

基于自适应滑模观测器的新能源汽车驱动系统 电流传感器微小故障诊断

许水清¹, 刘锋¹, 何怡刚¹, 胡友强^{2*}, 柴毅²

- (1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽省 合肥市 230009;
2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044)

Minor Fault Diagnosis for Current Sensor of New Energy Vehicle Drive System Based on Adaptive Sliding Mode Observer

XU Shuiqing¹, LIU Feng¹, HE Yigang¹, HU Youqiang^{2*}, CHAI Yi²

- (1. College of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui Province, China;
2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: In order to detect the minor fault of the current sensor in the permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive system of new energy vehicle timely and accurately, a minor fault diagnosis method based on adaptive sliding mode observer is proposed in this paper. First, the hybrid logic dynamic model of the drive system with minor fault of current sensor is constructed, and then the fault reconstruction of minor fault of current sensor is carried out by using state augmentation and nonsingular coordinate transformation. In addition, an adaptive sliding mode observer with fast convergence and high-frequency chattering suppression is designed to accurately estimate the reconstructed state of the system. Finally, the residual between the actual value and the observed value of the system reconstruction state is used as the detection variable, and the norm is used to design the adaptive threshold. The method proposed in this paper can not only diagnose minor fault and obvious fault, but also detect the whole process from minor fault to fault and even failure, with high accuracy and strong robustness. The experimental results verify the accuracy and robustness of the proposed diagnosis method.

KEY WORDS: PMSM drive system; current sensor; minor fault; adaptive sliding mode observer; adaptive threshold

基金项目: 国家自然科学基金(重点项目)(U2034209); 国家自然科学基金(面上项目)(51977153); 中国博士后科学基金面上项目(2020M682474)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (Key Program)(U2034209); National Natural Science Foundation of China (General Program)(51977153); China Postdoctoral Science Foundation (2020M682474).

摘要: 为及时准确地检测出新能源汽车永磁同步电机驱动系统电流传感器微小故障, 该文提出一种基于自适应滑模观测器的微小故障诊断方法。该方法首先构建含有电流传感器微小故障的驱动系统混合逻辑动态模型, 其次利用状态增广和非奇异坐标变换对电流传感器微小故障进行故障重构, 然后设计收敛速度快且能够抑制高频抖振的自适应滑模观测器以精确估计系统重构状态, 最后采用系统重构状态实际值与观测值残差作为检测变量并利用范数设计自适应阈值。该文提出的方法不仅能诊断微小故障和显著故障, 而且可以检测从微小故障演变为显著故障乃至失灵的整个过程, 准确性高、鲁棒性强。实验结果验证了所提诊断方法的准确性和鲁棒性。

关键词: 永磁同步电机驱动系统; 电流传感器; 微小故障; 自适应滑模观测器; 自适应阈值

0 引言

随着新能源汽车技术的快速发展, 永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)因其具有高功率密度和高效等優點, 已成为新能源汽车中广泛应用的驱动电机^[1-2]。然而, PMSM 工作环境复杂多变且长时间不间断运行, 导致其故障多发, 其中驱动系统电流传感器故障是影响 PMSM 运行安全的主要故障之一^[3-4]。相对于电流传感器显著故障, 过载电流冲击或性能退化等易引起的微小故障, 具有幅值小、故障特征不明显的特点, 在初期对系统的影响很难察觉, 然而经过时间的积累, 故障幅值逐渐增大, 可能演变为对系统性能具有破

坏性影响的故障^[5-6]。因此,研究 PMSM 驱动系统电流传感器微小故障诊断方法,对新能源汽车 PMSM 的安全运行具有重要意义。

目前, PMSM 驱动系统电流传感器显著故障诊断方法已经取得了丰富的研究成果^[7-8]。文献[9]利用归一化处理的三相输出电流和转子角度,构造故障检测变量并设计自适应阈值,以实现 PMSM 的电流传感器的开路故障诊断。文献[10]通过相电流与母线电流的残差构造故障检测变量,利用电压注入的方法实现 PMSM 驱动系统电流传感器漂移故障诊断。文献[11]构建 PMSM 驱动系统的全维状态观测器以观测三相电流,根据归一化处理的电流观测值与实际值残差设计诊断变量,实现电流传感器增益和开路故障诊断。上述方法虽对 PMSM 驱动系统电流传感器显著故障进行了深入研究,但是电流传感器微小故障征兆信息弱、幅值低,易淹没在各类噪声和误差中,故障检测难度更大,使得上述电流传感器显著故障诊断方法难以适用,因此 PMSM 驱动系统电流传感器微小故障诊断亟待进一步研究。

当前传感器微小故障诊断方法主要包括数据驱动的解析模型的方法。基于数据驱动的诊断方法是对监测信息进行分析,挖掘出其中蕴含的微弱故障信息,从而实现传感器微小故障诊断^[12-14]。如文献[15]利用主成分分析法提取高速列车电流、电压和速度传感器信息构造故障检测变量,实现高速列车多传感器微小故障诊断。基于数据驱动的诊断方法依赖于监测信息的数量和质量,且易受系统噪声等未知因素的影响,在诊断过程中使得原本微弱的征兆信息被混叠掩盖,造成微小故障漏报和误报。

基于解析模型的诊断方法主要通过分析和估计实际传感器输出与参考模型输出之间的残差来进行故障诊断^[16-17]。如文献[18]对单相三电平整流器构建滑模观测器,根据观测电压与测量电压的残差设计诊断变量,实现电压传感器微小故障诊断。文献[19]通过将异步电机驱动系统解耦为两个子系统,并利用滑模观测器的观测电流与实际电流的残差构造诊断变量,实现了电流传感器微小故障诊断。文献[20]首先设计扩展卡尔曼滤波器提取核电站温度传感器的数据,然后基于 Kullback-Leibler 散度构造故障检测变量,实现温度传感器微小故障诊断。基于解析模型的诊断方法具有诊断时间短和计算成本低等优点,已在传感器微小故障诊断中广

泛应用。但是,上述解析模型法的诊断对象与 PMSM 驱动系统电流传感器在运行环境及故障发生原因等方面有着较大不同,其方法难以直接应用。因此,如何建立新能源汽车 PMSM 驱动系统的精确模型,并设计合适的诊断自适应阈值,是实现其电流传感器微小故障诊断的核心与关键。

为此,本文提出一种基于自适应滑模观测器的 PMSM 驱动系统电流传感器微小故障诊断方法。该方法首先构建含有电流传感器微小故障的驱动系统混合逻辑动态模型,并利用状态增广和非奇异坐标变换对电流传感器微小故障进行故障重构。其次,设计收敛速度快且能够抑制高频抖振的自适应滑模观测器,以精确估计重构状态。然后,采用系统重构状态实际值与观测值的残差作为故障检测变量并利用范数的性质设计自适应阈值。最后,根据故障检测变量与自适应阈值构造故障诊断标志量,实现 PMSM 驱动系统电流传感器微小故障诊断。

1 模型描述

1.1 逆变器混合逻辑动态模型

PMSM 驱动系统的等效电路图如图 1 所示^[21]。图 1 中:驱动系统逆变电路主要由 6 个带反并联二极管的功率开关管 $V_{k1}, V_{k2}(k=a,b,c)$ 组成; i_a, i_b, i_c 为三相绕组电流; R 为定子电阻; L 为定子绕组电感; $e=(e_a, e_b, e_c)^T$ 为 a,b,c 三相反电动势; U_{dc} 为直流侧母线电压。

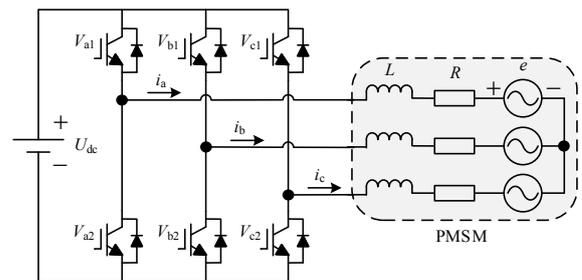


图 1 PMSM 驱动系统的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of PMSM drive system

