

# 基于自适应滑模观测器的高铁牵引系统 单相三电平整流器开路故障诊断

许水清<sup>1</sup>, 王 健<sup>1</sup>, 胡友强<sup>2†</sup>, 张 可<sup>2</sup>, 江 萍<sup>1</sup>, 柴 毅<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

**摘要:** 为了提升高速列车牵引系统的稳定性和可靠性, 本文针对其单相三电平整流器, 提出了一种基于自适应滑模观测器的开关管开路故障诊断方法. 本文首先建立了单相三电平整流器开路故障下的状态空间模型, 然后设计了收敛速度快且显著抑制高频抖振的自适应滑模观测器准确估计网侧电流, 其次利用整流器网侧电流与观测器输出电流提出了基于电流绝对值均方根的开关管开路故障检测方法, 在此基础上采用电流残差构造初次故障定位量进行开关管初步定位, 最后利用开路故障开关函数建立故障状态下的自适应滑模观测器实现故障开关管精确定位. 本文提出的方法能够实现单相三电平整流器所有开关管故障检测与定位, 诊断速度快, 鲁棒性强, 且不需要额外注入脉冲控制信号. 实验结果验证了本文所提诊断方法的准确性和鲁棒性.

**关键词:** 单相三电平整流器; 高速列车牵引系统; 开路故障; 滑模观测器; 自适应阈值

**引用格式:** 许水清, 王健, 胡友强, 等. 基于自适应滑模观测器的高铁牵引系统单相三电平整流器开路故障诊断. 控制理论与应用, 2023, 40(11): 1920 – 1930

DOI: 10.7641/CTA.2022.20367

## Open-circuit fault diagnosis of single-phase three-level rectifier in high-speed train traction system based on adaptive sliding mode observer

XU Shui-qing<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, HU You-qiang<sup>2†</sup>, ZHANG Ke<sup>2</sup>, JIANG Ping<sup>1</sup>, CHAI Yi<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China;

2. School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to improve the stability and reliability of high-speed train traction system, an open-circuit fault diagnosis method for single-phase three-level rectifier based on the adaptive sliding mode observer is proposed in this paper. Firstly, the state space model of single-phase three-level rectifier under open-circuit fault condition is established, then an adaptive sliding mode observer with fast convergence speed and significant suppression of high-frequency chattering is designed to accurately estimate the grid-side current. Subsequently based on the grid-side current of the rectifier and the output current of the observer, an open-circuit fault detection method based on the root mean square of the absolute value of the current is proposed. On this basis, the current residual is used to construct the initial fault location to locate the power switches. Finally, an adaptive sliding mode observer based on the open-circuit fault switching function is used to locate the fault switch accurately. The method proposed in this paper can realize the fault detection and location of all power switches of single-phase three-level rectifier, with fast diagnosis speed, strong robustness and no additional hardware circuit. The accuracy and robustness of the proposed diagnosis method are verified by experiments.

**Key words:** single-phase three-level rectifier; high-speed train traction system; open-circuit fault; sliding mode observer; adaptive threshold

**Citation:** XU Shuiqing, WANG Jian, HU Youqiang, et al. Open-circuit fault diagnosis of single-phase three-level rectifier in high-speed train traction system based on adaptive sliding mode observer. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(11): 1920 – 1930

收稿日期: 2022-05-08; 录用日期: 2022-11-10.

†通信作者. E-mail: yqhu@cqu.edu.cn; Tel.: +86 13808380068.

本文责任编辑: 李世华.

国家自然科学基金项目(62273128), 国家自然科学基金项目(61803140), 国家自然科学基金重点项目(U2034209)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62273128), the National Natural Science Foundation of China (61803140) and the National Key Natural Science Foundation of China (U2034209).

## 1 引言

随着高速铁路的迅速发展,我国已经建成了世界上规模最大的高速铁路干线网.其中CRH2(China railways high-speed)型高速列车在我国高速铁路干线中广泛应用,单相三电平整流器作为CRH2型高速列车牵引系统的重要组成部分,其作用是将高速列车牵引变压器二次绕组输出的1500 V/50 Hz单相交流电通过功率器件转变为2600~3000 V的直流电,并经中间直流回路将直流电输送给牵引逆变器<sup>[1-2]</sup>.然而由于长时间运行及复杂多变的工作环境,使得单相三电平整流器极易产生故障.统计数据表明,单相三电平整流器故障是高速列车牵引系统的高发故障,其主要故障是开关管开路故障<sup>[3]</sup>.因而,对开关管进行开路故障诊断是实现单相三电平整流器系统可靠运行的前提,对高速列车安全运行具有重要意义.

目前,开关管开路故障诊断方法从技术上主要分为基于数据驱动的方法和基于解析模型的方法.其中,基于数据驱动的诊断方法是通过对历史和当前监测数据进行分析与处理,发掘出监测数据中隐含的有用信息,从而实现开路故障诊断<sup>[4-5]</sup>.如文献[6]首先获取故障相电流波形畸变特征,然后利用深度前馈网络分类器进行故障分类从而实现三相PWM(pulse width modulation)整流器开路故障诊断,文献[7]利用理想极电压与实际极电压偏差构造故障特征变量,并通过设计自适应检测阈值来实现三相三电平整流器开路故障诊断.文献[8]则采用加权滑动Hilbert变换估计的相电流瞬时幅值作为诊断变量,提出了基于相电流瞬时幅值的风力发电系统变流器开路故障诊断方法.但是数据驱动法过度依赖所获得数据的数量和质量,易受系统噪声和负载扰动等未知因素的影响,导致产生漏报和误报,且算法复杂度较高,诊断快速性较低.

基于解析模型的故障诊断方法主要通过建立与实际系统相对应的参考模型,分析实际系统输出量与参考模型输出量的残差,然后根据残差信号及设计的阈值来进行故障诊断<sup>[9-10]</sup>.如文献[11]通过建立电压源逆变器的状态观测器估计相电流,利用估计相电流与实际相电流的电流残差向量作为诊断变量实现开路故障诊断.文献[12]构造了单相级联H桥整流器的状态估计器,根据直流侧电压估计值与实际电压值的残差设计诊断变量,实现了开路故障诊断.文献[13]建立了三相电压源逆变器的微分电流观测器,利用归一化处理的电流观测值与实际值残差作为诊断变量来实现开路故障诊断.此外,滑模观测器(sliding mode observer, SMO)由于其对系统参数变化不敏感,鲁棒性强而被广泛应用于故障诊断领域<sup>[14-15]</sup>.如文献[16]采用饱和函数替换不连续开关项构造了鲁棒滑模观测器,实现对多电机系统的故障诊断.文献[17]通过

建立滑模观测器降低DC-DC转换电路中参数不确定性和扰动影响,提升了开关管开路故障诊断的准确性.文献[18]引入指数函数设计变增益的自适应滑模观测器,实现了感应电机驱动器的故障诊断.虽然,滑模观测器鲁棒性较强,但由于其存在固有的高频抖振,会引入大量高频信号.因此,如何降低高频抖振是滑模观测器法实现快速精确故障诊断的核心与关键.

尽管开关管开路故障诊断已经受到了广泛的关注和研究,但是针对高速列车牵引系统单相三电平整流器开路故障诊断的研究仍处于探索阶段.如文献[19]通过分析开路故障产生的相电流失真及直流侧电压纹波特性,利用电压纹波及电网电压相位角构造故障诊断变量来实现三相三电平整流器开路故障诊断,但该方法未考虑外部扰动和电网电压波动时的影响,鲁棒性较差.文献[20]首先利用单相三电平整流器的混合逻辑动态模型估计网侧电流,然后基于网侧电流的残差变化率构造诊断变量进行故障检测,最后通过注入特定的开关信号实现开关管开路故障定位.然而该方法没有考虑外部扰动的影响,模型估计精度较低,且定位时注入开关信号可能会危及系统安全.

针对上述问题,本文提出了一种基于自适应滑模观测器的高铁牵引系统单相三电平整流器开路故障诊断方法.该方法首先根据单相三电平整流器状态空间模型设计了收敛速度快且可抑制高频抖振的自适应滑模观测器,其次提出了基于网侧电流与估计电流绝对值均方根的故障检测方法,然后利用电流残差设计故障初次定位特征量进行开关管初步定位,最后通过建立故障状态下自适应滑模观测器来实现精确故障定位.本文所提出的故障诊断算法有如下优点:

1) 建立了新型的自适应滑模观测器:通过设计新型自适应趋近律,使所建立的自适应滑模观测器不仅可以自适应趋近律中的变滑模增益加快观测器的趋近速率,同时可以有效地降低高频抖振,从而能够精确估计网侧电流,保障了诊断算法的准确性.

