

高速列车牵引整流器多类故障联合诊断方法

陶宏伟^{1,2} 彭涛^{1,2} 杨超^{1,2} 陈志文^{1,2} 桂卫华¹

摘要 提出了一种高速列车牵引整流器多类故障联合诊断方法. 首先, 基于三电平牵引整流器开路故障分析, 建立整流器所有功率器件开路故障以及正常运行的状态空间模型并构建相应状态观测器. 然后, 基于正常状态观测器进行故障检测, 检测到故障后, 基于故障观测器区分功率器件开路故障和网侧电流传感器故障, 进而诊断出功率器件开路故障位置和网侧电流传感器故障类型. 实时仿真结果验证了本文方法的正确性和有效性.

关键词 开路故障, 传感器故障, 联合诊断, 牵引整流器, 高速列车

引用格式 陶宏伟, 彭涛, 杨超, 陈志文, 桂卫华. 高速列车牵引整流器多类故障联合诊断方法. 自动化学报, 2019, 45(12): 2294–2302

DOI 10.16383/j.aas.c190258

Joint Fault Diagnosis Method of Multiclass Faults for Traction Rectifier in High-speed Train

TAO Hong-Wei^{1,2} PENG Tao^{1,2} YANG Chao^{1,2} CHEN Zhi-Wen^{1,2} GUI Wei-Hua¹

Abstract A joint fault diagnosis method of multiclass faults for the traction rectifier in high-speed train is proposed. First of all, based on open-circuit fault analysis of three-level traction rectifier, the state space models of rectifier operating in the normal condition and abnormal conditions that open-circuit fault happened in all power devices are built respectively. The corresponding state observers are established as well. Next the fault is detected by the normal state observer, open-circuit faults in power devices and grid side current sensor faults are distinguished by the fault state observers. Then the open-circuit fault location of power devices and fault type of grid side current sensor are obtained. The feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by the real-time simulation results.

Key words Open-circuit fault, sensor fault, joint diagnosis, traction rectifier, high-speed train

Citation Tao Hong-Wei, Peng Tao, Yang Chao, Chen Zhi-Wen, Gui Wei-Hua. Joint fault diagnosis method of multiclass faults for traction rectifier in high-speed train. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(12): 2294–2302

牵引整流器是高速列车的关键部件之一^[1-3], 其

可靠性要求非常高, 但是由于长时间不间断运行, 且工作环境复杂多变, 极易发生故障. CRH2 型动车组牵引变流器运行故障数据的统计分析表明整流模块故障和传感器故障是高速列车高发故障^[4], 其中功率器件故障占整个变流器故障的 38%^[5]. 功率器件故障主要包括开路故障与短路故障, 通常情况下, 短路故障发生后, 功率器件会在短时间内烧坏而导致开路故障^[6-7]. 当功率器件发生开路故障后, 如果得不到及时处理, 其临近的功率器件会承受更大的电压和电流, 很容易导致二次故障^[8]. 功率器件开路故障诊断成为近年来的研究热点^[9-11]. 网侧电流传感器是牵引整流器中的关键器件, 一旦发生故障, 会直接影响系统的控制和监测性能^[12-13], 若不能及时诊断出来, 有可能威胁到高速列车的安全运行. 因此, 传感器故障诊断问题也得到了学者们的广泛关注^[14-16].

收稿日期 2019-03-27 录用日期 2019-07-30

Manuscript received March 27, 2019; accepted July 30, 2019

国家自然科学基金 (61490702, 61773407, 61621062, 61803390), 轨道交通节能控制与安全监测湖南省重点实验室 (2017TP1002), 装备预研教育部联合基金 (6141A02022110), 装备预研领域基金 (61400030501), 博士后基金 (2018M643000), 湖南省研究生科研创新项目 (CX20190064, CX2018B041) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61490702, 61773407, 61621062, 61803390), Key Laboratory of Energy Saving Control and Safety Monitoring for Rail Transportation (2017TP1002), Program of Joint Pre-research Foundation of the Chinese Ministry of Education (6141A02022110), General Program of Equipment Pre-research Field Foundation of China (61400030501), Postdoctoral Foundation (2018M643000), and Hunan Provincial Innovation Foundation For Postgraduate (CX20190064, CX2018B041)

