi_r|$,方向与磁场定向方向存在偏差角 γ,如图 2 所示。发生失磁故障时,可得六相永磁同步电机的定子磁链方程为:

$$\begin{cases}\psi_d = L_d i_d + \psi_{rd} \\ \psi_q = L_q i_q + \psi_{rq} \\ \psi_x = L_z i_x \\ \psi_y = L_z i_y\end{cases} \tag{5}$$

式中:ψ_{rd} 为磁链 ψ_r 在 d 轴上的分量,且 $\psi_{rd} = \psi_r \cos\gamma$;$\psi_{rq}$ 为磁链 ψ_r 在 q 轴上的分量,且 $\psi_{rq} = \psi_r \sin\gamma$。在实际工程系统中,转子磁链的变化率小于电流的变化率,可以当稳态值处理,即 $\mathrm{d}\psi_{rd}/\mathrm{d}t \approx 0$、$\mathrm{d}\psi_{rq}/\mathrm{d}t \approx 0$。

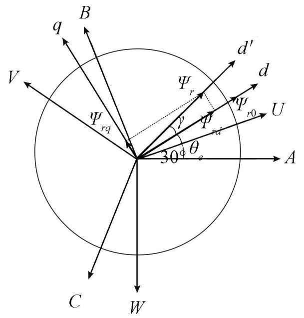


图 2 六相电机转子失磁矢量变化

Fig. 2 The schematic of six-phase permanent magnetic demagnetization fault

于是可得六相永磁电机发生失磁故障时的状态方程为:

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{R_s}{L_d}i_d + \omega_e\dfrac{L_q}{L_d}i_q + \dfrac{1}{L_d}u_d + \dfrac{\omega_e}{L_d}\psi_{rq} \\ \dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} = -\omega_e\dfrac{L_d}{L_q}i_d - \dfrac{R_s}{L_q}i_q + \dfrac{1}{L_q}u_q - \dfrac{\omega_e}{L_q}\psi_{rd} \\ \dfrac{\mathrm{d}i_x}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{R_s}{L_z}i_x + \dfrac{1}{L_z}u_x \\ \dfrac{\mathrm{d}i_y}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{R_s}{L_z}i_y + \dfrac{1}{L_z}u_y\end{cases} \tag{6}$$

式中:只有 d-q 坐标系参与机电能量转换。所以对 d-q 轴状态方程进行观测器设计。

2 基于 STA-SMO 的永磁体故障重构

传统一阶滑模算法对于系统参数摄动和外部扰动具有良好的鲁棒性。但传统滑模产生的高频切换会引起系统抖振,严重可使系统失稳。而超螺旋算法属于二阶滑模控制,其保留了一阶滑模的收敛特征,通过选择适当的增益可确保观测轨迹在有限时间内实现精确收敛且解决了传统滑模的抖振问题。

2.1 超螺旋二阶滑模观测器设计

选择电流误差为滑模面:

$$\boldsymbol{s}_0 = \boldsymbol{e} = [e_d \quad e_q]^{\mathrm{T}} = [i_d - \hat{i}_d \quad i_q - \hat{i}_q]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

对于式(6)中参与机电能量转换部分,选择 d-q 轴电流为状态变量,设计如式(8)所示。

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\hat{i}_d}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{R_s}{L_d}\hat{i}_d + \omega_e\dfrac{L_q}{L_d}\hat{i}_q + \dfrac{1}{L_d}u_d - v_d \\ \dfrac{\mathrm{d}\hat{i}_q}{dt} = -\omega_e\dfrac{L_d}{L_q}\hat{i}_d - \dfrac{R_s}{L_q}\hat{i}_q + \dfrac{1}{L_q}u_q - v_q\end{cases} \tag{8}$$

式中:$\boldsymbol{v} = [v_d \quad v_q]^{\mathrm{T}} = [v_{d1} + v_{q1} \quad v_{d2} + v_{q2}]^{\mathrm{T}}$ 为 STA-SMO 的超螺旋滑模项。

由式(6)和(8)得到误差状态方程为:

$$\begin{cases}\dot{e}_d = -k_1|e_d|^{1/2}\mathrm{sgn}(e_d) + v_{d2} + \rho_d \\ \dot{v}_{d2} = -k_2\mathrm{sgn}(e_d) \\ \dot{e}_q = -k_1|e_q|^{1/2}\mathrm{sgn}(e_q) + v_{q2} + \rho_q \\ \dot{v}_{q2} = -k_2\mathrm{sgn}(e_q)\end{cases} \tag{9}$$