2) 提出了新的故障检测方法:基于电流绝对值均方根设计故障检测变量,并结合估计电流的绝对值均方根设计自适应诊断阈值,有效地降低了尖峰电流与电流谐波的干扰,诊断速度快、准确性高.

3) 提出了新的故障定位方法:在完成故障检测后,重构自适应滑模观测器的开关函数,将正常状态下开关函数替换为特定开关管故障时的开关函数,实现了单相三电平整流器开关管的精确定位,且避免了额外开关信号的注入.

## 2 单相三电平整流器建模

### 2.1 单相三电平整流器建模

CRH2型高速列车牵引系统的单相三电平整流器拓扑结构如图1所示.图中整流器主要由a相桥臂和b

相桥臂组成,每相桥臂由4个开关管 $S_{kj}$ ( $k = a, b$ ;  $j = 1, 2, 3, 4$ ),4个续流二极管 $T_{kj}$ 和2个钳位二极管 $D_{kl}$ ( $l = 1, 2$ )组成, $U_s$ 和 $i_s$ 分别为网侧电压和网侧电流, $R$ 和 $L$ 分别为等效电阻和滤波电感, $O$ 为直流侧中性点, $i_p$ 和 $i_q$ 分别为直流侧上端和下端电流, $u_{c1}$ 和 $u_{c2}$ 分别是电容 $C_1$ 和 $C_2$ 的直流侧的电压。

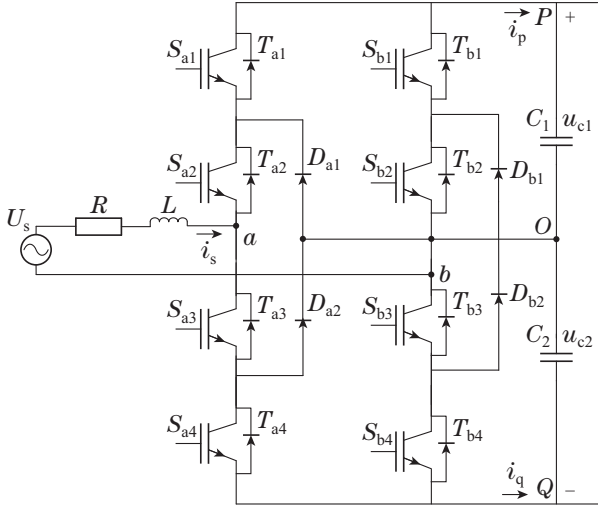


图1 单相三电平整流器示意图

Fig. 1 Diagram of single-phase three-level rectifier

考虑整流器系统实际运行中存在的未知扰动信号,建立如下所示的正常状态下单相三电平整流器状态空间模型<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu + F\eta(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中: } A = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{V_1}{L} & \frac{V_2}{L} \\ \frac{V_1}{C_1} & 0 & 0 \\ -\frac{V_2}{C_2} & 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \text{dig}\left\{\frac{1}{L}, -\frac{1}{C_1}, -\frac{1}{C_2}\right\}, C = \text{dig}\{1, 1, 1\}, F = \text{dig}\{1, 1, 1\}, u(t) = \text{col}(u_s, i_1, i_1), x(t) = \text{col}(i_s, u_{c1}, u_{c2}), \eta(t) = \text{col}(\eta_i(t), \eta_{u1}(t), \eta_{u2}(t)), i_1 \text{ 为直流侧负载电流, } \eta(t) \text{ 为未知扰动信号, 其幅值有界且满足 } \|\eta_i(t)\| \leq \chi, \|\eta_{u1}(t)\| \leq \chi_1, \|\eta_{u2}(t)\| \leq \chi_2, \chi > 0, \chi_1 > 0, \chi_2 > 0, V_1 \text{ 与 } V_2 \text{ 为开关函数中间量, 具体地}$$

$$V_1 = \frac{\delta_a(\delta_a + 1) - \delta_b(\delta_b + 1)}{2}, \quad (2)$$

$$V_2 = \frac{\delta_a(\delta_a - 1) - \delta_b(\delta_b - 1)}{2}, \quad (3)$$

式中 $\delta_a$ 与 $\delta_b$ 分别为 $a$ 相与 $b$ 相的开关函数。同时,正常工作状态下 $a$ 相与 $b$ 相开关函数 $\delta_a, \delta_b$ 分别为

$$\delta_a = s_{a1}s_{a2}\bar{s}_{a3}\bar{s}_{a4} - \bar{s}_{a1}\bar{s}_{a2}s_{a3}s_{a4}, \quad (4)$$

$$\delta_b = s_{b1}s_{b2}\bar{s}_{b3}\bar{s}_{b4} - \bar{s}_{b1}\bar{s}_{b2}s_{b3}s_{b4}, \quad (5)$$

式中 $s_{kj}$ ( $k = a, b; j = 1, 2, 3, 4$ )为开关管脉冲控制信号。

## 2.2 整流器开路故障分析

由单相三电平整流器工作原理可知每相桥臂有3种工作状态,即( $S_{k1}$ 和 $S_{k2}$ 导通)或( $T_{k1}$ 和 $T_{k2}$ 导通),( $D_{k1}$ 和 $S_{k2}$ 导通)或( $D_{k2}$ 和 $S_{k3}$ 导通),( $S_{k3}$ 和 $S_{k4}$ 导通)或( $T_{k3}$ 和 $T_{k4}$ 导通),分别用数字(1, 0, -1)定义这3种工作状态,并保证每一个工作状态与每相桥臂开关函数取值是一一对应的,即

$$\delta_k = \begin{cases} 1, & (S_{k1} \text{ 和 } S_{k2} \text{ 导通}) \text{ 或 } (T_{k1} \text{ 和 } T_{k2} \text{ 导通}), \\ 0, & (D_{k1} \text{ 和 } S_{k2} \text{ 导通}) \text{ 或 } (D_{k2} \text{ 和 } S_{k3} \text{ 导通}), \\ -1, & (S_{k3} \text{ 和 } S_{k4} \text{ 导通}) \text{ 或 } (T_{k3} \text{ 和 } T_{k4} \text{ 导通}). \end{cases} \quad (6)$$

另外,为了便于后续分析将(1, 0, -1)3种工作状态用( $P, O, N$ )表示。

根据单相三电平整流器的拓扑结构,可将开关管开路故障分为两类:内部开关管( $S_{k2}, S_{k3}$ )开路故障与外部开关管( $S_{k1}, S_{k4}$ )开路故障。下面以 $a$ 相为例,选取 $\lambda_i$ 为网侧电流的标志位,当 $i_s > 0$ 时, $\lambda_i = 1$ ,当 $i_s \leq 0$ 时, $\lambda_i = 0$ 。分别对内部和外部开关管开路故障进行分析。

1)  $S_{a1}$ 发生开关管故障:由图2(a)–(c)可知,当 $\lambda_i = 1$ 时,由于 $P, O, N$ 3种状态下电流均不流经 $S_{a1}$ ,此时 $S_{a1}$ 开路故障对系统无影响。由图3(a)–(c)可知,当 $\lambda_i = 0$ 时,若发生 $S_{a1}$ 开路故障, $O$ 和 $N$ 状态下电流不经过 $S_{a1}$ ,电流路径不发生改变。而在 $P$ 状态下,电流无法流经 $S_{a1}$ ,转而流经 $D_{a1}$ 和 $S_{a2}$ ,造成网侧电流负半周发生轻微畸变。

2)  $S_{a2}$ 发生开关管故障:由图2(a)–(c)可知,当 $\lambda_i = 1$ 时,由于 $P, O, N$ 3种状态下电流均不流经 $S_{a2}$ ,此时 $S_{a2}$ 开路故障对系统无影响;由图4(a)–(c)可知,当 $\lambda_i = 0$ 时, $N$ 状态下电流路径与正常状态下相同,而 $P$ 和 $O$ 状态下电流无法流经 $S_{a2}$ ,转而流经 $T_{a4}$ 和 $T_{a3}$ ,造成网侧电流负半周发生严重畸变。