本文责任编辑 董海荣

Recommended by Associate Editor DONG Hai-Rong

1. 中南大学自动化学院, 长沙 410083 2. 中南大学轨道交通节能控制与安全监测湖南省重点实验室, 长沙 410083

1. School of Automation, Central South University, Changsha 410083 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Energy Saving Control and Safety Monitoring of Rail Transit, Central South University, Changsha 410083

功率器件开路故障和传感器故障都会导致传感器测量数据的异常,但是大部分诊断算法在诊断过程中并未对其进行区分.文献[17-18]基于混合逻辑动态模型,对整流器开路故障进行诊断,但在诊断过程中需要给定强制的脉冲控制信号,以确定开路故障位置,这可能危及系统运行安全.文献[19]基于等位点函数,对三相逆变器进行开路故障诊断,但该方法难以直接用于单相牵引整流器.这些开路故障诊断方法都假定传感器测量数据的异常源于功率器件开路故障.文献[20]提出了一种基于状态观测器的整流器系统传感器故障诊断方法,能够对网侧电流传感器和直流电压传感器故障进行诊断,确定故障发生位置,但是无法确定传感器故障类型.文献[21]对感应电机矢量控制系统中的速度传感器故障进行了诊断,并且可以在故障发生后将系统切换到无速度传感器的运行模式,同样也是只能对故障进行定位,无法诊断出传感器发生了何种故障.这些传感器故障诊断方法,都假定传感器测量数据的异常源于传感器故障,若发生功率器件开路故障导致传感器测量数据异常,在故障诊断过程中就会产生误报.截止目前为止,大多故障诊断方法只单独针对功率器件开路故障或者传感器故障,都需要基于传感器测量数据的异常进行故障诊断,但并不能区分系统是发生了传感器故障还是功率器件开路故障.

本文提出一种用于高速列车牵引传动系统中的三电平整流器功率器件故障与网侧电流传感器故障联合诊断方法,在故障诊断过程中,首先基于正常状态观测器进行故障检测,当检测到系统有故障发生时,使用故障观测器区分功率器件开路故障和网侧电流传感器故障,若为功率器件开路故障,进一步使用故障观测器得到故障位置,若为网侧电流传感器故障,则根据网侧电流特征值与故障诊断阈值的大小关系,诊断出网侧电流传感器故障类型,包括增益、偏移和漂移故障.本文方法在故障诊断过程中能够区分功率器件开路故障和网侧电流传感器故障,确定故障实际来源,对故障进行精确定位,此外,在故障诊断过程中,无需给定强制脉冲控制信号,也不需要新增传感器,不会影响系统本身运行.

1 三电平整流器故障分析

三电平整流器是牵引变流器的重要组成部分,其功能是通过控制电网的有功功率和无功功率,保证其功率因数恒定,并调节直流环节电压稳定在设计值.图1是三电平整流器的拓扑结构, u_N 和 i_N 分别是网侧的电压和电流, u_1 和 u_2 是直流环节上侧和

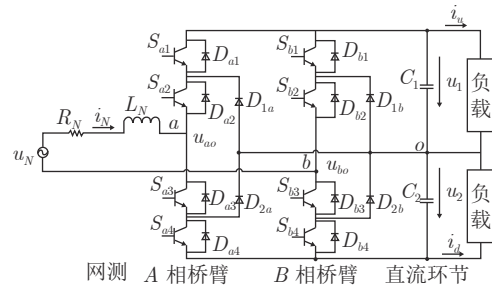


图1 三电平整流器拓扑结构

Fig. 1 Topology of three-level rectifier

下侧电压, i_u 和 i_d 是直流环节上侧和下侧负载电流; L_N 和 R_N 是网侧的等效电感和等效电阻, C_1 和 C_2 是直流环节上侧和下侧支撑电容.整流器包括两个桥臂,分别为A相桥臂和B相桥臂,每个桥臂由4个功率器件、4个续流二极管和2个钳位二极管构成.