式中:$k_1 > 0$,$k_2 > 0$。ρ_d、ρ_q 为扰动项,其分别为:

$$\begin{cases}\rho_d = -\dfrac{R_s}{L_d}e_d + \omega_e\dfrac{L_q}{L_d}e_q + \dfrac{\omega_e}{L_d}\psi_{rq} \\ \rho_q = -\omega_e\dfrac{L_d}{L_q}e_d - \dfrac{R_s}{L_q}e_q - \dfrac{\omega_e}{L_q}\psi_{rd}\end{cases} \tag{10}$$

式(9)可以写成矩阵形式:

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{e}} = -k_1|\boldsymbol{e}|^{1/2}\mathrm{sgn}(\boldsymbol{e}) + \boldsymbol{g} + \boldsymbol{\rho} \\ \dot{\boldsymbol{g}} = -k_2\mathrm{sgn}(\boldsymbol{e})\end{cases} \tag{11}$$

式中:$\boldsymbol{\rho} = [\rho_d \quad \rho_q]^{\mathrm{T}}$。

2.2 观测器稳定性分析

本文基于类二次型 Lyapunov 函数来研究趋近轨迹的有限时间收敛特性及重构故障的稳定性。由于函数及其导数都是二次型,因此使用类二次型 Lyapunov 函数可以获得设计参数的显式关系。

定理 对于系统(11),当 δ_1 足够大时,若时变扰动项 $\boldsymbol{\rho}$ 是全局有界,即:

$$\boldsymbol{\rho} \leqslant \delta_1|\boldsymbol{e}|^{1/2} \tag{12}$$

如果增益满足式(13)所示条件,则式(11)有限时间收敛。

$$\begin{cases}k_1 > \dfrac{(4k_2 + k_1^2)\delta_1}{2k_2 + k_1^2} \\ k_2 > \dfrac{(16k_2\delta_1 + k_1\delta_1^2)}{8k_1}\end{cases} \tag{13}$$

设计一个定义在原点邻域 U 上的正定函数 $V: R^n \to$

R,若存在实数 $\gamma > 0$ 和 $\alpha \in (0,1)$,使得 $\dot{V}+\gamma V^{\alpha}$ 沿系统 $\dot{\boldsymbol{e}}=g(t)$ 在 U 上半负定,则系统 $\dot{\boldsymbol{e}}=g(t)$ 的零解是有限时间稳定的[19]。

证明:选取如下类二次型正定 Lyapunov 函数:

$$V=\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{\zeta} \tag{14}$$

式中: $\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}=[\ |\boldsymbol{e}|^{1/2}\mathrm{sgn}(\boldsymbol{e})\quad \boldsymbol{g}\ ]$, $\boldsymbol{P}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}4k_2+k_1^2 & -k_1\\ -k_1 & 2\end{pmatrix}$。

V 是正定函数且连续。除了集合 $S=\{(\boldsymbol{e},\boldsymbol{g})\in R^2 \mid \boldsymbol{e}=0\}$ 外,V 是处处可微的。当状态误差未收敛到 0,系统状态无法维持在 $S=0$ 上。所以应用链式法则(Chain Rule) $\mathrm{d}|\boldsymbol{e}|/\mathrm{d}t=\dot{\boldsymbol{e}}\mathrm{sgn}(\boldsymbol{e})$ 求 $\dot{V}$。

对 $\boldsymbol{\zeta}$ 求导得:

$$\dot{\boldsymbol{\zeta}}=\frac{1}{|\boldsymbol{e}|^{1/2}}[N\boldsymbol{\zeta}+\boldsymbol{\eta}] \tag{15}$$

式中: $\boldsymbol{N}=\begin{pmatrix}-\frac{1}{2}k_1 & \frac{1}{2}\\ -k_2 & 0\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\frac{\boldsymbol{\rho}}{2} & 0\end{bmatrix}$

对 V 沿系统轨迹求导:

$$\dot{V}=\dot{\boldsymbol{\zeta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{\zeta}+\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\dot{\boldsymbol{\zeta}}=-\frac{1}{|\boldsymbol{e}|^{1/2}}\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\zeta}+\frac{1}{|\boldsymbol{e}|^{1/2}}\boldsymbol{\rho}\boldsymbol{q}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\zeta} \tag{16}$$

式中: $\boldsymbol{Q}=\frac{k_1}{2}\begin{pmatrix}2k_2+k_1^2 & -k_1\\ -k_1 & 1\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{q}_1^{\mathrm{T}}=\left[\left(2k_2+\frac{k_1^2}{2}\right)\quad -\frac{k_1}{2}\right]$。