根据以上分析,可以得出 $a$ 相开关管 $S_{a1}$ 开路故障时的开关函数与开关状态关系如表1所示。

表1  $S_{a1}$ 故障时 $a$ 相开关函数与开关状态的关系

Table 1 The relationship between the switch state and the switch function of phase- $a$  in  $S_{a1}$  open-circuit fault

开关状态	$s_{a1}$	$s_{a2}$	$s_{a3}$	$s_{a4}$	$\delta_a(\lambda_i = 1)$	$\delta_a(\lambda_i = 0)$
$P$	1	1	0	0	1	0
$O$	0	1	1	0	0	0
$N$	0	0	1	1	-1	-1

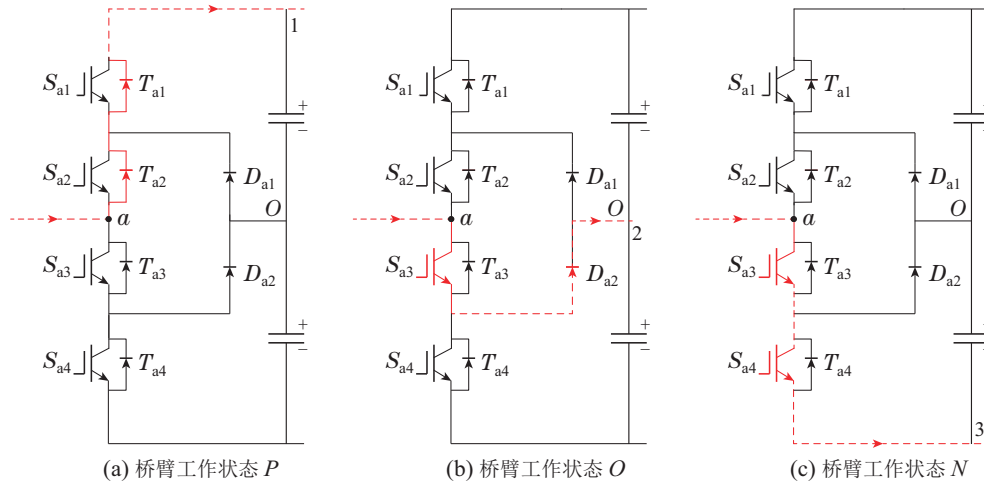


图 2 正常状态下a相电流路径

Fig. 2 Current path of phase-a under normal working condition

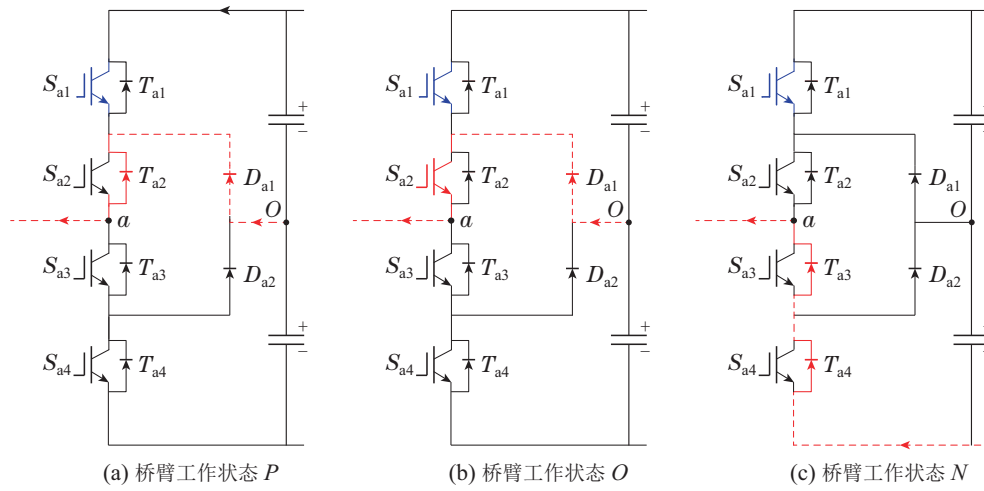


图 3 S<sub>a1</sub>开路故障下a相电流路径

Fig. 3 Current path of phase-a under S<sub>a1</sub> open-circuit fault condition

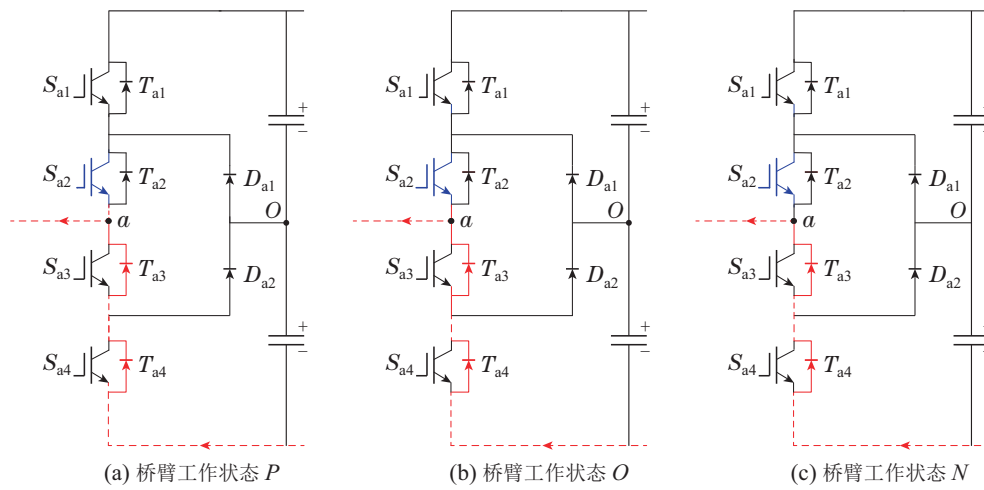


图 4 S<sub>a2</sub>开路故障下a相电流路径

Fig. 4 Current path of phase-a under S<sub>a2</sub> open-circuit fault condition

可对表1进行逻辑运算,可以得到 $S_{a1}$ 开路故障状态下 $a$ 相的开关函数 $\delta_{a1}^*$ 为

$$\delta_{a1}^* = \lambda_i s_{a1} s_{a2} \bar{s}_{a3} \bar{s}_{a4} - \bar{s}_{a1} \bar{s}_{a2} s_{a3} s_{a4}. \quad (7)$$

类似地,可以分别推导出 $S_{a2}$ ,  $S_{a3}$ ,  $S_{a4}$ 开路故障状态下 $a$ 相的开关函数 $\delta_{a2}^*$ ,  $\delta_{a3}^*$ ,  $\delta_{a4}^*$ 为

$$\delta_{a2}^* = \lambda_i (s_{a1} s_{a2} \bar{s}_{a3} \bar{s}_{a4} - \bar{s}_{a1} \bar{s}_{a2} s_{a3} s_{a4}) - \bar{\lambda}_i, \quad (8)$$

$$\delta_{a3}^* = \bar{\lambda}_i (s_{a1} s_{a2} - s_{a3} s_{a4}) + \lambda_i, \quad (9)$$

$$\delta_{a4}^* = \bar{\lambda}_i (s_{a1} s_{a2} - s_{a3} s_{a4}) + \lambda_i. \quad (10)$$

最后,根据式(1)所建立的状态空间模型可知,网侧电流 $i_s$ 取决于开关函数 $\delta_k$ .若将正常状态下的开关函数 $\delta_k$ 替换为开路故障状态下的开关函数 $\delta_k^*$ ,即可得故障状态下的单相三电平整流器状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{x}^*(t) = A^* x^*(t) + Bu(t) + F\eta(t), \\ y^* = Cx^*(t), \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{式中: } x^*(t) = \begin{pmatrix} i_s^* \\ u_{c1}^* \\ u_{c2}^* \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{V_1^*}{L} & \frac{V_2^*}{L} \\ \frac{V_1^*}{C_1} & 0 & 0 \\ -\frac{V_2^*}{C_2} & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

### 3 单相三电平整流器开路故障诊断策略

根据上述单相三电平整流器开路故障分析可知,在正常状态下,单相三电平整流器网侧电流等于观测器输出电流.但当开关管发生开路故障后,网侧电流发生畸变,不再等于观测器输出电流.基于上述性质,本文提出了一种基于新型自适应滑模观测器的高速列车牵引系统单相三电平整流器开路故障诊断方法.该方法的诊断原理如图5所示,主要包括自适应滑模观测器设计,故障检测和故障定位3个部分.