三电平整流器开关函数定义如下:

$$S_X = \begin{cases} 1, & S_{x1} \text{和} S_{x2} \text{导通, 或} D_{x1} \text{和} D_{x2} \text{导通} \\ 0, & D_{1x} \text{和} S_{x2} \text{导通, 或} D_{2x} \text{和} S_{x3} \text{导通} \\ -1, & S_{x3} \text{和} S_{x4} \text{导通, 或} D_{x3} \text{和} D_{x4} \text{导通} \end{cases} \quad (1)$$

其中,下标 $X = A, B$, $x = a, b$ 分别代表三电平整流器A相桥臂和B相桥臂.

定义 s_{x1} , s_{x2} , s_{x3} , s_{x4} 分别为功率器件 S_{x1} , S_{x2} , S_{x3} , S_{x4} 对应的脉冲控制信号.使用开关函数 S_X ,可以把三电平整流器简化为如图2所示的开关等效电路.

1.1 功率器件开路故障分析

以A桥臂为例,分析功率器件开路故障对三电平整流器的影响.

1.1.1 S_{a1} 发生开路故障

若 $i_N > 0$,电流不经过 S_{a1} , S_{a1} 发生开路故障

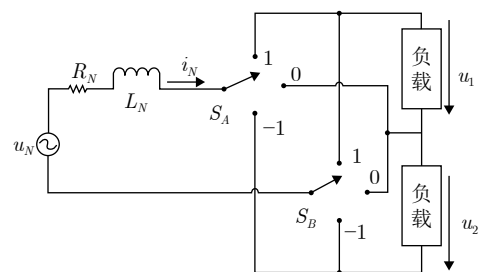


图2 三电平整流器开关等效电路

Fig. 2 Switching equivalent circuit of three-level rectifier

对系统没有影响. 若 $i_N \leq 0$, 当 A 相桥臂的脉冲控制信号为 1100 时, 正常情况下, 电流流经 S_{a1} 和 S_{a2} , 此时 $S_A = 1$, 如图 3(a) 所示; S_{a1} 发生开路故障时, 电流无法流过 S_{a1} , 因此会流过 D_{1a} 和 S_{a2} , 此时 $S_A = 0$, 如图 3(b) 所示.

1.1.2 S_{a2} 发生开路故障

若 $i_N > 0$, 电流不经过 S_{a2} , S_{a2} 发生开路故障对系统没有影响. 若 $i_N \leq 0$, 当 A 相桥臂的脉冲控制信号为 1100 时, 正常情况下, 电流流经 S_{a1} 和 S_{a2} , 此时 $S_A = 1$, 如图 3(a) 所示; S_{a2} 发生开路故障时, 电流无法流过 S_{a2} , 因此会流过 D_{a4} 和 D_{a3} , 此时 $S_A = -1$, 如图 3(c) 所示. 当 A 相桥臂的脉冲控制信号为 0110 时, 正常情况下, 电流流经 D_{1a} 和 S_{a2} , 此时 $S_A = 0$, 如图 3(b) 所示; S_{a2} 发生开路故障时, 电流无法流过 S_{a2} , 因此会流过 D_{a4} 和 D_{a3} , 此时 $S_A = -1$, 如图 3(c) 所示.