使用式(12)的界限可以得出:

$$\dot{V}\leqslant-\frac{1}{|\boldsymbol{e}|^{1/2}}\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}[\tilde{\boldsymbol{Q}}]\boldsymbol{\zeta}+\delta_1\boldsymbol{q}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\zeta} \tag{17}$$

由于:

$$\delta_1\boldsymbol{q}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\zeta}\leqslant\frac{1}{|\boldsymbol{e}|^{\frac{1}{2}}}\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{M})\boldsymbol{\zeta} \tag{18}$$

其中:

$$\boldsymbol{M}=\frac{k_1}{2}\begin{bmatrix}\left(\frac{4k_2}{k_1}+k_1\right)\delta_1 & -\frac{1}{2}\delta_1\\ -\frac{1}{2}\delta_1 & 0\end{bmatrix}$$

代入式(17)可得:

$$\dot{V}\leqslant-\frac{1}{|\boldsymbol{e}|^{\frac{1}{2}}}\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{Q}-\boldsymbol{M}]\boldsymbol{\zeta}=-\frac{1}{|\boldsymbol{e}|^{\frac{1}{2}}}\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}[\tilde{\boldsymbol{Q}}]\zeta \tag{19}$$

式中:

$$\tilde{\boldsymbol{Q}}=\frac{k_1}{2}\begin{bmatrix}2k_2+k_1^2-\left(\frac{4k_2}{k_1}+k_1\right)\delta_1 & -k_1+\frac{1}{2}\delta_1\\ -k_1+\frac{1}{2}\delta_1 & 1\end{bmatrix}$$

根据 Schur 补和式(13)可得 $\tilde{\boldsymbol{Q}}>0$,即可得 $\dot{V}<0$。

由二次型标准不等式可知:

$$|\boldsymbol{e}|^{1/2}\leqslant\|\boldsymbol{\zeta}\|_2\leqslant\frac{V^{1/2}}{\lambda_{\min}^{1/2}(\boldsymbol{P})} \tag{20}$$

由式(20)可知:

$$\dot{V}\leqslant-\frac{1}{|\boldsymbol{e}|^{1/2}}\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{Q}}\boldsymbol{\zeta}\leqslant-\frac{1}{|\boldsymbol{e}|^{1/2}}\lambda_{\min}\{\tilde{\boldsymbol{Q}}\}\|\boldsymbol{\zeta}\|_2^2\leqslant-\gamma V^{1/2} \tag{21}$$

式中: $\lambda_{\min}\{\boldsymbol{P}\}$ 为 $\boldsymbol{P}$ 的最小特征值,$\gamma=\lambda_{\min}(\tilde{\boldsymbol{Q}})/\lambda_{\min}^{1/2}(P)$,$\|\boldsymbol{\zeta}\|_2^2=|\boldsymbol{e}|+\boldsymbol{g}^2$ 是 $\boldsymbol{\zeta}$ 的欧几里得数。

根据式(21)求解如下微分方程,初始条件为 $v(0)=v_0\geqslant 0$,有:

$$\dot{v}=-\gamma v^{1/2} \tag{22}$$

得到微分方程解:

$$v(t)=\left(v_0^{1/2}-\frac{\gamma}{2}t\right)^2 \tag{23}$$

因此 $\boldsymbol{e}$ 和 $\boldsymbol{g}$ 在有限时间内收敛到 0,误差动态系统 $\dot{\boldsymbol{e}}$ 也将在有限时间内稳定。

证毕。

2.3 永磁体磁链重构

当系统状态运动趋近于滑模面时,由滑模等值原理可知 $\boldsymbol{e}=\dot{\boldsymbol{e}}=0$,由式(9)可得重构的永磁体磁链 $\hat{\psi}_{rd}$、$\hat{\psi}_{rq}$ 为:

$$\begin{cases}\hat{\psi}_{rq}=\dfrac{L_d}{\boldsymbol{\omega}_e}\left[k_1|e_d|^{1/2}\mathrm{sgn}(e_d)+\int k_2\mathrm{sgn}(e_d)\mathrm{d}t\right]\\ \hat{\psi}_{rd}=-\dfrac{L_q}{\boldsymbol{\omega}_e}\left[k_1|e_q|^{1/2}\mathrm{sgn}(e_q)+\int k_2\mathrm{sgn}(e_q)\mathrm{d}t\right]\end{cases} \tag{24}$$

3 仿真

基于 STA-SMO 的六相永磁电机控制系统如图 3 所示。控制系统包括双环负反馈、超螺旋观测器、位置传感器以及磁链重构等部分。采用 $i_d=0$ 的控制策略,设置 $i_x^*=i_y^*=0$。电机参数如表 1 所示。