#### 3.1 自适应滑模观测器设计

针对式(1)所建立的单相三电平整流器状态空间模型,设计如下所示的自适应滑模观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(C\hat{x}(t) - y) + Df(s), \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \end{cases} \quad (12)$$

其中: $\hat{x}(t)$ 为 $x(t)$ 的观测值, $\hat{y}(t)$ 为网侧电流观测值, $L$ 为滑模观测器的增益矩阵, $D = \text{col}(1, 0, 0)$ , $s = C\hat{x}(t) - y(t)$ 为滑模面, $f(s)$ 为设计的非线性自适应滑模趋近律且表示为

$$f(s) = -k \tanh(\tau s) \psi(s), \quad (13)$$

式中 $k$ 为观测器增益,且 $k \geq \|F\| \chi + \omega$ , $\chi$ 为扰动幅值上界, $\omega$ 是正常数, $\tanh(\tau s) = \frac{e^{\tau s} - e^{-\tau s}}{e^{\tau s} + e^{-\tau s}}$ 为双曲正

切函数, $\psi(s)$ 为设计的自适应项,且表示为

$$\psi(s) = (|s|^\mu - \varepsilon)Q(s) + \varepsilon, \quad (14)$$

式中: $Q(s) = \left| \frac{\sin s}{s} \right|$ ,  $0 < \mu < 1$ ,  $\varepsilon > 1$ ,  $\tau > 1$ .

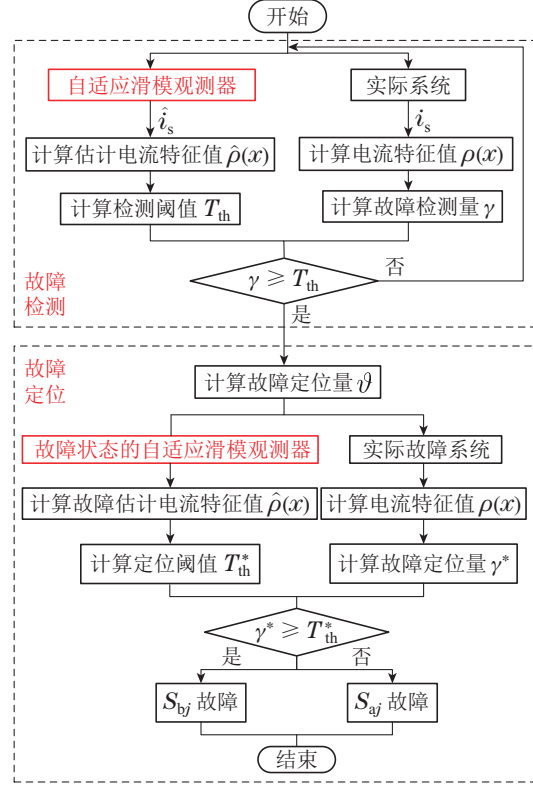


图5 故障诊断原理图

Fig. 5 The block diagram scheme of the proposed fault diagnosis method

**定理 1** 假设存在正定对称阵 $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和矩阵 $Y$ ,使得 $A^T P + PA - C^T Y^T - YC < 0$ ,则误差系统

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) + F\eta(t) - f(s) \quad (15)$$

是渐进稳定的,式中 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ ,且 $L = P^{-1}Y$ .

**证** 选取如下所示的李雅普诺夫函数:

$$V = e^T(t)Pe(t), \quad (16)$$

对式(16)进行求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \dot{e}^T(t)Pe(t) + e^T(t)P\dot{e}(t) = \\ & [e^T(t)(A - LC)^T + \eta^T F^T - f(s)^T]Pe(t) + \\ & e^T(t)P[(A - LC)e(t) + F\eta - f(s)] = \\ & e^T(t)[(A - LC)^T P + P(A - LC)]e(t) + \\ & 2\eta^T F^T Pe(t) - 2f(s)^T Pe(t) \leq \\ & e^T(t)[(A - LC)^T P + P(A - LC)]e(t) + \\ & 2\|Pe(t)\|(\|F\|\chi - k) \leq \\ & e^T(t)[(A - LC)^T P + P(A - LC)]e(t) - 2\omega\|Pe(t)\| \leq \\ & e^T(t)[(A - LC)^T P + P(A - LC)]e(t) \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& e^T(t)[A^T P - C^T L^T P + PA - PLC]e(t) \leq \\
& e^T(t)[A^T P - C^T (P^{-1})^T P + PA - \\
& PP^{-1}YC]e(t) \leq \\
& e^T(t)[A^T P + PA - C^T Y^T - YC]e(t). \quad (17)
\end{aligned}$$

综上可知,若 $A^T P + PA - C^T Y^T - YC < 0$ 成立,则 $\dot{V}(t) < 0$ ,即式(15)中所示的观测器误差系统是渐近稳定的。

其中,定理1中假设存在的正定对称阵 $P$ ,矩阵 $Y$ 及观测器误差系统稳定条件 $A^T P + PA - C^T Y^T - YC < 0$ 是通过MATLAB中的LMI(linear matrix inequality)工具包进行计算求解,从而来判断定理1中假设条件的成立性。

基于式(13)–(14)设计自适应趋近律,本文所设计自适应滑模观测器的优点体现在以下两个方面:

1) 收敛速度快:由式(14)知,当网侧电流远离滑模面,即 $|s|$ 较大时, $Q(s)$ 趋近于0,趋近律自适应项 $\psi(s)$ 趋近于 $\varepsilon$ ,此时趋近律可表示为

$$f_1(s) = -k \tanh(\tau s)\varepsilon, \quad (18)$$

由于 $\varepsilon > 1$ ,则 $k\psi(s) > k$ .这表明到达滑模面的速度增加,观测器收敛速度快。

2) 降低高频抖振:当网侧电流接近滑模面,即 $|s|$ 趋近于0时, $Q(s)$ 趋近于1.趋近律自适应项 $\psi(s) = |s|^\mu$ ,此时趋近律可表示为

$$f_2(s) = -k \tanh(\tau s)|s|^\mu, \quad (19)$$

由于 $\psi(s)$ 递减,使得 $k\psi(s)$ 在接近滑模面时会逐渐减小,因而能够有效降低观测器的高频抖振。

### 3.2 开路故障检测

在建立高速列车牵引系统单相三电平整流器自适应滑模观测器的基础上,本节利用整流器实际网侧电流与观测器估计电流,构造基于电流绝对值均方根的故障检测变量和自适应阈值,实现单相三电平整流器开路故障的高准确性和强鲁棒性检测。

首先,由单相三电平整流器的开关管开路故障分析可知,当开关管发生开路故障时,整流器实际网侧电流将会产生畸变.因此,本文利用整流器实际网侧电流的畸变特性,构造基于网侧电流绝对值均方根的单相三电平整流器故障检测变量 $\gamma$ ,其式为

$$\gamma = \frac{\log_n(1 + \rho(x))}{\rho(x)/\ln n}, \quad (20)$$

式中: $n > 1$ , $\rho(x) = |i_s|_{\text{RMS}}$ 为设计的电流形态量,RMS(root mean square)为均方根.此处引入RMS是为了降低尖峰电流和电流谐波的影响,其中RMS计算长度为1/2网侧电流基波周期,引入对数函数 $\log_n(1 + \rho(x))$ 与 $\rho(x)/\ln n$ 设计故障检测变量 $\gamma$ 是为了便于设计自适应阈值。

在此基础上,利用自适应滑模观测器的估计电流 $\hat{i}_s$ 与实际网侧电流 $i_s$ ,设计开路故障检测量的自适应阈值为

$$T_{\text{th}} = \frac{\log_n(1 + |\hat{\rho}(x) - \rho(x)|)}{|\hat{\rho}(x) - \rho(x)|/\ln n}, \quad (21)$$

式中 $\hat{\rho}(x) = |\hat{i}_s|_{\text{RMS}}$ .由式(20)–(21)可知,若单相三电平整流器未发生开路故障, $\rho(x) > 0$ , $\gamma < 1$ 且 $|\hat{\rho}(x) - \rho(x)| = 0$ , $T_{\text{th}}$ 趋近于1.但是,当单相三电平整流器发生开路故障后,网侧电流产生一定程度的畸变,使得 $\rho(x)$ 减小,从而导致 $|\hat{\rho}(x) - \rho(x)|$ 增大和 $T_{\text{th}}$ 减小,造成故障检测量 $\gamma$ 迅速增大超过自适应阈值 $T_{\text{th}}$ ,从而完成单相三电平整流器开路故障检测。