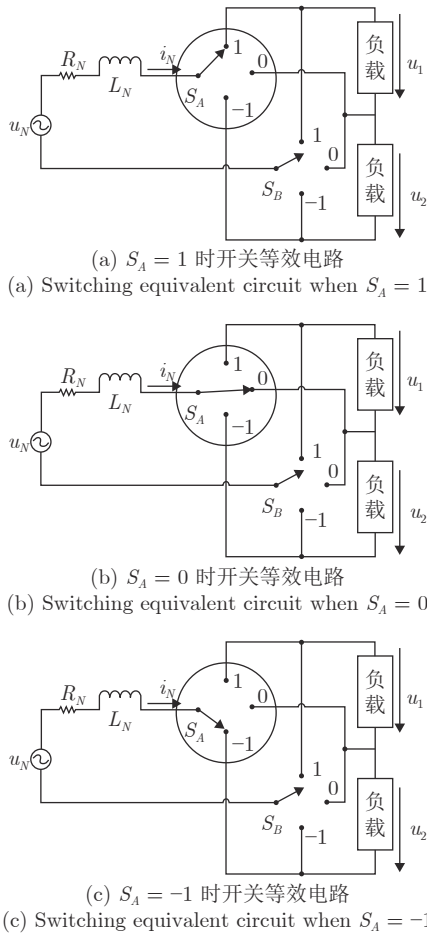


图 3 不同运行情况下三电平整流器开关等效电路
Fig. 3 Switching equivalent circuit of three-level rectifier in different operation conditions

1.1.3 S_{a3} 发生开路故障

若 $i_N \leq 0$, 电流不经过 S_{a3} , S_{a3} 发生开路故障对系统没有影响. 若 $i_N > 0$, 当 A 相桥臂的脉冲控制信号为 0110 时, 正常情况下, 电流流经 S_{a3} 和 D_{2a} , 此时 $S_A = 0$, 如图 3(b) 所示; S_{a3} 发生开路故障时, 电流无法流过 S_{a3} , 因此会流过 D_{a2} 和 D_{a1} , 此时 $S_A = 1$, 如图 3(a) 所示. 当 A 相桥臂的脉冲控制信号为 0011 时, 正常情况下, 电流流经 S_{a3} 和 S_{a4} , 此时 $S_A = -1$, 如图 3(c) 所示; S_{a3} 发生开路故障时, 电流无法流过 S_{a3} , 因此会流过 D_{a2} 和 D_{a1} , 此时 $S_A = 1$, 如图 3(a) 所示.

1.1.4 S_{a4} 发生开路故障

若 $i_N \leq 0$, 电流不经过 S_{a4} , S_{a4} 发生开路故障对系统没有影响. 若 $i_N > 0$, 当 A 相桥臂的脉冲控制信号为 0011 时, 正常情况下, 电流流经 S_{a3} 和 S_{a4} , 此时 $S_A = -1$, 如图 3(c) 所示; S_{a4} 发生开路故障时, 电流无法流过 S_{a4} , 因此会流过 S_{a3} 和 D_{2a} , 此时 $S_A = 0$, 如图 3(b) 所示.

综上所述, S_{a1} 和 S_{a2} 发生开路故障时, 会对网侧电流 i_N 的负半周造成影响, 且 S_{a2} 发生开路故障的影响更大; S_{a3} 和 S_{a4} 发生开路故障时, 会对网侧电流 i_N 的正半周造成影响, 且 S_{a3} 发生开路故障的影响更大. 由于结构上的对称性, B 相桥臂上的功率器件 $S_{b1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{b4}$ 开路故障分析过程分别与 $S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}$ 开路故障分析过程类似, 限于篇幅, 此处不再赘述.

1.2 网侧电流传感器故障分析

网侧电流传感器工作环境复杂, 干扰因素多, 加上长时间不间断地运行, 容易发生增益、偏移和漂移等故障^[22]. 增益故障是网侧电流实际值与传感器测量值存在固定的倍数差异; 偏移故障是网侧电流实际值与传感器测量值存在固定的数值差异; 漂移故障是网侧电流实际值与传感器测量值存在随时间缓慢变大的差异. 发生增益、偏移和漂移故障时, 网侧电流实际值与传感器测量值之间的关系可分别由式 (2)~(4) 表示.

$$x = ax_0 \tag{2}$$

$$x = x_0 + b \tag{3}$$

$$x = x_0 + c \cdot \Delta t \tag{4}$$

其中, x_0 是网侧电流实际值, x 为传感器测量值, a, b, c 分别为增益系数、偏移系数和漂移系数, Δt 为漂移故障持续时间.