由 PMSM 驱动系统的工作原理可知,驱动系统逆变器的混合逻辑动态模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 u + B_2 e \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u=[S_a, S_b, S_c]^T$, S_a, S_b, S_c 为开关信号; $A = \text{diag}(-R/L \ -R/L \ -R/L)$; $x=[i_a \ i_b \ i_c]^T$; $C = \text{diag}(1 \ 1 \ 1)$; $B_2 = \text{diag}(-\frac{1}{L} \ -\frac{1}{L} \ -\frac{1}{L})$; $B_1 = \frac{U_{dc}}{3L} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$;

\mathbf{x} 为三相电流实际值； \mathbf{y} 为电流传感器测量的三相电流值。

由此可知，式(1)建立了逆变器混合逻辑动态模型与电流传感器特性之间的关联。

1.2 电流传感器微小故障动态模型

根据 PMSM 驱动系统电流传感器故障幅值演变的速率，将故障分为微小故障、故障和失灵 3 个阶段^[22]。微小故障是指测量值偏离正常值程度小的故障，其幅值小、故障特征不明显，对系统的影响很难察觉，但随着时间的变化会造成一定的影响，可能会演变为更严重的对系统性能具有破坏性影响的故障^[22]。本节将引用如下的引理，利用动态模型描述电流传感器故障的演变速率。

引理 1^[22] 对于任意的分段连续向量函数 $\mathbf{f} : \mathbf{R}^+ \rightarrow \mathbf{R}^q$ 和任意的 Hurwitz 矩阵 $\mathbf{A}_f \in \mathbf{R}^{q \times q}$ ，存在一个输入向量 $\boldsymbol{\varphi} \in \mathbf{R}^q$ ，满足 $\dot{\mathbf{f}} = \mathbf{A}_f \mathbf{f} + \boldsymbol{\varphi}$ 。

根据引理 1，本文考虑的电流传感器微小故障 \mathbf{f}_s 可以表示成如下的动态模型^[22]：

$$\dot{\mathbf{f}}_s = \mathbf{A}_s \mathbf{f}_s + \boldsymbol{\varphi} \quad (2)$$

式中： $\mathbf{A}_s \in \mathbf{R}^{q \times q}$ 为 Hurwitz 矩阵； $\boldsymbol{\varphi} \in \mathbf{R}^q$ 为微小故障激励信号。

求解式(2)，可得 $\mathbf{f}_s = \int_0^t e^{\mathbf{A}_s(t-\tau)} \boldsymbol{\varphi} d\tau$ ，表明微小故障 \mathbf{f}_s 是连续的，且幅值变化的快慢由 \mathbf{A}_s 决定。当根据经验选定 \mathbf{A}_s 后， $\boldsymbol{\varphi}$ 的大小决定微小故障 \mathbf{f}_s 的幅值。需要说明的是， \mathbf{A}_s 并不是设计的参数，而是根据历史数据或经验选定的任意 Hurwitz 矩阵。

在此基础上，图 2 展示了一种电流传感器微小故障信号 \mathbf{f}_s 的演变示意过程。由图 2 可知，随着 $\boldsymbol{\varphi}$ 的增大，当 $0 \leq t < T_1$ 时，故障激励信号 $0 \leq \|\boldsymbol{\varphi}\| < \varphi_1$ ，在电流的谐波畸变允许范围内；当 $t \geq T_1$ 时 $\|\boldsymbol{\varphi}\| \geq \varphi_1$ ，发生电流传感器微小故障；当 $t \geq T_2$ 时 $\|\boldsymbol{\varphi}\| \geq \varphi_2$ ，发生电流传感器故障；当 $t \geq T_3$ 时 $\|\boldsymbol{\varphi}\| \geq \varphi_3$ ，电流传感器失灵。需要说明的是，图 2 只是抽象出来用于表征实际运行中一类电流传感器微小故障的演变过程，也

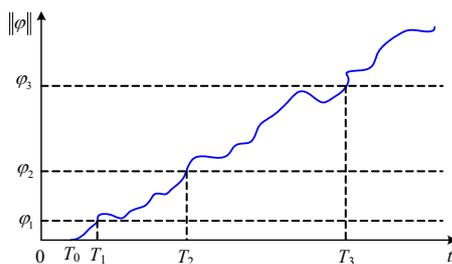


图 2 电流传感器微小故障演变过程

Fig. 2 Evolution process of current sensor minor fault

可以用其他示意图来表征。

此外，对于实际运行的新能源汽车 PMSM 驱动系统而言，一般要求在全负载范围内，三相电流的总谐波畸变率低于 5%。因而，本节定义如下的故障幅值变量 Δ 来表示电流传感器的故障程度

$$\Delta = \|\mathbf{f}_s\| / \|\mathbf{I}_{\text{real}}\| \times 100\% \quad (3)$$

式中： $\|\mathbf{f}_s\|$ 为故障幅值； $\|\mathbf{I}_{\text{real}}\|$ 为实际电流幅值。

根据以上定义，当 $5\% \leq \Delta < 15\%$ 时，定义电流传感器发生微小故障，故障幅值偏离正常值较小，对系统性能影响较小。当 $15\% \leq \Delta < 50\%$ 时，定义电流传感器发生故障，故障值偏离正常值较大，系统性能受到一定影响。当 $\Delta \geq 50\%$ 时，定义电流传感器发生失灵，故障值偏离正常值大，严重影响系统稳定性，甚至导致系统崩溃。由于本文的故障程度变量定义为幅值比，且考虑了实际系统中存在的谐波干扰。因此，本文算法不受电流传感器个体差异影响。

在以上分析的基础上，结合式(1)，同时考虑 PMSM 驱动系统在实际工作中存在测量噪声等未知干扰，则含有电流传感器微小故障的驱动系统逆变器混合逻辑动态模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\mathbf{u} + \mathbf{B}_2\mathbf{e} + \mathbf{G}\mathbf{d} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{f}_s \end{cases} \quad (4)$$

式中： \mathbf{f}_s 为电流传感器微小故障； \mathbf{F} 为故障 \mathbf{f}_s 系数矩阵； \mathbf{d} 为有界未知扰动； \mathbf{G} 为扰动系数矩阵。

由 $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{f}_s$ 可以看出，式(4)建立的含有电流传感器微小故障的驱动系统逆变器模型与电流传感器特性直接关联。

注 1：在实际运行中，电流传感器微小故障和外部干扰满足 $\|\mathbf{f}_s\| \leq \eta_s$ ， $\|\mathbf{d}\| \leq \eta_d$ ，其中 $\eta_s > 0$ 、 $\eta_d > 0$ 均为已知常数。

2 电流传感器微小故障诊断方法

当 PMSM 驱动系统电流传感器发生微小故障时，若不及时诊断，将会演变成显著故障，严重影响新能源汽车的正常安全运行。然而，电流传感器微小故障发生时，其故障幅值小，难以检测。为此，本文基于 PMSM 驱动系统逆变器混合逻辑动态模型，提出了一种基于自适应滑模观测器的新能源汽车驱动系统微小故障诊断方法，其诊断原理如图 3 所示。首先，对含有电流传感器微小故障的驱动系统混合逻辑动态模型进行状态增广得到增广系统。其次，对增广系统做非奇异坐标变换以重构电流传感器微小故障。然后，设计自适应滑模观测器估计