永磁电机的失磁动态过程可通过设置磁链幅值 $|\psi_r|$ 和位置偏差 γ 来模拟。初始负载设置为 0 N·m,在 0.2 s 时加 50 N·m 阶跃型负载;在 2 s 时转子磁链幅值由 0.68 Wb 减小为 0.48 Wb;在 3 s 时偏差角 γ 由 0 变为 30°。图 4(a)所示为基于 SMO 的电流实际值、观测值及其观测误差,图 4(b)、(c)所示分别为基于 SMO 的磁链实际值、观测值及其观测误差。图 5(a)所示为基于 STA-SMO 的电流实际值、观测值及其观测误差,图 5(b)、(c)

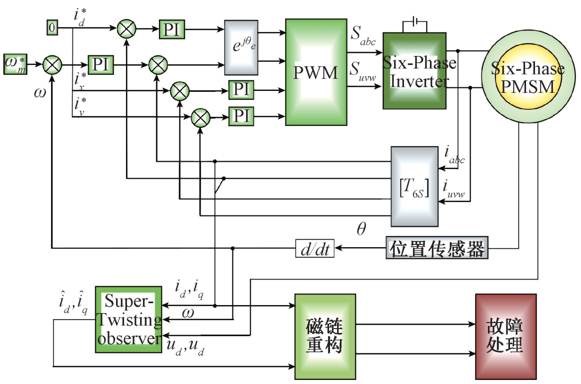


图 3　基于 STA-SMO 的六相永磁电机控制系统

Fig. 3　Block diagram of PMSM control system based on STA-SMO

表 1　电机参数

Table 1　The nominal value of the motor parameters

参数	数值
电压 V_{dc} /V	300
相电阻 R/Ω	1. 4
极对数 n_p /对	3
d 轴电感 L_d/H	0. 008
q 轴电感 L_d/H	0. 008
永磁体磁链 ψ_{r0} /Wb	0. 68
转动惯量 $J/(\mathrm{kg\cdot m^2})$	0. 015

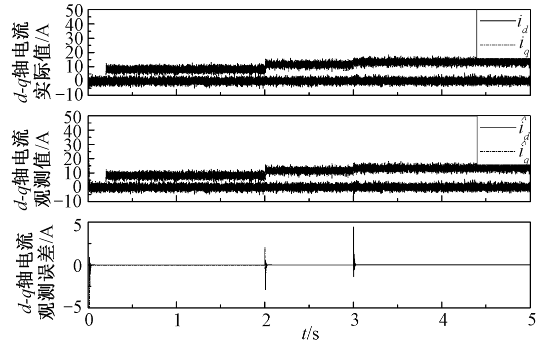
所示分别为基于 STA-SMO 的磁链实际值、观测值及其观测误差图。

对比图 4(a)和 5(a)发现,基于 STA-SMO 的电流观测误差值波动相比 SMO 明显更小,并且能迅速收敛至 0;对比图 4(b)、(c)和图 5(b)、(c)发现,STA-SMO 的磁链重构值 $\hat{\psi}_{rd}$、$\hat{\psi}_{rq}$ 相比 SMO 能迅速且准确地跟踪实际值 ψ_{rd}、ψ_{rq} 变化,有效地抑制了抖振。由图 5(b)、(c)得到磁链幅值在 2 s 时由 0. 68 Wb 收敛至 0. 479 9 Wb,在 3 s 时偏差角由 0°增加为 30°,此时仿真得到 d 轴磁链估计值 $\hat{\psi}_{rd}$ 为 0. 415 4 Wb,q 轴磁链估计值 $\hat{\psi}_{rq}$ 为 0. 239 9。而 d-q 轴磁链的实际值为 $\psi_{rd} \approx 0.48\cos 30° = 0.415\ 7$ Wb, $\psi_{rq} \approx 0.48\sin 30° = 0.24$ Wb。

通过仿真可知,与传统 SMO 相比,本文提出的 STA-SMO 有效抑制了抖振,鲁棒性更强,对故障重构精度更高。

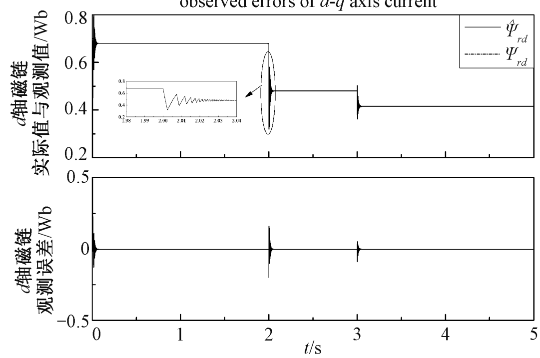
4　实验

由于永磁同步电机失磁故障情况很难用实体电机模拟,故采用电机硬件在环半实物仿真平台来完成实验。采用 RT-LAB(OP5600)来模拟永磁同步电机和逆变器部分,采用 DSP TMS320F2812 作为控制器,