2 三电平整流器功率器件开路故障建模

搭建三电平整流器的状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (5)$$

其中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_N}{L_N} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & 0 & 0 \\ a_{31} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_N} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0]^T, \quad \mathbf{x} = [i_N \ u_1 \ u_2]^T, \quad \mathbf{u} = [u_N \ i_u \ i_d]^T$$

$$a_{12} = \frac{S_B(S_B + 1) - S_A(S_A + 1)}{2L_N}$$

$$a_{13} = \frac{S_A(S_A - 1) - S_B(S_B - 1)}{2L_N}$$

$$a_{21} = \frac{S_A(S_A + 1) - S_B(S_B + 1)}{2C_1}$$

$$a_{31} = \frac{S_B(S_B - 1) - S_A(S_A - 1)}{2C_2}$$

正常运行时, 开关函数 S_X 与脉冲控制信号 s_{x1} , s_{x2} , s_{x3} , s_{x4} 的关系为

$$S_X = s_{x1}s_{x2} - s_{x3}s_{x4} \quad (6)$$

当 S_{a1} , S_{a2} , S_{a3} , S_{a4} 分别发生开路故障时, 开关函数 S_A 与脉冲控制信号 s_{a1} , s_{a2} , s_{a3} , s_{a4} 的关系分别为

$$S_A = c_N s_{a1} s_{a2} - s_{a3} s_{a4} \quad (7)$$

$$S_A = c_N (s_{a1} s_{a2} - s_{a3} s_{a4}) - \bar{c}_N \quad (8)$$

$$S_A = \bar{c}_N (s_{a1} s_{a2} - s_{a3} s_{a4}) + c_N \quad (9)$$

$$S_A = s_{a1} s_{a2} - \bar{c}_N s_{a3} s_{a4} \quad (10)$$

其中, c_N 为网侧电流 i_N 的标志位, $i_N > 0$ 时, $c_N = 1$, $\bar{c}_N = 0$; $i_N \leq 0$ 时, $c_N = 0$, $\bar{c}_N = 1$.

当 S_{b1} , S_{b2} , S_{b3} , S_{b4} 分别发生开路故障时, 开关函数 S_B 与脉冲控制信号 s_{b1} , s_{b2} , s_{b3} , s_{b4} 的关系分别为

$$S_B = \bar{c}_N s_{b1} s_{b2} - s_{b3} s_{b4} \quad (11)$$

$$S_B = \bar{c}_N (s_{b1} s_{b2} - s_{b3} s_{b4}) - c_N \quad (12)$$

$$S_B = c_N (s_{b1} s_{b2} - s_{b3} s_{b4}) + \bar{c}_N \quad (13)$$

$$S_B = s_{b1} s_{b2} - c_N s_{b3} s_{b4} \quad (14)$$

使用式 (6) 得到 S_A 和 S_B 的值并代入式 (5) 中, 得到三电平整流器正常运行状态空间模型; 使用式 (6) 得到 S_B 的值和分别使用式 (7)~(10) 得到 S_A 的值, 并代入式 (5) 中, 得到 S_{a1} , S_{a2} , S_{a3} , S_{a4} 分别开路故障时的三电平整流器故障状态空间模型; 使用式 (6) 得到 S_A 的值和分别使用式 (11)~(14) 得到 S_B 的值, 并代入式 (5) 中, 得到 S_{b1} , S_{b2} , S_{b3} , S_{b4} 分别开路故障时的三电平整流器故障状态空间模型。

3 多类故障联合诊断方法

3.1 构建状态观测器

针对第 2 节所建模型, 构建三电平整流器的状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{L}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (15)$$

其中, \mathbf{L} 为状态观测器增益矩阵, $\mathbf{y} = i_N$.