重构状态,并将重构状态实际值与观测值的残差作为故障检测变量。最后,利用范数的性质设计故障检测变量的自适应阈值,并且构造故障检测标志量实现电流传感器微小故障诊断。

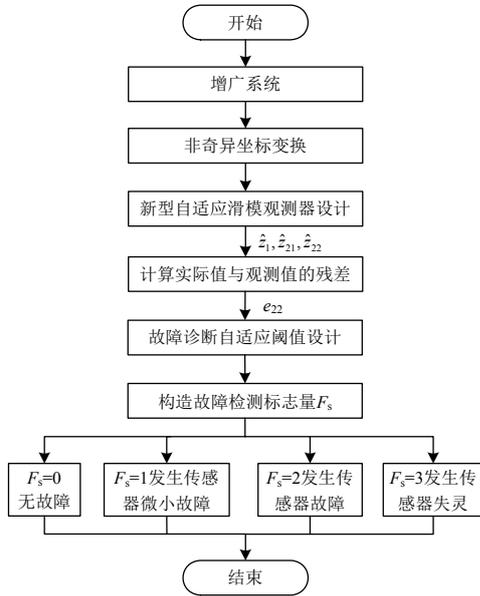


图3 故障诊断原理图

Fig. 3 Schematic diagram of fault diagnosis

2.1 非奇异坐标变换

为实现 PMSM 驱动系统电流传感器微小故障的演变检测,利用状态增广法对含有电流传感器微小故障的驱动系统混合逻辑动态模型(4)进行增广,获得如下所示的增广系统:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}_1 u + \bar{B}_2 e + \bar{G}d + \bar{E}\varphi \\ y = \bar{C}\bar{x} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\bar{C} = [C \ F]$, $\bar{C} \in \mathbf{R}^{p \times (n+q)}$ 行满秩; $\bar{x} \in \mathbf{R}^{n+q}$; $\bar{x} = \begin{bmatrix} x \\ f_s \end{bmatrix}$; $\bar{B}_1 = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix}$; $\bar{B}_2 = \begin{bmatrix} B_2 \\ 0 \end{bmatrix}$; $\bar{G} = \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix}$; $\bar{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$; $\bar{A} = \text{diag}(A \ A_s)$; $\bar{A} \in \mathbf{R}^{(n+q) \times (n+q)}$; $\bar{B}_1 \in \mathbf{R}^{(n+q) \times m}$; $\bar{G} \in \mathbf{R}^{(n+q) \times r}$; $\bar{B}_2 \in \mathbf{R}^{(n+q) \times m}$; $\bar{E} \in \mathbf{R}^{(n+q) \times q}$ 列满秩。

注2: 系统 $(\bar{A}, \bar{E}, \bar{C})$ 为最小相位系统。

引理 2^[23] 在满足注 1 和注 2 的条件下,存在非奇异变换矩阵 T , 使得 $T\bar{A}T^{-1} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix}$, $T\bar{G} =$

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix}, \quad T\bar{B}_1 = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{12} \end{bmatrix}, \quad T\bar{B}_2 = \begin{bmatrix} B_{21} \\ B_{22} \end{bmatrix}, \quad T\bar{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_2 \end{bmatrix},$$

其中, $B_{21} \in \mathbf{R}^{(n+q-p) \times m}$, $E_2 = [0 \ E_{22}]^T$, $z_2 \in \mathbf{R}^p$, $A_1 \in \mathbf{R}^{(n+q-p) \times (n+q-p)}$, $A_3 \in \mathbf{R}^{p \times (n+q-p)}$, $E_2 \in \mathbf{R}^{p \times q}$, $A_2 \in \mathbf{R}^{(n+q-p) \times p}$, $B_{11} \in \mathbf{R}^{(n+q-p) \times m}$, $G_1 \in \mathbf{R}^{(n+q-p) \times r}$, $T \in \mathbf{R}^{(n+q) \times (n+q)}$, $B_{12} \in \mathbf{R}^{p \times m}$, $A_4 \in \mathbf{R}^{p \times p}$, $G_2 \in \mathbf{R}^{p \times r}$, $z_1 \in \mathbf{R}^{n+q-p}$, $B_{22} \in \mathbf{R}^{p \times m}$, $E_{22} \in \mathbf{R}^{q \times q}$ 。

根据引理 2, 令 $z = T\bar{x} = [z_1 \ z_2]^T$, 则系统(5)可进一步表示为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = A_1 z_1 + A_2^1 z_{21} + A_2^2 z_{22} + B_{11} u + B_{21} e + G_1 d \\ \dot{z}_{21} = A_3^1 z_1 + A_4^1 z_{21} + A_4^2 z_{22} + B_{12}^1 u + B_{22}^1 e + G_2^1 d \\ \dot{z}_{22} = A_3^2 z_1 + A_4^3 z_{21} + A_4^4 z_{22} + B_{12}^2 u + B_{22}^2 e + G_2^2 d + E_{22} \varphi \\ y = (C_{21} \ C_{22}) [z_{21} \ z_{22}]^T \end{cases} \quad (6)$$

式中: $z_1 \in \mathbf{R}^{n+q-p}$; $z_2 \in \mathbf{R}^p$; $z_{21} \in \mathbf{R}^{p-q}$; $z_{22} \in \mathbf{R}^q$;

$$A_3 = \begin{bmatrix} A_3^1 \\ A_3^2 \end{bmatrix}; \quad z_2 = \begin{bmatrix} z_{21} \\ z_{22} \end{bmatrix}; \quad B_{12} = \begin{bmatrix} B_{12}^1 \\ B_{12}^2 \end{bmatrix}; \quad G_2 = \begin{bmatrix} G_2^1 \\ G_2^2 \end{bmatrix};$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} A_4^1 & A_4^2 \\ A_4^3 & A_4^4 \end{bmatrix}; \quad A_2 = [A_2^1 \ A_2^2]。$$

同时,从增广系统式(5)和经非奇异坐标变换后的式(6)可以看出, y 仍为微小故障状态下电流传感器测量的三相电流值, z_1 和 z_2 包含了正常状态下的三相电流值和电流传感器微小故障,表明上述系统均与电流传感器特性有直接关联。

2.2 自适应滑模观测器设计

针对获得的增广系统(6),设计如下的自适应滑模观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_1 = A_1 \hat{z}_1 + A_2^1 \hat{z}_{21} + A_2^2 \hat{z}_{22} + B_{11} u + B_{21} e + K_1 (z_1 - \hat{z}_1) + f(s_1) \\ \dot{\hat{z}}_{21} = A_3^1 \hat{z}_1 + A_4^1 \hat{z}_{21} + A_4^2 \hat{z}_{22} + B_{12}^1 u + B_{22}^1 e + K_{21} (z_{21} - \hat{z}_{21}) + f(s_{21}) \\ \dot{\hat{z}}_{22} = A_3^2 \hat{z}_1 + A_4^3 \hat{z}_{21} + A_4^4 \hat{z}_{22} + B_{12}^2 u + B_{22}^2 e + K_{22} (z_{22} - \hat{z}_{22}) + f(s_{22}) \\ \hat{y} = (C_{21} \ C_{22}) [\hat{z}_{21} \ \hat{z}_{22}]^T \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\hat{z}_1, \hat{z}_{21}, \hat{z}_{22}$ 为 z_1, z_{21}, z_{22} 观测值; K_1, K_{21}, K_{22} 为待设计参数矩阵, 满足 $A_1 - K_1 < 0$, $A_4^1 - K_{21} < 0$, $A_4^2 - K_{22} < 0$; $f(s_1), f(s_{21}), f(s_{22})$ 为设计的自适应趋近律。

在本文中,为了加快收敛速度和削弱高频抖振,自适应趋近律 $f(s_1), f(s_{21}), f(s_{22})$ 设计为

$$f(s_1) = \frac{k_1}{\lambda + (1-\lambda)e^{-\alpha|s_1|^p}} |s_1|^p \text{sgn}(s_1) \quad (8)$$

$$f(s_{21}) = \frac{k_{21}}{\lambda + (1-\lambda)e^{-\alpha|s_{21}|^p}} |s_{21}|^p \text{sgn}(s_{21}) \quad (9)$$

$$f(s_{22}) = \frac{k_{22}}{\lambda + (1-\lambda)e^{-\alpha|s_{22}|^p}} |s_{22}|^p \text{sgn}(s_{22}) \quad (10)$$

式中: k_1, k_{21}, k_{22} 为设计的滑模增益; p, λ, α 为正常数, 且 $0 < \lambda < 1, 0 < p < 1$; s_1, s_{21}, s_{22} 为待取滑模面。