### 3.3 开路故障定位

在实现单相三电平整流器开关管开路故障检测的基础上,本节通过分析网侧电流波形畸变特征,并利用故障状态下观测器电流估计值与正常网侧电流值的残差,设计两个基于电流残差的故障定位量,实现单相三电平整流器的关管开路故障定位。

首先,根据第1.2节中的单相三电平整流器的内部和外部开关管开路故障分析可知,当外部开关管发生开路故障时,网侧电流发生轻微畸变,其畸变程度一般低于正常状态下网侧电流基波幅值的10%,使得观测器估计电流与实际网侧电流的残差较小.而当内部开关管发生开路故障时,网侧电流发生严重畸变,其畸变程度远高于正常状态下网侧电流基波幅值的10%,造成观测器输出的估计电流与实际网侧电流的残差较大.其次,由单相三电平整流器拓扑结构可知,当整流器 $a$ 相上桥臂或 $b$ 相下桥臂发生开路故障时,实际网侧电流负半周波形衰减,使得观测器估计电流与实际网侧电流的残差为正.当整流器 $a$ 相下桥臂和 $b$ 相上桥臂发生开路故障时,实际网侧电流正半周波形出现衰减,使得观测器估计电流与实际网侧电流的残差为负。

基于上述分析,本文利用内外开关管及上下桥臂开关管开路故障时的不同电流畸变特性,构造基于电流残差的初次定位量,其式为

$$\vartheta = \frac{\text{sgn}(|e(t)|_{\text{avg}} - \sigma) + 3}{4} - \text{sgn} e(t), \quad (22)$$

其中: $|e(t)|_{\text{avg}}$ 为电流残差绝对值均值, $\sigma$ 为对比阈值.考虑到测量噪声及未知扰动的影响, $\sigma$ 取正常状态下网侧电流基波幅值的10%。

由式(22)可知,当 $S_{a1}$ 或 $S_{a4}$ 发生开路故障时,可得 $|e(t)|_{\text{avg}} - \sigma < 0$ 且 $e(t) < 0$ , $\vartheta = -1/2$ .当 $S_{a2}$ 或 $S_{b3}$ 发生开路故障时, $|e(t)|_{\text{avg}}$ 迅速增大后超过 $\sigma$ ,使得 $|e(t)|_{\text{avg}} - \sigma > 0$ 且 $e(t) < 0$ , $\vartheta$ 短暂等于 $-1/2$ 后迅速变为0.同理可知,当 $S_{a3}$ 或 $S_{b2}$ 发生开路故障时, $\vartheta$ 短暂等于 $3/2$ 后迅速变为2;当 $S_{a4}$ 或 $S_{b1}$ 发生开路故障时,

$\vartheta = 3/2$ .

为进一步定位具体的故障开关管,在保证故障检测不发生误报的前提下,在完成开关管初步定位后的1/2基波周期时刻,利用第1.2节中推导出的a相开关管 $S_{aj}$ 开路故障状态下的开关函数 $\delta_{aj}^*$ 替换正常状态下的开关函数 $\delta_a$ 来设计故障状态下的自适应滑模观测器,获得 $S_{aj}$ 故障状态下自适应滑模观测器的估计电流 $i_s^*$ ,然后根据故障估计电流 $i_s^*$ 并基于式(20)–(21)设计故障定位变量 $\gamma^*$ 与定位阈值 $T_{th}^*$ .在此基础上,通过对比 $\gamma^*$ 与 $T_{th}^*$ 进行故障相定位,即

$$S_{kj} = \begin{cases} S_{aj}, & \gamma^* < T_{th}^*, \\ S_{bj}, & \gamma^* \geq T_{th}^*. \end{cases} \quad (23)$$

结合式(22)–(23),本文提出的高速列车牵引系统单相三电平整流器故障诊断策略可用下式表示:

$$S_{aj} = \begin{cases} S_{a1}, & \vartheta = -\frac{1}{2} \& \gamma^* < T_{th}^*, \\ S_{a2}, & \vartheta = -\frac{1}{2} \rightarrow 0 \& \gamma^* < T_{th}^*, \\ S_{a3}, & \vartheta = \frac{3}{2} \rightarrow 2 \& \gamma^* < T_{th}^*, \\ S_{a4}, & \vartheta = \frac{3}{2} \& \gamma^* < T_{th}^*. \end{cases} \quad (24)$$

$$S_{bj} = \begin{cases} S_{b1}, & \vartheta = \frac{3}{2} \& \gamma^* \geq T_{th}^*, \\ S_{b2}, & \vartheta = \frac{3}{2} \rightarrow 2 \& \gamma^* \geq T_{th}^*, \\ S_{b3}, & \vartheta = -\frac{1}{2} \rightarrow 0 \& \gamma^* \geq T_{th}^*, \\ S_{b4}, & \vartheta = -\frac{1}{2} \& \gamma^* \geq T_{th}^*. \end{cases} \quad (25)$$

式中: $S_{aj}, S_{bj}$ 分别表示a相和b相发生开路故障的开关管.

#### 4 实验验证

为了验证本文所提出的故障检测及定位方法的有效性和鲁棒性,搭建硬件在环实验平台进行实验验证.该实验平台如图6所示,主要包括上位机、示波器、数字信号处理器DSP(TMS320F28335)和dSPACE实时仿真器.其中上位机负责数据监测和实验设置;示波器用于显示波形;DSP用作实时控制器来产生开关管的脉冲控制信号,实现开关管开路故障注入与故障诊断算法;dSPACE用于模拟硬件电路.

在实验中,将在MATLAB/Simulink中所搭建的硬件模型下载到系统硬件板上,通过断开DSP发出的开关管脉冲控制信号实现开路故障模拟.dSPACE接收DSP发出的脉冲控制信号和故障诊断信号,通过系统模型运算,输出电压电流信号反馈给DSP,同时利用Controldest软件进行实时监测.此外,实验中单相三电平整流器的主要参数如表2所示,其来源于实际

CRH2型高速列车牵引系统单相三电平整流器模块<sup>[21]</sup>.

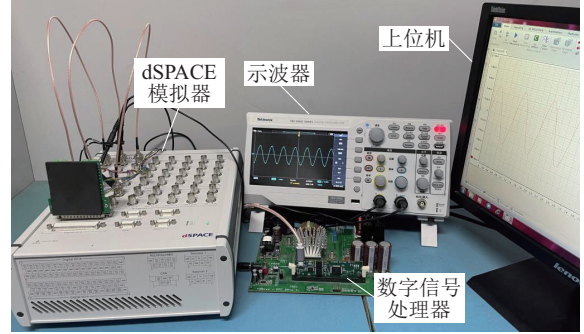


图6 硬件在环实验平台

Fig. 6 Hardware-in-the-loop experimental platform

表2 单相三电平整流器主要参数

Table 2 Main parameters of single-phase three-level rectifier

参数	符号	数值
等效电阻	$R$	$0.34 \Omega$
滤波电感	$L$	$2 \times 10^{-3} \text{ H}$
直流侧电容	$C_1$	$16 \times 10^{-3} \text{ F}$
直流侧电容	$C_2$	$16 \times 10^{-3} \text{ F}$
网侧电压	$U_s$	$1500 \text{ V}/50 \text{ Hz}$

另一方面,根据表2中的整流器参数与第3.1节中给出的定理1,利用MATLAB中的LMI工具包针对开关函数状态为 $\delta_a = 1, \delta_b = -1$ 时的A矩阵进行计算,可得

$$A = \begin{pmatrix} -170 & -500 & -500 \\ 62.5 & 0 & 0 \\ 62.5 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$P = 10^6 \begin{pmatrix} 2.1101 & 0 & 0 \\ 0 & 2.1101 & 0 \\ 0 & 0 & 2.1101 \end{pmatrix},$$

$$Y = 10^8 \begin{pmatrix} -3.5766 & -4.6159 & -4.6159 \\ -4.6159 & 0.0106 & 0 \\ -4.6159 & 0 & 0.0106 \end{pmatrix}.$$