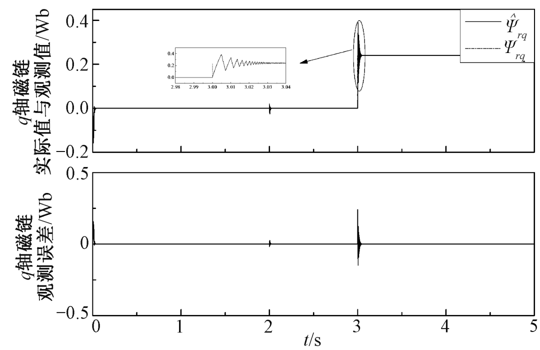
(a) d-q 轴电流实际值、观测值及其观测误差

(a)The actual values, observed values and observed errors of d-q axis current



(b) d 轴磁链实际值、观测值及其观测误差

(b)The actual values, observed values and observed errors of d-axis flux linkage



(c) q 轴磁链实际值、观测值及其观测误差

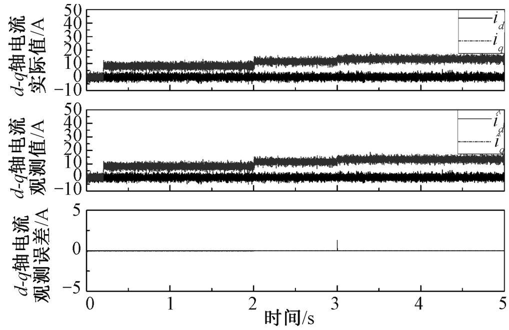
(c)The actual values, observed values and observed errors of q-axis flux linkage

图 4　基于 SMO 的失磁故障重构仿真结果

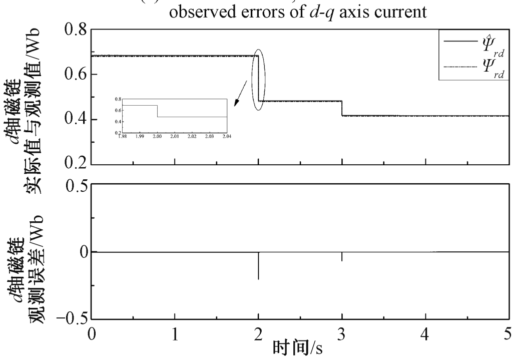
Fig. 4　Simulation results of reconstruction of demagnetization fault based on SMO

来验证本文提出算法的可靠性。实验参数设置与仿真相同。

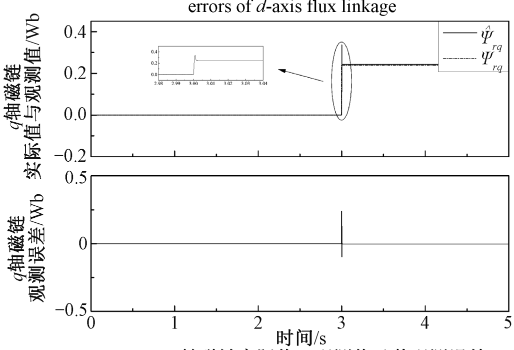
图 6 所示为基于 SMO 的失磁故障重构实验波形。图 7 所示为基于 STA-SMO 的失磁故障重构实验波形。由图 6(a)和 7(a)可以看出,基于 STA-SMO 观测电流波动相比 SMO 的较小。由图 6(b)和 7(b)可以看出,在 2 s 磁链幅值发生变化和 3 s 偏差角发生变化时,SMO 能跟踪磁链的变化,但存在很大的抖动;而 STA-SMO 能快速准确地跟踪磁链的变化且抖振很小,极大地提高了失磁故障重构的精度和鲁棒性。



(a) d-q轴电流实际值、观测值及其观测误差
(a)The actual values, observed values and observed errors of d-q axis current



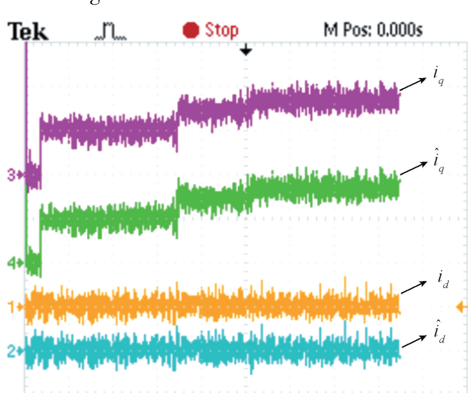
(b) d轴磁链实际值、观测值及其观测误差
(b)The actual values, observed values and observed errors of d-axis flux linkage