在此基础上, 取残差 $e_1 = z_1 - \hat{z}_1$, $e_{21} = z_{21} - \hat{z}_{21}$ 和 $e_{22} = z_{22} - \hat{z}_{22}$, 则由式(6)、(7)可以得到如下的误差动态系统:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = (A_1 - K_1)e_1 + A_2^1 e_{21} + A_2^2 e_{22} + G_1 d - f(s_1) \\ \dot{e}_{21} = A_3^1 e_1 + (A_4^1 - K_{21})e_{21} + A_4^2 e_{22} + G_2^1 d - f(s_{21}) \\ \dot{e}_{22} = A_3^2 e_1 + A_4^3 e_{21} + (A_4^4 - K_{22})e_{22} + G_2^2 d + \\ \quad E_{22} \varphi - f(s_{22}) \\ e_y = C_{21} e_{21} + C_{22} e_{22} \end{cases} \quad (11)$$

需要说明的是, 由于自适应滑模观测器式(7)和误差动态系统式(11)均是基于式(6)获得的, 因此自适应滑模观测器式(7)和误差动态系统式(11)也均与电流传感器特性有直接关联。

注 3: 在误差动态系统(11)中, 残差 e_{22} 的表达式包含了微小故障激励信号 φ , 直接反映 PMSM 驱动系统电流传感器故障变化, 而残差 e_1 和 e_{21} 间接反映电流传感器故障变化。因此, 可直接选择残差 e_{22} 构造故障检测变量实现电流传感器微小故障检测, 同时也能够更好的设计自适应阈值, 提高微小故障检测的准确性。

与此同时, 为了证明趋近律式(8)–(10)的可达性, 以式(9)为例, 给出定理 1; 为了证明自适应滑模观测器(7)的稳定性, 给出定理 2。

定理 1 在满足注 1 和注 2 条件下, 若 k_{21} 满足:

$$k_{21} \geq \|A_3^1\| \|e_1\| + \|A_4^2\| \|e_{22}\| + \|G_2^1 d\| + \varpi \quad (12)$$

则误差动态系统在有限时间 $t_s < T_s$ 内收敛到滑模面上, 其中 $\varpi > 0$ 且为常数, $e_{12}(0) = z_{12}(0) - \hat{z}_{12}(0)$, $T_s = \frac{\|e_{12}(0)\|}{\varpi}$ 。

证明: 取李雅普诺夫(Lyapunov)函数 $V_{21} = e_{21}^T e_{21}$, 则 $\|e_{21}\| = (V_{21})^{1/2}$, 由式(11)可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{21} &= \dot{e}_{21}^T e_{21} + e_{21}^T \dot{e}_{21} = [(A_4^1 - K_{21})e_{21} + \\ & A_3^1 e_1 + A_4^2 e_{22} + G_2^1 d - f(s_{21})]^T e_{21} + \\ & e_{21}^T [(A_4^1 - K_{21})e_{21} + A_3^1 e_1 + A_4^2 e_{22} + G_2^1 d - \\ & f(s_{21})] = e_{21}^T [(A_4^1 - K_{21}) + (A_4^1 - K_{21})^T] e_{21} + \\ & 2e_{21}^T (A_3^1 e_1 + A_4^2 e_{22} + G_2^1 d) - 2e_{21}^T f(s_{21}) \end{aligned} \quad (13)$$

由于 $A_4^1 - K_{21} < 0$, 故 $A_4^1 - K_{21} + (A_4^1 - K_{21})^T < 0$, 则

$$\dot{V}_{21} \leq 2e_{21}^T (A_3^1 e_1 + A_4^2 e_{22} + G_2^1 d) - 2e_{21}^T f(s_{21}) \quad (14)$$

将式(8)代入式(14), 可得:

$$\dot{V}_{21} \leq 2\|e_{21}\| (\|A_3^1\| \|e_1\| + \|A_4^2\| \|e_{22}\| + \|G_2^1 d\|) - 2\|e_{21}\| k_{21} \quad (15)$$

将式(12)代入式(15), 可得:

$$\dot{V}_{21} \leq -2\|e_{21}\| \varpi = -2\varpi (V_{21})^{1/2} \quad (16)$$

将式(16)两边同时从 0 到 t 积分, 可得 $(V_{21})^{1/2} \leq [V_{21}(0)]^{1/2} - \varpi t$ 。由于 $\|e_{21}\| = (V_{21})^{1/2}$, 故当 $t_s \leq T_s$ 时, $e_{21} \leq \|e_{21}(0)\| - \varpi t$, 当 $t_s > T_s$ 时, $e_{21} = 0$ 。

综上所述, 若 $k_{21} \geq \|A_3^1\| \|e_1\| + \|A_4^2\| \|e_{22}\| + \|G_2^1 d\| + \varpi$, 则最终 $e_{21} = 0$, 即系统(11)最终收敛到滑模面上。
定理 2 在没有发生传感器故障的情况下, 且满足注 1-2 的条件下, 若存在对称正定矩阵 P_1, P_{22} 和矩阵 K_1, K_{22} 满足

$$\Xi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{12}^T & \Phi_{22} \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

其中,

$$\begin{cases} \Phi_{11} = P_1(A_1 - K_1) + (A_1 - K_1)^T P_1 \\ \Phi_{12} = P_1 A_2^2 + (A_2^2)^T P_{22} \\ \Phi_{22} = P_{22}(A_4^4 - K_{22}) + (A_4^4 - K_{22})^T P_{22} \end{cases}$$

则误差动态系统(11)是渐进稳定的。

证明: 取 Lyapunov 函数 $V = V_1 + V_{22}$, 其中 $V_1 = e_1^T P_1 e_1$, $V_{22} = e_{22}^T P_{22} e_{22}$, 且满足 $\|f(s_1)\| > \|G_1 d\|$, $\|f(s_{22})\| > \|G_2^2 d\|$, 则根据误差动态系统(11)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{e}_1^T P_1 e_1 + e_1^T P_1 \dot{e}_1 = e_1^T [P_1(A_1 - K_1) + (A_1 - K_1)^T P_1] \cdot \\ & P_1 e_1 + 2e_1^T P_1 A_2^2 e_{22} + 2e_1^T P_1 [G_1 d - f(s_1)] \leq \\ & e_1^T [P_1(A_1 - K_1) + (A_1 - K_1)^T P_1] e_1 + 2e_1^T P_1 A_2^2 e_{22} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{22} &= \dot{e}_{22}^T P_{22} e_{22} + e_{22}^T P_{22} \dot{e}_{22} = e_{22}^T [P_{22}(A_4^4 - \\ & K_{22}) + (A_4^4 - K_{22})^T P_{22}] e_{22} + 2e_{22}^T P_{22} A_3^2 e_1 + \\ & 2e_{22}^T P_{22} [G_2^2 d - f(s_{22})] \leq e_{22}^T [P_{22}(A_4^4 - K_{22}) + \\ & (A_4^4 - K_{22})^T P_{22}] e_{22} + 2e_{22}^T P_{22} A_3^2 e_1 \end{aligned} \quad (19)$$

由式(18)和式(19)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_1 + \dot{V}_{22} = e_1^T [P_1(A_1 - K_1) + (A_1 - K_1)^T P_1] \cdot \\ & e_1 + 2e_1^T P_1 A_2^2 e_{22} + 2e_1^T P_1 [G_1 d - f(s_1)] + e_{22}^T \cdot \\ & [P_{22}(A_4^4 - K_{22}) + (A_4^4 - K_{22})^T P_{22}] e_{22} + \\ & 2e_{22}^T P_{22} A_3^2 e_1 + 2e_{22}^T P_{22} [G_2^2 d - f(s_{22})] \leq \\ & e_1^T [P_1(A_1 - K_1) + (A_1 - K_1)^T P_1] e_1 + e_{22}^T \cdot \\ & [P_{22}(A_4^4 - K_{22}) + (A_4^4 - K_{22})^T P_{22}] e_{22} + \\ & 2e_1^T [P_1 A_2^2 + (A_2^2)^T P_{22}] e_{22} = e^T \Xi e \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $e = (e_1^T \ e_{22}^T)^T$; $\Xi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{12}^T & \Phi_{22} \end{bmatrix}$ 。

综上所述, 若 $\Xi < 0$, 则 $\dot{V} < 0$, 即误差动态系统(11)的误差最终趋近于 0, 系统是渐进稳定的。

2.3 传感器微小故障演变检测

基于上述设计的自适应滑模观测器, 取含有微

小故障激励信号 φ 的残差幅值 $\|e_{22}\|$ 构造故障检测变量,根据式(11)计算可得 e_{22} 的表达式如下:

$$e_{22} = \int_0^t e^{(A_4^4 - K_{22})\tau} [A_3^2 e_1 + A_4^3 e_{21} + G_2^2 d + E_{22} \varphi - f(s_{22})] d\tau + e^{(A_4^4 - K_{22})t} e_{22}(0) \quad (21)$$