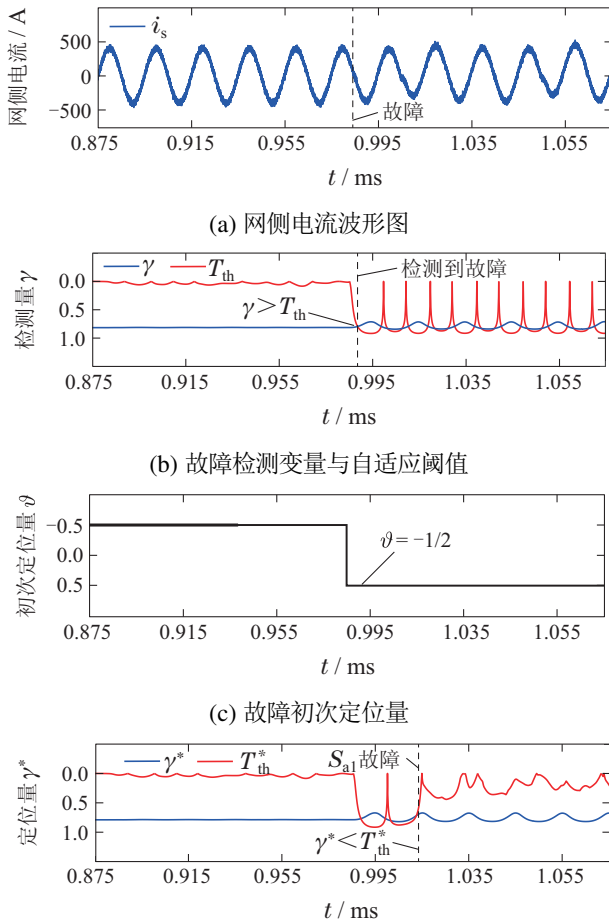
由此可知,存在正定矩阵 $P$ ,矩阵 $Y$ 使得式 $A^T P + PA - C^T Y^T - YC < 0$ ,故所建立的自适应滑模观测器误差系统是渐进稳定的.

此外,需要说明的是,对于单相电压源整流器,一般要求在全负载范围内网侧电流总谐波畸变率小于5%.因此,在实验中,未知扰动信号上界值考虑为网侧电流基波幅值的4%,即 $\|\eta_i\| \leq \chi = 20, \|\eta_{u1}\| \leq \chi_1 = 20, \|\eta_{u2}\| \leq \chi_1 = 20$ .

#### 4.1 诊断方法有效性验证

图7给出了单相三电平整流器a相外部开关管 $S_{a1}$

发生开路故障时的诊断结果. 在实验中, 当  $t = 0.965$  s 时, 断开 DSP 发出的  $a$  相桥臂开关管的脉冲控制信号来模拟开关管  $S_{a1}$  开路故障. 从图 7 可以看出, 当未发生开关管开路故障时, 实际网侧电流为正弦波, 故障检测量  $\gamma$  小于自适应阈值  $T_{th}$ . 然而, 当发生开路故障后, 实际网侧电流波形负半周发生轻微畸变, 故障检测量  $\gamma$  在故障发生后的 34.7% 基波电流周期超过自适应阈值  $T_{th}$ . 与此同时, 初次定位量  $\vartheta$  切换到  $-1/2$ , 这表明  $S_{a1}$  或  $S_{b4}$  发生开路故障. 随后, 在完成开关管初步定位后的  $1/2$  基波周期时刻, 将正常状态下的开关函数  $\delta_a$  替换为  $S_{a1}$  故障状态下的开关函数  $\delta_{a1}^*$ , 建立  $S_{a1}$  故障状态下的自适应滑模观测器. 由图 7(d) 可知, 此后故障定位量  $\gamma^*$  小于定位阈值  $T_{th}^*$ , 这表明  $a$  相开关管发生开路故障. 综上, 由式(24)–(25)可诊断出开关管  $S_{a1}$  发生开路故障.

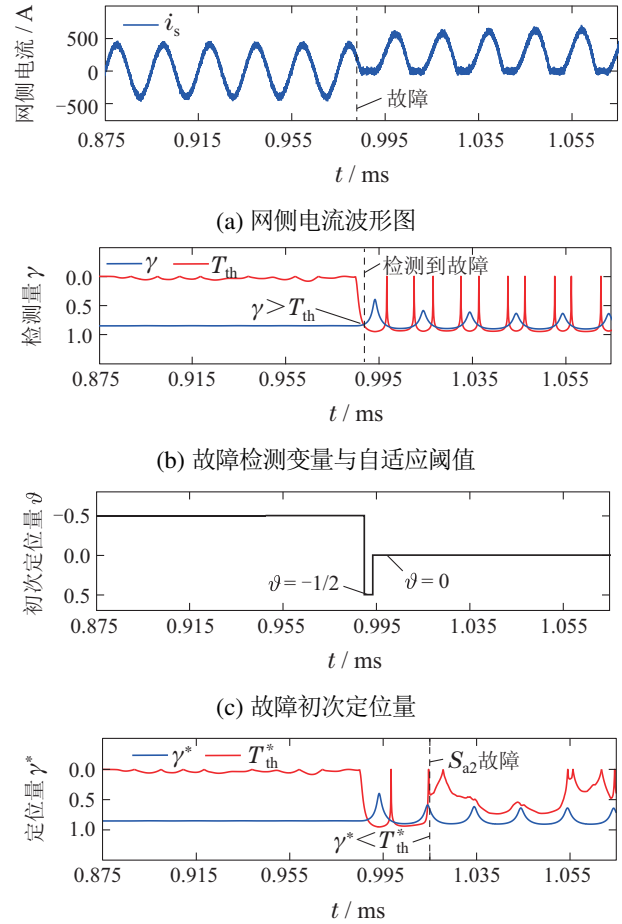


(a) 网侧电流波形图  
(b) 故障检测变量与自适应阈值  
(c) 故障初次定位量  
(d) 故障定位变量与定位阈值

图 7  $S_{a1}$  开路故障实验结果

为了进一步说明本文所提方法适用于内部开关管开路故障, 图 8 给出了  $a$  相内部开关管  $S_{a2}$  发生开路故障时故障诊断结果. 在实验中, 设定在  $t = 0.965$  s 时, 将  $a$  相桥臂开关管的脉冲控制信号断开以注入  $S_{a2}$  开路故障. 从图 8 可以看出, 当发生开路故障后, 此时故

障检测量  $\gamma$  迅速增大并超过自适应阈值  $T_{th}$ , 故障检测时间为 34.5% 基波电流周期, 初次定位量  $\vartheta$  短暂切换到  $-1/2$  后又迅速切换到 0 并保持不变, 这表明  $S_{a2}$  或  $S_{b3}$  发生开路故障. 与此同时, 由图 8(d) 可知, 故障定位量  $\gamma^*$  未超过定位阈值  $T_{th}^*$ , 这表明  $a$  相开关管发生开路故障. 综上, 则可以诊断故障的开关管为  $S_{a2}$ .



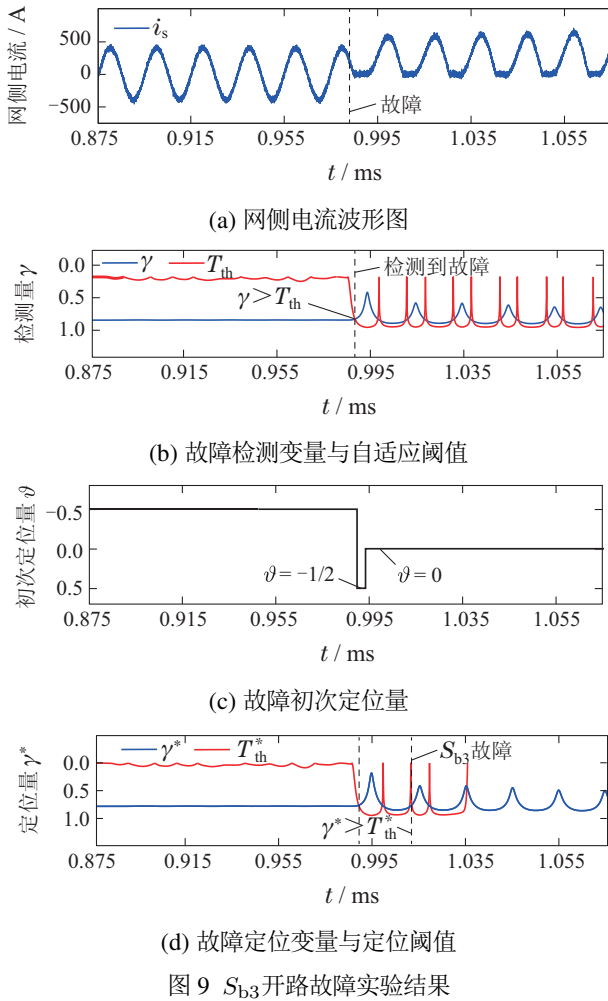
(a) 网侧电流波形图  
(b) 故障检测变量与自适应阈值  
(c) 故障初次定位量  
(d) 故障定位变量与定位阈值