(c) q轴磁链实际值、观测值及其观测误差
(c)The actual values, observed values and observed errors of q-axis flux linkage

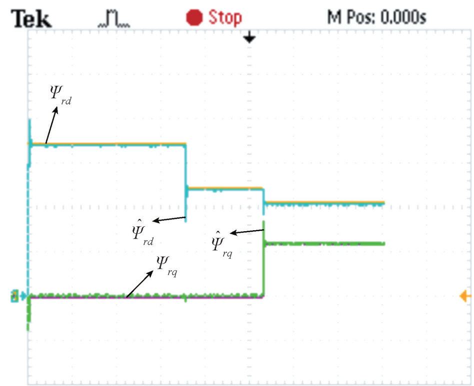
图 5 基于 STA-SMO 的失磁故障重构仿真结果

Fig. 5 Simulation results of reconstruction of demagnetization fault based on STA-SMO



i_d、i_q、$\hat{i}_d$、$\hat{i}_q$/(8 A/div), 时间(0.6 s/div)

(a) d-q轴实际电流与观测电流
(a) The actual current and observed current of d-q axis

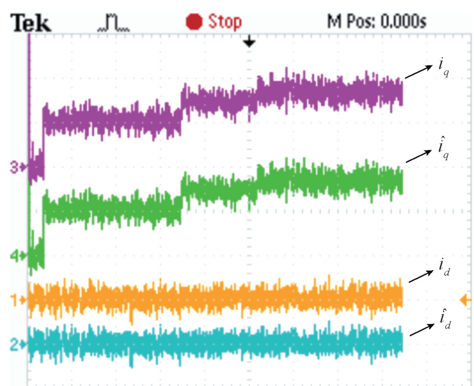


Ψ_{rd}、Ψ_{rq}、$\hat{\Psi}_{rd}$、$\hat{\Psi}_{rq}$/ (0.2 Wb/div), 时间(0.6 s/div)

(b) d-q轴磁链重构实验结果
(b) Experimental results of d-q axis flux reconstruction

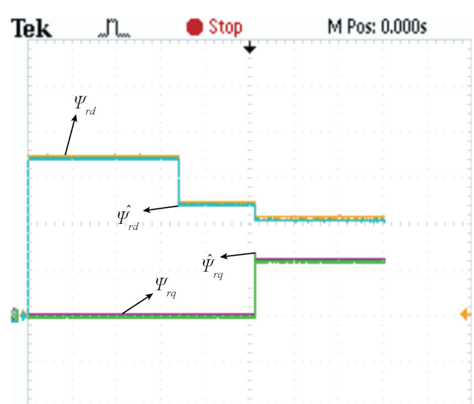
图 6 基于 SMO 的失磁故障重构实验结果

Fig. 6 Experimental results of reconstruction of demagnetization fault based on SMO



i_d、i_q、$\hat{i}_d$、$\hat{i}_q$/(8 A/div), 时间(0.6 s/div)

(a) d-q轴实际电流与观测电流
(a) The actual current and observed current of d-q axis



Ψ_{rd}、Ψ_{rq}、$\hat{\Psi}_{rd}$、$\hat{\Psi}_{rq}$/ (0.2 Wb/div), 时间(0.6 s/div)

(b) d-q轴磁链重构实验结果
(b) Experimental results of d-q axis flux reconstruction

图 7 基于 STA-SMO 的失磁故障重构实验结果

Fig. 7 Experimental results of reconstruction of demagnetization fault based on STA-SMO

5 结 论

本文提出了一种基于超螺旋滑模观测器的六相永磁同步电机永磁体失磁故障重构方法。通过 VSD 变换构建六相永磁同步电机失磁故障数学模型;设计 STA-SMO 对转子永磁体失磁故障进行了精确重构,并采用一种类二次型 Lyapunov 函数来证明了所设计的 STA-SMO 的稳定性。仿真与实验的一致性验证了该方法的有效性,与基于传统滑模观测器相比,本文设计的 STA-SMO 跟踪时产生的抖动更小,具有更好的动态响应和稳态精度。

参考文献

[1] 邱腾飞, 温旭辉, 赵峰, 等. 永磁同步电机永磁磁链自适应观测器设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2287-2294.
QIU T F, WEN X H, ZHAO F, et al. Design strategy of permanent magnet flux linkage adaptive observer for permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE,2015, 35(9): 2287-2294.