同时,利用范数的三角不等式的性质可得:

$$\|e_{22}\| \leq \int_0^t e^{\lambda_s \tau} (\|A_3^2\| \|e_1\| + \|A_4^3\| \|e_{21}\| + \|G_2^2 d\| + \|E_{22}\| \|\varphi\|) d\tau + e^{\lambda_s t} \omega_s \quad (22)$$

式中: λ_s 满足 $e^{(A_4^4 - K_{22})t} < e^{-\lambda_s t}$; ω_s 是 $\|e_{22}(0)\|$ 的上界,即0。

在此基础上,根据PMSM驱动系统电流传感器微小故障的演变过程,设计不同阶段的自适应阈值,以达到更加准确的诊断效果。需要注意的是,自适应阈值的参数选取需综合考虑故障检测的灵敏性和鲁棒性,避免产生故障漏报或误报。

在PMSM驱动系统电流传感器微小故障阶段, $\varphi_1 \leq \|\varphi\| < \varphi_2$,根据式(22)设计如下检测微小故障的自适应阈值 T_{h1} :

$$T_{h1} = e^{\lambda_s t} \omega_s + \int_0^t e^{\lambda_s \tau} (\|A_3^2\| \|e_1\| + \|A_4^3\| \|e_{21}\| + \|G_2^2 d\| + \|E_{22}\| \varphi_1) d\tau \quad (23)$$

在PMSM驱动系统电流传感器故障阶段, $\varphi_2 \leq \|\varphi\| < \varphi_3$,根据式(22)设计如下检测故障的自适应阈值 T_{h2} :

$$T_{h2} = e^{\lambda_s t} \omega_s + \int_0^t e^{\lambda_s \tau} (\|A_3^2\| \|e_1\| + \|A_4^3\| \|e_{21}\| + \|G_2^2 d\| + \|E_{22}\| \varphi_2) d\tau \quad (24)$$

在PMSM驱动系统电流传感器失灵阶段, $\varphi \geq \varphi_3$,根据式(22)设计如下检测失灵的自适应阈值 T_{h3} :

$$T_{h3} = e^{\lambda_s t} \omega_s + \int_0^t e^{\lambda_s \tau} (\|A_3^2\| \|e_1\| + \|A_4^3\| \|e_{21}\| + \|G_2^2 d\| + \|E_{22}\| \varphi_3) d\tau \quad (25)$$

需要指出的是,故障检测变量即残差 $\|e_{22}\|$ 是利用与电流传感器特性有关联的非奇异坐标变换系统式(6)及其自适应滑模观测器式(7)获得的。因此,本节利用残差 e_{22} 的向量范数设计的故障检测自适应阈值与电流传感器有直接关联,能够反映电流传感器的变化特性。

根据设计的自适应阈值,可得微小故障演变过程的诊断决策规则:如果故障检测变量 $\|e_{22}\|$ 超过自适应阈值 T_{h1} ,则表明电流传感器微小故障发生;如果故障检测变量 $\|e_{22}\|$ 超过自适应阈值 T_{h2} ,则表明

电流传感器故障发生;如果故障检测变量 $\|e_{22}\|$ 超过自适应阈值 T_{h3} ,则表明电流传感器失灵发生。

结合微小故障演变过程的诊断决策规则,为了方便观察电流传感器故障检测结果,构造如下故障检测标志量 F_s :

$$F_s = [\text{sgn}(\|e_{22}\| - T_{h1}) + 1] / 2 + [\text{sgn}(\|e_{22}\| - T_{h2}) + 1] / 2 + [\text{sgn}(\|e_{22}\| - T_{h3}) + 1] / 2 \quad (26)$$

式中故障检测标志量 F_s 的取值为0、1、2、3。若 $F_s=0$,则表明电流传感器正常;若 $F_s=1$,则表明发生电流传感器微小故障;若 $F_s=2$,则表明发生电流传感器故障;若 $F_s=3$,则表明发生电流传感器失灵。

3 实验验证

为了验证本文所提微小故障诊断方法的有效性和鲁棒性,采用如图4所示的硬件在环实验装置进行硬件在环实验验证,该实验装置包括dSPACE模拟器、上位机PC和数字信号处理器(DSP),其中DSP型号为TMS320F28335。实验中PMSM的主要参数如表1所示。

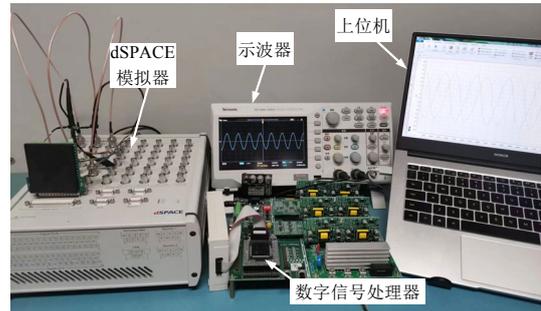


图4 硬件在环实验装置

Fig. 4 Hardware in the loop experimental device

表1 PMSM主要参数

Table 1 Main parameters of PMSM

参数	数值	参数	数值
极对数 p	4	转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.003
定子电感 L/mH	8.5	阻尼系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.008
定子电阻 R/Ω	2.785	直流侧电压 U_{dc}/V	311
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.175	开关(采样)频率 f/kHz	10

3.1 电流传感器微小故障诊断

本节以c相电流传感器发生微小故障为例,验证所提故障诊断方法的有效性。在实验中,基于1.2节中电流传感器微小故障动态模型,设计电流传感器微小故障为 $i' = i + f_s$,式中 $\dot{f}_s = -1000f_s + \varphi$, $\varphi = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 0.185 \\ 5000e^{(1.3+2t)^2} + 150\sin(200\pi t), & 0.185 \leq t < 0.356 \\ 11000, & t \geq 0.356 \end{cases}$ 。即在

0.185s 注入上述电流传感器微小故障。

图 5 给出 c 相电流传感器微小故障的诊断结果。由图 5 可知，c 相电流传感器在 0.185s 发生微小故障后，三相电流的畸变程度、重构状态变量 z_{22} 及其观测值 \hat{z}_{22} 随故障幅值增大而逐渐变大，故障检测变量 $\|e_{22}\|$ 也不断增大。在 $t=0.202s$ 时，故障检测变量 $\|e_{22}\|$ 超过自适应阈值 T_{h1} ，此时故障诊断标志量由 $F_s=0$ 变为 $F_s=1$ ，表明 c 相电流传感器发生微小故障，微小故障检测时间为 17ms。随着故障幅值不断增大，在 $t=0.292s$ 时，故障检测变量 $\|e_{22}\|$ 超过自适应阈值 T_{h2} ，故障诊断标志量由 $F_s=1$ 变为 $F_s=2$ ，即 c 相电流传感器发生故障。在 $t=0.343s$ 时，故障检测变量 $\|e_{22}\|$ 超过自适应阈值 T_{h3} ，故障诊断标志量由 $F_s=2$ 变为 $F_s=3$ ，表明 c 相电流传感器失灵。

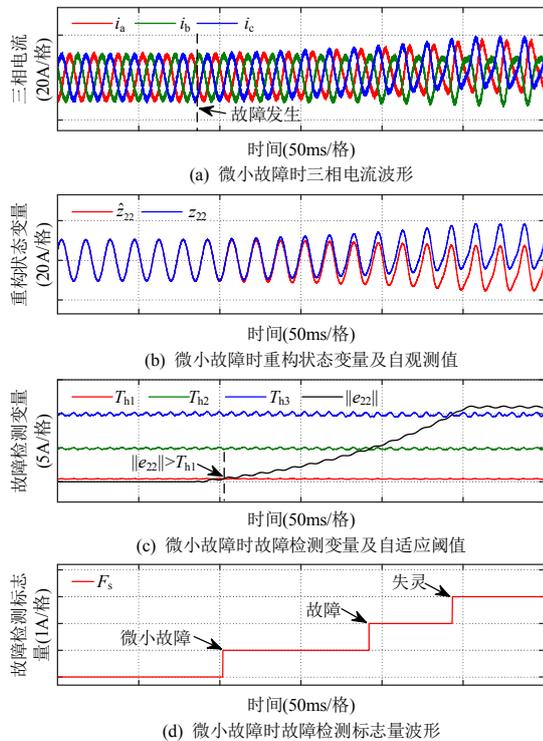


图 5 c 相电流传感器微小故障诊断结果
Fig. 5 Minor fault diagnosis results of phase-c current sensor