图 8  $S_{a2}$  开路故障实验结果

Fig. 8 Experimental results for  $S_{a2}$  the open-circuit fault

图 9 给出了  $b$  相开关管  $S_{b3}$  发生开路故障时的诊断结果. 为了验证诊断方法适用于不同相开关管开路故障, 在实验中, 同样在  $t = 0.965$  s 时, 断开  $b$  相桥臂开关管  $S_{b3}$  的脉冲控制信号来模拟开关管  $S_{b3}$  开路故障. 从图 9 可知, 当未发生开关管开路故障时, 实际网侧电流为正弦波. 当发生开路故障后, 故障检测量  $\gamma$  迅速超过自适应阈值  $T_{th}$ , 初次定位量  $\vartheta$  切换到  $-1/2$  后又迅速切换到 0, 这表明  $S_{a2}$  或  $S_{b3}$  发生开路故障. 在实现开关管初次定位后的  $1/2$  基波周期时刻, 将正常状态下的开关函数  $\delta_a$  替换为  $S_{a2}$  故障状态下的开关函数  $\delta_{a2}^*$ , 建立故障状态下的自适应滑模观测器. 由图 9(d) 可知, 此时故障定位量  $\gamma^*$  迅速增大超过自适应阈值  $T_{th}^*$ , 这表明到  $b$  相开关管发生开路故障. 综上结果, 可以诊断出开关管  $S_{b3}$  发生开路故障.



Fig. 9 Experimental results for  $S_{b3}$  the open-circuit fault

## 4.2 诊断方法鲁棒性验证

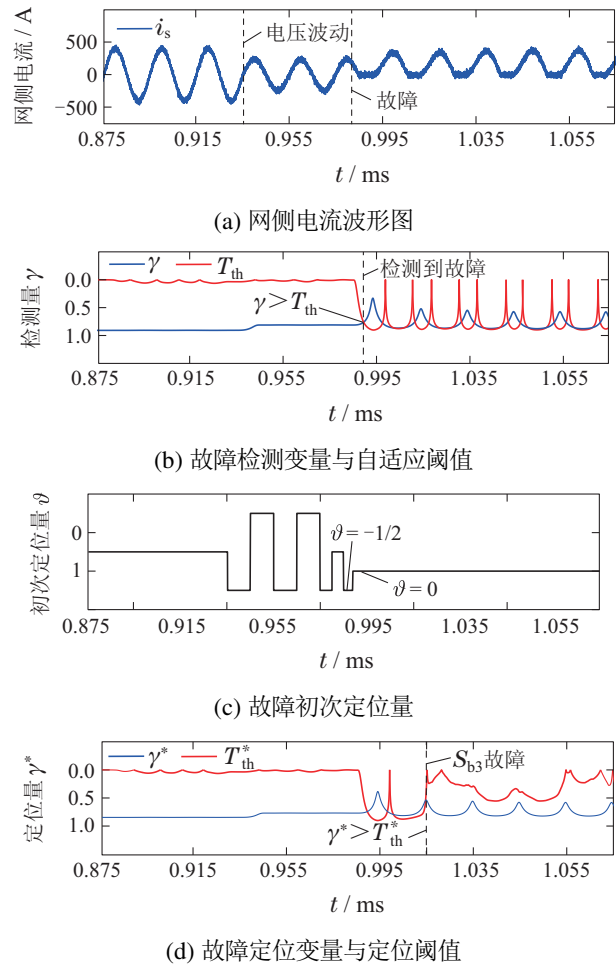
为了验证本文所提出的诊断方法的鲁棒性与可靠性,图10给出了单相三电平整流器网侧电压波动时的 $a$ 相开关管 $S_{a2}$ 开路故障诊断结果.由图10可知,在未发生网侧电压波动之前,故障检测量 $\gamma$ 小于自适应阈值 $T_{th}$ .在 $t=0.92$  s时,网侧电压基波幅值从1500 V上升到1800 V后,虽然故障检测量 $\gamma$ 产生了一定的波动,但仍远小于自适应阈值 $T_{th}$ ,此时不会产生故障误报.当发生 $a$ 相开关管 $S_{a2}$ 开路故障后,故障检测量 $\gamma$ 增加并迅速超过自适应阈值 $T_{th}$ ,同时,故障定位量 $\gamma^*$ 小于定位阈值 $T_{th}^*$ .初次定位量 $\vartheta$ 虽然会在电压波动后产生一定的波动,但是发生故障后仍会切换到 $-1/2$ 后又迅速切换到0,对故障诊断结果不产生影响,故可以诊断出开关管发生开路故障.因此,实验结果表明本文所提出的方法对网侧电压波动具有较强的鲁棒性,诊断稳定性较高.

## 5 方法对比

### 5.1 观测器对比

为了更直观说明所提出的自适应滑模观测器的性能,本节将其与文献[22–24]中所使用的滑模观测器相

比较,对比结果如图11所示.其中,本文所提出的自适应滑模观测器参数设置为 $k=40, \tau=2, \mu=0.5, \varepsilon=6$ .文献[22]中观测器的趋近律为 $f(s) = -k \operatorname{sgn} s, k > 0$ ,在对比实验中取 $k=40$ .文献[23]中观测器的趋近律为 $f(s) = -\lambda_1 - \lambda_2 |s|^{\sigma_3} \operatorname{sgn} s, \lambda_1, \lambda_2$ 为正常数,  $0 < \sigma_3 < 1$ ,在对比实验中取 $\lambda_1 = 0.1, \lambda_2 = 40, \sigma_3 = 0.5$ .文献[24]中观测器的趋近律 $f(s) = -k \frac{e^{ms} - e^{-ms}}{e^{ms} + e^{-ms}}, k > 0, m > 0$ ,在对比实验中取 $k=40, m=2$ .由图11可知,本文提出的自适应滑模观测器不仅在动态过程中收敛速度快,快速跟踪实际网侧电流,还可以在到达滑模面后的稳态过程中有效降低高频抖振.因此,本文所提出的自适应滑模观测器具有更好的动态和稳态性能.

Fig. 10 Experimental results for the  $S_{a2}$  open-circuit fault under grid voltage fluctuations

### 5.2 诊断方法对比

为了进一步说明本文所提出方法的有效性,本节把本文方法与文献[6–7,20]中的诊断方法进行对比.首先,在检测时间上,文献[6]采用具有瞬态综合特征的深度前馈网络进行故障检测,其检测时间大于20 ms.文献[7]利用相极电压偏差信号进行故障检测,

其检测时间小于 10 ms. 文献[20]通过对比整流器网侧电流残差变化率与自适应阈值实现开路故障诊断, 所需要的故障检测时间大于 10 ms. 与此同时, 从实验结果可知, 本文所用方法检测时间均小于 40% 基波周期, 即小于 8 ms, 诊断时间较快.

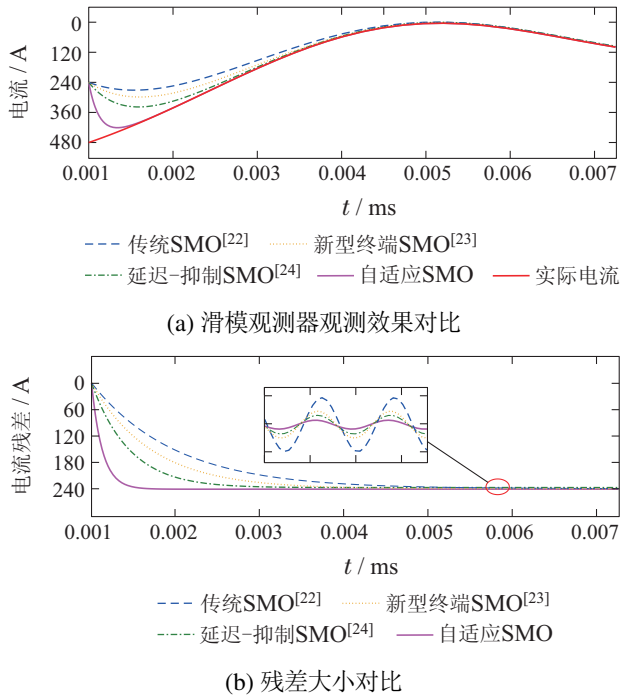


图 11 不同观测器性能比较

Fig. 11 Performance comparison of different observers

其次, 文献[6]利用深度前馈网络以实现故障分类, 该方法需要大量的相电流数据进行训练, 算法复杂度较高. 文献[7]在诊断时只考虑了内部开关管故障状态, 无法实现所有开关管故障诊断. 文献[20]在定位时需要注入特定的脉冲控制信号, 不利于系统的运行安全. 而本文所提出的方法利用已知准确的整流器模型参数, 通过建立自适应滑模观测器降低了外部扰动的影响. 只需利用整流器网侧电流构造故障诊断变量, 无需注入特定的脉冲控制信号, 且避免了智能诊断算法对大量故障数据样本的需求, 诊断时间较快. 但是需要指出的是, 本文方法依赖于准确的模型参数, 若模型参数不确定, 该方法将受到一定程度的影响.