[2] 苏光靖, 李红梅, 李争. 基于二阶广义积分器的永磁同步电机新型磁链观测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2018, 32(1): 81-88.
SU G J, LI H M, LI ZH. Novel flux observation method for permanent magnet synchronous motor based on second-order generalized integrator [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(1): 81-88.

[3] 王要强, 冯玉涛, 马小勇, 等. 永磁同步电机转子位置复合检测及起动运行策略[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 230-238.
WANG Y Q, FENG Y T, MA X Y, et al. Rotor position composite detection and start operation strategy of permanent magnet synchronous motor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2019, 40(8): 230-238.

[4] 李红梅, 陈涛, 姚宏洋. 电动汽车 PMSM 退磁故障机理、诊断及发展[J]. 电工技术学报,2013, 28(8): 276-284.
LI H M, CHEN T, YAO H Y. Mechanism, diagnosis and development of demagnetization fault for PMSM in electric vehicle [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 276-284 (in Chinese).

[5] 赵凯辉, 殷童欢, 张昌凡, 等. 永磁同步电机无模型滑模控制方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2018, 32(4): 172-180.
ZHAO K H, YIN T H, ZHANG CH F, et al. Research on model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(4): 172-180.

[6] 吴公平, 黄守道, 饶志蒙, 等. 新型 N*3 相永磁同步电机的特性分析及其预测控制[J]. 中国电机工程学报,2019, 39(4): 1171-1181.
WU G P, HUANG SH D, RAO ZH M, et al. Characteristic analysis and predictive control of a novel N*3-phase permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE,2019, 39(4): 1171-1181.

[7] QIU J, REN M, NIU Y, et al. Fault estimation for nonlinear dynamic systems [J]. Circuits Systems & Signal Processing, 2012, 31(2):555-564.

[8] GAO C. Robust adaptive fault estimation for a class of nonlinear systems subject to multiplicative faults [J]. Circuits Systems & Signal Processing, 2012, 31(6): 2035-2046.

[9] EDWARDS C. Sliding mode methods for fault detection and fault tolerant control[J]. Ifac Proceedings Volumes, 2012, 22(1):109-124.

[10] HE J, ZHANG C F. Fault reconstruction based on sliding mode observer for nonlinear systems [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012(6):1-22.

[11] EDWARDS C, SPURGEON S K, PATTON R J. Sliding mode observers for fault detection and isolation [J]. Automatica, 2011, 36(4):541-553.

[12] 陆婋泉, 林鹤云, 冯奕, 等. 永磁同步电机无传感器控制的软开关滑模观测器[J]. 电工技术学报,2015, 30(2): 106-113.
LU X Q, LIN H Y, FENG Y, et al. Soft switching sliding mode observer for PMSM sensorless control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 106-113.

[13] CHALANGA A, KAMAL S, FRIDMAN L, et al. Implementation of super-twisting control: Super-twisting and higher order sliding mode observer based approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6):3677-3685.

[14] RATH J J, VELUVOLU K C, DEFOORT M, et al. Higher-order sliding mode observer for estimation of tyre friction in ground vehicles[J]. IET Control Theory and Applications, 2014, 8(6):399-408.

[15] 张懿, 吴嘉欣. 离散型变增益永磁同步电机超螺旋滑模观测器[J]. 电工技术学报,2018, 33(21): 66-74.
ZHANG Y, WU J. Discrete variable gain super-twisting sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018, 33(21): 66-74.

[16] ZHAN Y, GUAN J, ZHAO Y. An adaptive second-order sliding-mode observer for permanent magnet synchronous motor with an improved phase-locked loop structure considering speed reverse [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, 42(5): 1008-1021.

[17] 刘震, 苗述, 李汶浍, 等. 基于 Super-Twisting 滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制[J]. 东北大学学报(自然科学版),2020, 41(5): 741-746.
LIU Z, MIAO SH, LI W H, et al. Super-twisting sliding mode observer based sensorless control of PMSM [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(5): 741-746.

[18] RAFIQ M, REHMAN S U, REHMAN F U, et al. A second order sliding mode control design of a switched reluctance motor using super twisting algorithm [J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2012 (25): 106-117.

[19] 胡正高, 赵国荣, 黄婧丽, 等. 基于二阶滑模观测器的连续系统故障估计[J]. 控制与决策, 2014, 29(12): 2271-2276.
HU ZH G, ZHAO G R, HUANG J L, et al. Fault estimation of continuous-time systems based on second order sliding mode observation [J]. Control and Decision, 2014, 29(12): 2271-2276.

[20] 张谦, 李东. 带参数辨识的自适应二阶滑模观测器 PMSM 无传感器矢量控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(7): 1385-1393.
ZHANG Q, LI D. Adaptive second-order sliding mode observer with parameter identification for PMSM sensorless vector control [J]. Control and Decision, 2019, 34(7): 1385-1393.