3.2 电流传感器显著故障诊断

本节以漂移故障和增益故障为例，验证本文所提诊断方法对显著故障的有效性。典型漂移故障的模型^[24-25]可以表示为

$$i' = \begin{cases} i, & 0 \leq t < t_0 \\ i + \varepsilon, & t \geq t_0 \end{cases}$$

式中： i' 为电流测量值； i 为正常电流值； ε 为漂移故障的漂移量； t_0 为故障发生的初始时刻。

由上述模型可知，电流传感器漂移故障发生

后，其故障电流与正常电流信号存在固定的数值差异，即正常电流信号整体增大或减小一定的漂移量。典型的增益故障模型^[24-25]为

$$i' = \begin{cases} i, & 0 \leq t < t_0 \\ ki, & t \geq t_0 \end{cases}$$

式中： i' 为电流测量值； i 为正常电流值； k 为增益故障的增益系数； t_0 为故障发生的初始时刻。

由上述模型可知，电流传感器增益故障发生后，故障电流信号与正常电流信号的相位频率一样，但其幅值随着增益系数放大或者缩小。

在此基础上，图 6、7 分别给出了 c 相电流传感器漂移故障和增益故障的诊断结果。其中，漂移故

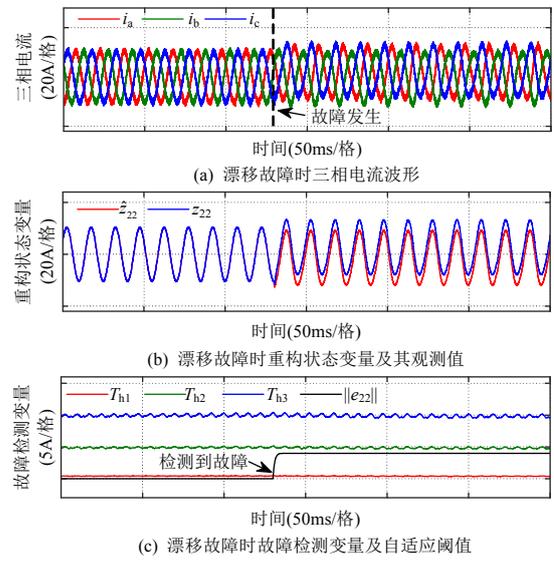


图 6 c 相电流传感器漂移故障诊断结果
Fig. 6 Drift fault diagnosis results of phase-c current sensor

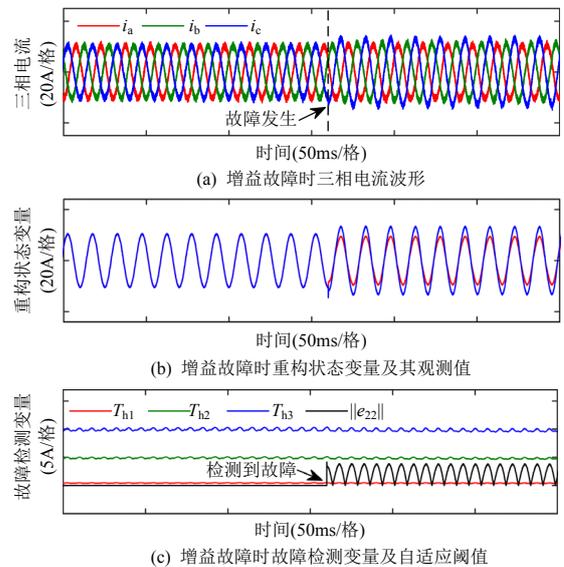


图 7 c 相电流传感器增益故障诊断结果
Fig. 7 Gain fault diagnosis results of phase-c current sensor

障模型中取 $t_0=0.23$, $\varepsilon=4$, 即在 0.23s 给电流传感器注入漂移量为 4A 的漂移故障。由图 6 可知, 当 c 相电流传感器发生漂移故障后, 故障检测变量 $\|e_{22}\|$ 迅速增大并在 0.231s 超过自适应阈值 T_{h1} , 表明检测到 c 相电流传感器故障, 检测时间为 1ms。此外, 增益故障模型中, 取 $t_0=0.26$, $k=1.4$, 即在 0.26s 给电流传感器注入系数为 1.4 的增益故障。由图 7 可知, 当 c 相电流传感器发生增益故障后, 故障检测变量 $\|e_{22}\|$ 在 0.264s 超过自适应阈值 T_{h1} , 即检测到 c 相电流传感器故障, 检测时间为 4ms。实验结果表明该方法能够诊断电流传感器漂移故障和增益故障等显著故障, 且诊断速度较快。

3.3 定子电感参数变化时的鲁棒性验证

为验证本文诊断方法对参数变化的准确性和鲁棒性, 图 8 给出了定子电感参数变化时的 c 相电流传感器微小故障诊断结果。实验中定子电感 L 由 $L=8.5\text{mH}$ 变为 $L=8\text{mH}$, 同时注入的电流传感器微小故障模型为: $i' = i + f_s$, 且 $\dot{f}_s = -1000f_s + \phi$, $\phi = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 0.212 \\ 5000e^{(1.3+2t)^2} + 150\sin(200\pi t), & 0.212 \leq t < 0.383 \\ 11000, & t \geq 0.383 \end{cases}$ 即在 0.212s 注入上述电流传感器微小故障。

从图 8 可以看出, 当 c 相电流传感器在 0.212s 发生微小故障后, 电流的畸变程度、重构状态变量

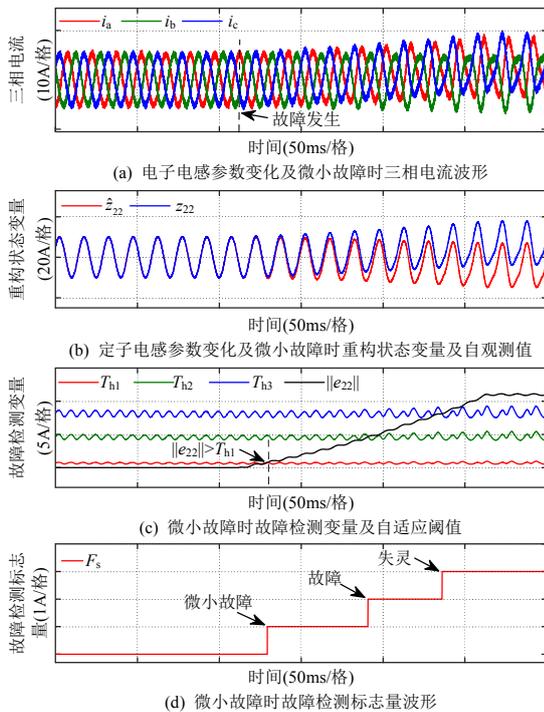


图 8 定子电感变化时 c 相电流传感器微小故障诊断结果
Fig. 8 Minor fault diagnosis results of phase-c current sensor when stator inductance changes

z_{22} 及其观测值 \hat{z}_{22} 随着微小故障幅值变大而增大。与此同时, 故障检测变量 $\|e_{22}\|$ 同样不断变大, 依次在 $t=0.229\text{s}$, 0.292s , 0.336s 超过自适应阈值 T_{h1} 、 T_{h2} 、 T_{h3} , 相应的故障诊断标志量分别由 $F_s=0$ 变为 $F_s=1$, $F_s=2$, $F_s=3$, 表明 c 相电流传感器依次发生微小故障、显著故障以及失灵。实验结果表明, 即使在参数变化情况下本文所提算法仍能检测出传感器微小故障以及微小故障演变为显著故障乃至失灵的整个过程, 从而表明本文诊断方法在参数变化状态下仍具有较强鲁棒性和可靠性。