## 6 结论

本文针对高速列车牵引系统单相三电平整流器, 提出了一种基于自适应滑模观测器的开路故障诊断方法. 首先, 建立单相三电平整流器状态空间模型并设计了收敛速度快且可抑制高频抖振的自适应滑模观测器. 在此基础上, 根据实际网侧电流与观测器输出的估计网侧电流提出了基于电流绝对值均方根的故障检测量与自适应阈值故障检测方法. 然后, 通过电流残差设计故障初次定位量. 最后, 再利用故障状

态开关函数替换正常状态开关函数, 提出了基于故障自适应滑模观测器的开路故障定位方法. 本文所提方法诊断速度较快, 鲁棒性强, 且避免使用大量数据样本和额外的控制信号. 实验结果验证了本文所提诊断方法的有效性.

需要说明的是, 本文仅是针对高铁牵引系统单相三电平整流器开路故障进行快速且准确的诊断, 而在诊断出故障后, 并未进一步设计容错控制算法实现系统的短暂可靠运行. 同时, 本文所提出的开路故障诊断方法只适用于整流器单开关管开路故障诊断, 尚不适用于多开关管故障、以及整流器其他部件与开关管同时故障的诊断, 如何实现多开关管故障、以及整流器其他部件与开关管同时故障的诊断是未来的研究方向.

## 参考文献:

- [1] ZHOU Donghua, JI Hongquan, HE Xiao. Fault diagnosis techniques for the information control system of high-speed trains. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(7): 1153 – 1164. (周东华, 纪洪泉, 何潇. 高速列车信息控制系统的故障诊断技术. *自动化学报*, 2018, 44(7): 1153 – 1164.)
- [2] SONG Pinggang, LIAN Jiawei, CHEN Yi. Single-phase power electronic transformer rectifier stage new direct power control strategy. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(3): 402 – 410. (宋平岗, 连加巍, 陈怡. 单相电力电子变压器整流级新型直接功率控制策略. *控制理论与应用*, 2022, 39(3): 402 – 410.)
- [3] JIANG Bin, WU Yunkai, LU Ningyun, et al. Review of fault diagnosis and prognosis techniques for high-speed railway traction system. *Control and Decision*, 2018, 33(5): 841 – 855. (姜斌, 吴云凯, 陆宁云, 等. 高速列车牵引系统故障诊断与预测技术综述. *控制与决策*, 2018, 33(5): 841 – 855.)
- [4] CHEN Z W, LIU C, DING S X, et al. A just-in-time-learning-aided canonical correlation analysis method for multimode process monitoring and fault detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 68(6): 5259 – 5270.
- [5] CHEN Z W, GUO R J, LIN Z, et al. A data-driven health monitoring method using multiobjective optimization and stacked autoencoder based health indicator. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 17(9): 6379 – 6389.
- [6] KOU L, LIU C, CAI G W, et al. Fault diagnosis for three-phase PWM rectifier based on deep feedforward network with transient synthetic features. *ISA transactions*, 2020, 101: 399 – 407.
- [7] CHEN M Y, HE Y G, SUI C S. Open-switch fault diagnosis in three-level rectifiers based on selective calculation method for instant voltage deviation. *IET Power Electronics*, 2021, 14(5): 923 – 935.
- [8] XU S Q, TAO S B, ZHENG W X, et al. Multiple open-circuit fault diagnosis for back-to-back converter of PMSG wind generation system based on instantaneous amplitude estimation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 3512413.
- [9] LI Liliang, NIU Rui, SHAO Zhijie, et al. Gyroscope fault diagnosis based on dedicated kalman filter scheme. *Control Theory & Application*, 2019, 36(9): 1501 – 1508. (李利亮, 牛睿, 邵志杰, 等. 基于专用卡尔曼滤波器思想的陀螺故障诊断. *控制理论与应用*, 2019, 36(9): 1501 – 1508.)
- [10] NASERI F, SCHALTZ E, LU K Y, et al. Real-time open-switch fault diagnosis in automotive PMSM drives based on Kalman filiter. *IET Power Electronics*, 2020, 13(12): 2450 – 2460.

- [11] CHEN Y, ZHANG J J, CHEN Z Y. Current observer based online open-switch fault diagnosis for voltage-source inverter. *ISA Transactions*, 2020, 99: 445 – 453.
- [12] XIE D, GE X L. A state estimator-based approach for open-circuit fault diagnosis in single-phase cascaded H-bridge rectifiers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 55(2): 1608 – 1618.
- [13] ZHOU X X, SUN J, CUI P L, et al. A fast and robust open-switch fault diagnosis method for variable-speed PMSM system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 36(3): 2598 – 2610.
- [14] HU Q L, HAN T, XIN M. Three-dimensional guidance for various target motions with terminal angle constraints using twisting control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(2): 1242 – 1253.
- [15] HU Q L, CHEN W H, GUO L, et al. Adaptive fixed-time attitude tracking control of spacecraft with uncertainty-rejection capability. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 52(7): 4634 – 4647.
- [16] CHU Xiaoyan, NIAN Xiaohong, LIU Jingjing. Fault detection and isolation for multi-motor web-winding system via robust sliding mode observers. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(6): 795 – 804.  
(楚晓艳, 年晓红, 刘静静. 基于鲁棒滑模观测器的多电机卷绕系统故障检测和隔离. *控制理论与应用*, 2018, 35(6): 795 – 804.)
- [17] ZHOU S R, XU L C, ARANUD G. Robust open-circuit fault diagnosis of multi-phase floating interleaved DC-DC boost converter based on sliding mode observer. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, 5(3): 638 – 649.
- [18] ZHANG Y Q, YIN Z G, ZHANG Y P, et al. A novel sliding mode observer with optimized constant rate reaching law for sensorless control of induction motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(7): 5867 – 5878.
- [19] JUNG J H, KU H K, SON Y D, et al. Open-switch fault diagnosis algorithm and tolerant control method of the three-phase three-level NPC active rectifier. *Energies*, 2019, 12(13): 2495 – 2511.
- [20] GE X L, PU J K, GOU B, et al. An open-circuit fault diagnosis approach for single-phase three-level neutral-point-clamped converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 33(3): 2559 – 2570.
- [21] YANG C H, YANG C, PENG T, et al. A fault-injection strategy for traction drive control systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(7): 5719 – 5727.
- [22] ZHANG K K, JIANG B, YAN X G, et al. Incipient voltage sensor fault isolation for rectifier in railway electrical traction systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(8): 6763 – 6774.
- [23] ABDUL K J, XU W, MU C X, et al. Adaptive speed control of PMSM drive system based a new sliding-mode reaching law. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(11): 12110 – 12121.
- [24] GONG C, HU Y H, GAO J Q, et al. An improved delay-suppressed sliding-mode observer for sensorless vector-controlled PMSM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(7): 5913 – 5923.

#### 作者简介:

**许水清** 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为复杂系统的故障诊断与容错控制, E-mail: xsqanhu91@gmail.com;

**王健** 硕士研究生, 目前研究方向为电力设备的故障诊断与估计, E-mail: jamewang@mail.hfut.edu.cn;

**胡友强** 副研究员, 硕士生导师, 目前研究方向为电子设备故障诊断及预测, E-mail: yqhu@cqu.edu.cn;

**张可** 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂系统智能控制与故障诊断, E-mail: smeta@163.com;

**江萍** 副教授, 目前研究方向为电力电子器件故障预测和健康管理, E-mail: jiangping64@163.com;

**柴毅** 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能系统故障诊断与应用等, E-mail: chaiyi@cqu.edu.cn.