[21] 郭小萍, 杨猛, 李元. 基于改进重构贡献图的故障定位方法[J]. 仪器仪表学报,2015, 36(5): 1193-1200.
GUO X P, YANG M, LI Y. Modified reconstruction-based contribution plots for fault isolation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 1193-1200.

[22] 张昌凡, 吴公平, 何静, 等. 一种永磁同步电机失磁故障容错预测控制算法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(15): 100-110.
ZHANG CH F, WU G P, HE J, et al. Fault-tolerant predictive control for demagnetization faults in permanent magnet synchronous machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(15): 100-110.

[23] 何静, 张昌凡, 贾林, 等. 一种永磁同步电机的失磁故障重构方法研究[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(2): 8-14.
HE J, ZHANG CH F, JIA L, et al. Demagnetization fault reconstruction for permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(2): 8-14.

[24] LI F, HU Z, ZHAO G. Fault estimation and adaptive fault tolerant control for dynamic systems based on the second-order sliding mode observer[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2016, 230(3): 222-230.

[25] 匡晓霖, 徐金全, 黄春蓉, 等. 六相永磁同步电机驱动控制方式[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(7): 1361-1369.
KUANG X, XU J, HUANG C, et al. Drive-control modes of six-phase PMSM [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(7): 1361-1369.

作者简介

赵凯辉, 1997 年于中南大学获得学士学位, 2005 年于东南大学获得硕士学位, 2015 年于中南大学获得博士学位, 现为湖南工业大学副教授, 主要研究方向为永磁同步电机智能控制及故障诊断。

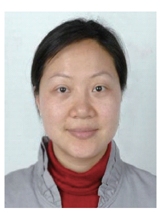
E-mail: zhaokaihui@hut.edu.cn

Zhao Kaihui received B. Sc. from Central South University in 1997, M. Sc. from Southeast University in 2005, and Ph. D. from Central South University in 2015, respectively. Now he is an associate professor at Hunan University of Technology. His main research interest includes intelligent control and fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor.

冷傲杰, 2017 年于阜阳师范学院获得学士学位, 现为湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为非线性系统故障诊断。

E-mail: lengaj520@163.com

Leng Aojie received his B. Sc. degree from Fuyang Normal University in 2017. He is currently a M. Sc. candidate at Hunan University of Technology. His main research interests include fault diagnosis of nonlinear systems.



何静(通信作者), 2002 年于中南林业科技大学获得硕士学位, 2009 年于国防科技大学获得博士学位, 现为湖南工业大学教授, 主要研究方向为机电系统故障诊断等。

E-mail: hejing@263.net

He Jing (Corresponding author) received her M. Sc. degree from Central South University of Forestry and Technology in 2002, Ph. D. degree from National University of Defense

Technology in 2009. Now she is a professor at Hunan University of Technology. Her main research interest includes electro-mechanical system fault diagnosis.

陈跃,2017 年于阜阳师范学院获得学士学位,现为湖南工业大学硕士研究生,主要研究方向为电力传动及其故障诊断。

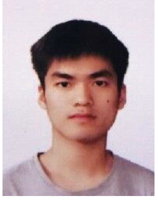
E-mail:chenyue1285@ 163. com

Chen Yue received his B. Sc. degree in Fuyang Normal University in 2017. He is currently a M. Sc. candidate at Hunan University of Technology. His main research interests include electric traction and transmission control.

周瑞睿,2018 年于黑龙江科技大学获得学士学位,现为湖南工业大学硕士研究生,主要研究方向为永磁同步电机故障诊断与容错控制。

E-mail: zhouruirui1996@ 163. com

Zhou Ruirui received B. Sc. degree from Heilongjiang University of Science and Technology in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Hunan University of Technology. His main research interests include fault diagnosis and fault-tolerant control of permanent magnet synchronous motor.



戴旺坷,2019 年于湖南工业大学获得学士学位,现为湖南工业大学硕士研究生,主要研究方向为永磁同步电机故障诊断与容错控制。

E-mail: 1123785092@ qq. com

Dai Wangke received B. Sc. degree from Hunan University of Technology in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Hunan University of Technology. His main research interests include fault diagnosis and fault-tolerant control of permanent magnet synchronous motor.

吴思成,2019 年于湖南工业大学获得学士学位,现为湖南工业大学硕士研究生,主要研究方向为深度学习与噪声控制。

E-mail:mute9757@ 163. com

Wu Sicheng received B. Sc. degree from Hunan University of Technology in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Hunan University of Technology. His main research interests include deep learning and noise control.