3.4 负载转矩突变时的鲁棒性验证

为验证本文所提诊断方法的鲁棒性与可靠性, 图 9 给出了当负载转矩突变导致电流变化时 c 相电流传感器发生微小故障的诊断结果。在实验中, 注入了与 3.1 节一致的微小故障。由图 9 可知, 在 0.125s 时电机的负载转矩由 $10\text{N}\cdot\text{m}$ 突变为 $7\text{N}\cdot\text{m}$, 导致电机的转速发生突变, 同时三相电流、重构状态变量 z_{22} 及其观测值 \hat{z}_{22} 随之减小。待系统再次稳定后, 当 c 相电流传感器在 0.185s 发生微小故障时, 随着故障幅值不断变大, 电机转速、三相电流和重

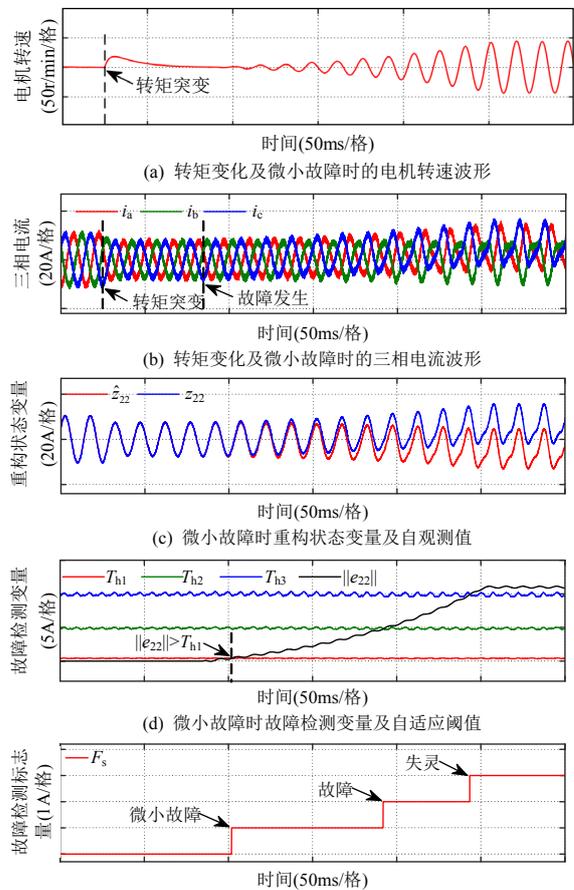


图 9 变负载转矩下 c 相电流传感器微小故障诊断结果
Fig. 9 Minor fault diagnosis result of phase-c current sensor under variable load torque

构状态变量 z_{22} 及其观测值 \hat{z}_{22} 的畸变程度也不断变大。与此同时，故障检测变量 $\|e_{22}\|$ 不断变大，依次超过自适应阈值 T_{h1} , T_{h2} , T_{h3} ，相应的故障诊断标志量 F_s 分别在 $t=0.202s$ 、 $0.292s$ 、 $0.343s$ 时由 $F_s=0$ 变为 $F_s=1$ 、 $F_s=2$ 、 $F_s=3$ ，该诊断结果与无负载转矩突变情况下的诊断结果相同，即负载转矩突变对传感器微小故障诊断结果无影响。此外，根据 PMSM 的工作原理可知负载电流变化与负载转矩变化成正比。因此，上述实验结果表明，本文所提微小故障诊断方法对负载转矩突变和负载电流变化等干扰具有强鲁棒性，诊断稳定性及准确性高。

为了进一步说明 c 相电流传感器发生微小故障时，本文所提微小故障诊断方法不会导致 a 相和 b 相电流传感器误报。图 10 给出了负载转矩突变的情况下，c 相电流传感器发生微小故障时 a 相和 b 相电流残差及阈值波形图。由图 10 可知，在负载转矩突变的情况下，c 相电流传感器发生微小故障时，a 相和 b 相电流残差 (e_a , e_b) 始终小于其自适应阈值 (T_{ha} , T_{hb})，故表明 a 相和 b 相电流传感器无故障，不会导致误报。

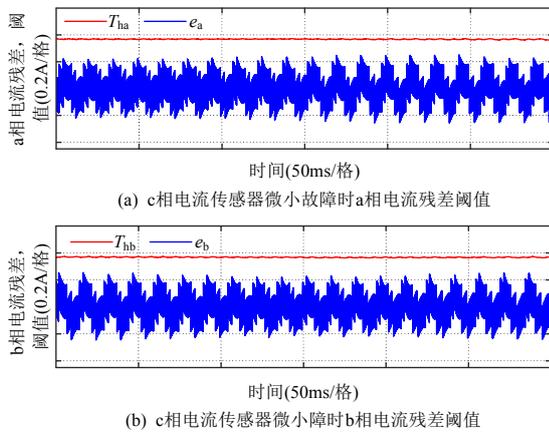


图 10 变负载转矩下 a 相和 b 相电流残差与阈值

Fig. 10 Currents residual and threshold of phase-a and phase-b under variable load torque

3.5 观测器性能对比分析

为了说明本文自适应滑模观测器的效果，本节以式(9)为例，说明基于自适应趋近律式(8)–(10)设计的自适应滑模观测器具有以下优点：

1) 收敛速度快：由式(9)可知，当 z_{21} 远离滑模面，即 $|s_{21}|$ 较大时，使得 $e^{-\alpha|s_{21}|^p}$ 趋近于 0，进而 $\frac{k_{21}}{\lambda + (1-\lambda)e^{-\alpha|s_{21}|^p}}$ 趋近于 $\frac{k_{21}}{\lambda}$ 。由于 $0 < \lambda < 1$ ， $\frac{k_{21}}{\lambda}$ 值增大，表明 s_{21} 到达滑模面的趋近速度增加，观测器的收敛速度快。

2) 显著抑制抖振：当 z_{21} 靠近滑模面时，即 $|s_{21}|$ 较小时，使得 $e^{-\alpha|s_{21}|^p}$ 趋近于 1，进而 $\frac{k_{21}}{\lambda + (1-\lambda)e^{-\alpha|s_{21}|^p}}$ 趋近于 k_{21} ，表明 $k_{21}/[\lambda + (1-\lambda)e^{-\alpha|s_{21}|^p}]$ 在 s_{21} 靠近滑模面时会逐渐减小，观测器抖振能够被显著抑制。

在上述分析的基础上，为了更直观说明本文所提自适应滑模观测器的性能，将本文所提自适应滑模观测器与文献[26]的传统滑模观测器、文献[27]的延迟-抑制滑模观测器和文献[28]的新型滑模观测器进行性能比较，实验结果如图 11 所示。由图 11 可知，本文提出的自适应滑模观测器不仅能够更快的跟踪系统输出电流，收敛速度快，而且可以在稳定时大幅削弱高频抖振。因此，本文设计的自适应滑模观测器具有更好的动态和稳态性能。

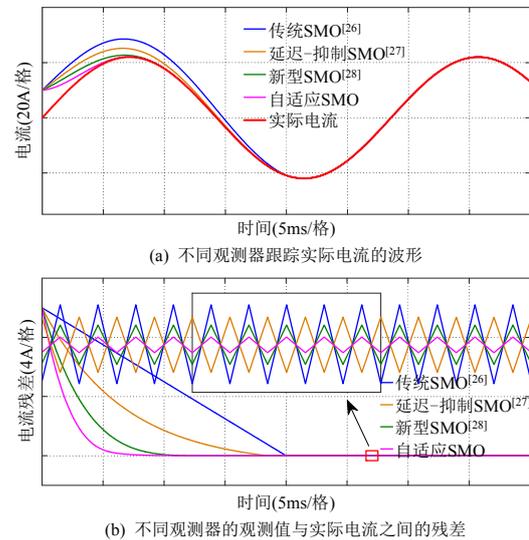


图 11 不同观测器性能比较

Fig. 11 Performance comparison of different observers

4 结论

本文针对新能源汽车 PMSM 驱动系统电流传感器微小故障，提出一种基于自适应滑模观测器的电流传感器微小故障诊断方法。该故障诊断算法有如下优点：

1) 通过设计新型自适应趋近律，构建了收敛速度快且能够抑制高频抖振的自适应滑模观测器，从而使系统重构状态估计更加精确；

2) 利用系统重构状态实际值与观测值残差作为故障检测变量，不仅能诊断微小故障和显著故障，而且可以检测从微小故障演变为故障乃至失灵的整个过程；

3) 针对构建的故障检测变量利用范数的性质设计自适应阈值，使得故障诊断结果准确性更高、

鲁棒性更强。

需要说明的是,本文所提的微小故障诊断方法是为了能够及时准确地检测出电流传感器是否发生故障。而在检测出电流传感器故障后,还需进一步及时采取措施来保障系统的可靠运行,一方面可以通过及时停止系统运行,检修并更换电流传感器,以保证系统的可靠运行;另一方面可以通过设计容错控制算法实现系统的短暂可靠运行。此外,该电流传感器微小故障诊断方法只适用于单相电流传感器故障诊断,尚不适用于驱动系统其他部件和电流传感器同时故障,以及多相电流传感器故障的诊断。如何实现驱动系统其他部件和电流传感器同时故障的诊断,以及多相电流传感器故障的诊断将是我们未来的研究方向。

参考文献

- [1] 魏艺涵, 罗响, 朱莉, 等. 基于比例谐振控制器的高凸极率永磁同步电机电流谐波抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2526-2537.
WEI Yihan, LUO Xiang, ZHU Li, et al. Research on current harmonic suppression strategy of high saliency ratio permanent magnet synchronous motor based on proportional resonance controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2526-2537(in Chinese).
- [2] 杭俊, 胡齐涛, 丁石川, 等. 基于电流残差矢量模平方的永磁同步电机匝间短路故障鲁棒检测与定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 340-350.
HANG Jun, HU Qitao, DING Shichuan, et al. Robust detection and location of inter-turn short circuit fault in permanent magnet synchronous motor based on square of residual current vector modulus[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 340-350(in Chinese).
- [3] 林治臣, 史婷娜, 李新旻, 等. 准 Z 源逆变器-PMSM 控制中多电流传感器比例误差平衡方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2706-2713.
LIN Zhichen, SHI Tingna, LI Xinmin, et al. Scaling errors balance method of multi-current sensors for permanent magnet synchronous motor driven by Quasi-Z-source inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2706-2713(in Chinese).
- [4] WANG Xueqing, WANG Zheng, HE Mingzhi, et al. Fault-tolerant control of dual three-phase PMSM drives with minimized copper loss[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11): 12938-12953.
- [5] 陈超波, 王霞霞, 高嵩, 等. 基于区间滑模观测器的逆变器开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4569-4579.
CHEN Chaobo, WANG Xiaxia, GAO Song, et al. A diagnosis method for open-circuit faults in inverters based on interval sliding mode observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4569-4579(in Chinese).
- [6] 王宇, 张成糕, 郝雯娟. 永磁电机及其驱动系统容错技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 351-371.
WANG Yu, ZHANG Chenggao, HAO Wenjuan. Overview of fault-tolerant technologies of permanent magnet brushless machine and its control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 351-371(in Chinese).
- [7] EL KHIL S K, JLASSI I, CARDOSO A J M, et al. Diagnosis of open-switch and current sensor faults in PMSM drives through stator current analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5925-5937.
- [8] LI Jianhua, DU Bochao, ZHAO Tianxu, et al. Current sensor fault-tolerant control for five-phase PMSM drives based on third-harmonic space[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(10): 9827-9837.
- [9] JLASSI I, CARDOSO A J M. A single method for multiple IGBT, current, and speed sensor faults diagnosis in regenerative PMSM drives[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2583-2599.
- [10] LU Jiadong, HU Yihua, CHEN Guipeng, et al. Mutual calibration of multiple current sensors with accuracy uncertainties in IPMSM drives for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(1): 69-79.
- [11] CHOI K, KIM Y, KIM S K, et al. Current and position sensor fault diagnosis algorithm for PMSM drives based on robust state observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 5227-5236.
- [12] MAO Wentao, CHEN Jiaxian, LIANG Xihui, et al. A new online detection approach for rolling bearing incipient fault via self-adaptive deep feature matching[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(2): 443-456.
- [13] Mao Zehui, XIA Mingyuan, JIANG Bin, et al. Incipient fault diagnosis for high-speed train traction systems via stacked generalization[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 52(8): 7624-7633.
- [14] GAO Tianyu, YANG Jingli, JIANG Shouda. A novel incipient fault diagnosis method for analog circuits based on GMKL-SVM and wavelet fusion features[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 3502315.
- [15] CHEN Hongtian, JIANG Bin, LU Ningyun. A newly robust fault detection and diagnosis method for high-speed trains[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(6): 2198-2208.

- [16] WU Yunkai, JIANG Bin, LU Ningyun. A descriptor system approach for estimation of incipient faults with application to high-speed railway traction devices [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(10): 2108-2118.
- [17] GAUTAM S, TAMBOLI P K, PATANKAR V H, et al. Sensors incipient fault detection and isolation using Kalman filter and Kullback-Leibler divergence[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(5): 782-794.
- [18] ZHANG Kangkang, JIANG Bin, YAN Xinggang, et al. Interval sliding mode observer based incipient sensor fault detection with application to a traction device in China railway high-speed[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2585-2597.
- [19] WU Yunkai, JIANG Bin, LU Ningyun, et al. Multiple incipient sensor faults diagnosis with application to high-speed railway traction devices[J]. ISA Transactions, 2017(67): 183-192.
- [20] GAUTAM S, TAMBOLI P K, ROY K, et al. Sensors incipient fault detection and isolation of nuclear power plant using extended Kalman filter and Kullback-Leibler divergence[J]. ISA Transactions, 2019(92): 180-190.
- [21] ZHOU Xinxiu, SUN Jun, CUI Peiling, et al. A fast and robust open-switch fault diagnosis method for variable-speed PMSM system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 2598-2610.
- [22] ZHANG Kangkang, JIANG Bin, YAN Xinggang, et al. Incipient voltage sensor fault isolation for rectifier in railway electrical traction systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6763-6774.
- [23] 文传博, 邓露, 吴兰. 基于滑模观测器和广义观测器的故障估计方法[J]. 自动化学报, 2018, 44(9): 1698-1705.
WEN Chuanbo, DENG Lu, WU Lan. Fault estimation approaches with sliding mode observer and descriptor observer[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(9): 1698-1705(in Chinese).
- [24] GOU Bin, XU Yan, XIA Yang, et al. An intelligent time-adaptive data-driven method for sensor fault diagnosis in induction motor drive system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12): 9817-9827.
- [25] WANG Wei, TIAN Weijie, WANG Zheng, et al. A fault diagnosis method for current sensors of primary permanent-magnet linear motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 2334-2345.
- [26] KALSI K, LIAN Jianming, HUI S, et al. Sliding-mode observers for systems with unknown inputs: A high-gain approach[J]. Automatica, 2010, 46(2): 347-353.
- [27] GONG Chao, HU Yihua, GAO Jinqiu, et al. An improved delay-suppressed sliding-mode observer for sensorless vector-controlled PMSM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5913-5923.
- [28] ZHANG Yajing, WANG Jing, LI Hong, et al. Dynamic performance improving sliding-mode control-based feedback linearization for PV system under LVRT condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11745-11757.



许水清

在线出版日期: 2022-10-13。

收稿日期: 2022-05-11。

作者简介:

许水清(1991), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断, xsqanhui91@gmail.com;

刘锋(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备的故障诊断与应用, 2020110458@mail.hfut.edu.cn;

何怡刚(1966), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为功率变换器故障诊断, yghe1221@whu.edu.cn;

*通信作者: 胡友强(1977), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源驱动系统及其故障诊断, yqhu@cqu.edu.cn;

柴毅(1962), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能系统故障诊断与应用等, chaiyi@cqu.edu.cn。

(编辑 李婧妍, 李新洁)