分别使用正常运行和 S_{a1} , S_{a2} , S_{a3} , S_{a4} , S_{b1} , S_{b2} , S_{b3} , S_{b4} 开路故障的 9 个状态空间模型, 构建三电平整流器 9 个状态观测器, 分别定义为 0~8 号状态观测器, 其中 0 号观测器为正常状态观测器, 1~8 号为开路故障状态观测器, 分别对应 S_{a1} , S_{a2} , S_{a3} , S_{a4} , S_{b1} , S_{b2} , S_{b3} , S_{b4} 开路故障. 得到网侧电流的 9 个估计值分别为 \hat{i}_{N0} , \hat{i}_{N1} , \hat{i}_{N2} , \hat{i}_{N3} , \hat{i}_{N4} , \hat{i}_{N5} , \hat{i}_{N6} , \hat{i}_{N7} , \hat{i}_{N8} , 分别与网侧电流传感器测量值进行比较, 得到 9 个残差为

$$\tilde{i}_{Nm} = i_N - \hat{i}_{Nm} \quad (16)$$

其中, $m = 0, 1, 2, \dots, 8$.

3.2 故障检测

设定故障检测阈值 K_0 , 定义函数 $e(k)$ 和 $E(k)$ 为

$$e(k) = \begin{cases} 1, & |\tilde{i}_{N0}(k)| > K_0 \\ 0, & |\tilde{i}_{N0}(k)| \leq K_0 \end{cases} \quad (17)$$

$$E(k) = \begin{cases} 0, & k = 1 \\ \max[e(k), E(k-1)], & k \geq 2 \end{cases} \quad (18)$$

其中, $\tilde{i}_{N0}(k)$ 是残差 \tilde{i}_{N0} 在第 k 个采样点的值.

系统正常运行时, \hat{i}_{N0} 与网侧电流实际值 i_N 之间残差的绝对值 $|\tilde{i}_{N0}| \leq K_0$, $E(k) = 0$; 系统发生故障时, $|\tilde{i}_{N0}| > K_0$, $E(k) = 1$, 进入故障诊断程序.

3.3 故障诊断

设定故障诊断阈值 K_1 , 定义函数 $\delta_m(k)$, $h_m(k)$, $H(k)$ 为

$$\delta_m(k) = \begin{cases} 1, & |\tilde{i}_{Nm}(k)| > K_1 \\ 0, & |\tilde{i}_{Nm}(k)| \leq K_1 \end{cases} \quad (19)$$

$$h_m(k) = \begin{cases} 0, & k = 1 \\ \max[\delta_m(k), h_m(k-1)], & k \geq 2 \end{cases} \quad (20)$$

$$H(k) = \sum_{j=1}^8 2^{j-1} \times h_j(k) \quad (21)$$

函数 $H(k)$ 的值与故障位置对应关系如表 1 所示。

三电平整流器网侧电流传感器的采样周期为 T_s ，网侧电流的周期为 T ，则网侧电流每个周期采样点数 $L = T/T_s$ 。定义函数 $f(k)$ 和 $p(k)$ 为

$$f(k) = \begin{cases} 0, & k < L \\ \frac{1}{L} \sum_{j=k-L+1}^k \tilde{i}_{N0}(j), & k \geq L \end{cases} \quad (22)$$

$$p(k) = \begin{cases} 0, & k < L \\ \frac{1}{L} \sum_{j=k-L+1}^k |\tilde{i}_{N0}(j)|, & k \geq L \end{cases} \quad (23)$$

其中， $f(k)$ 表示残差 \tilde{i}_{N0} 在一个网侧电流周期内的平均值， $p(k)$ 表示残差 \tilde{i}_{N0} 在一个网侧电流周期内绝对值的平均值。

为了保证故障诊断算法的稳定性和抗干扰能力，定义函数 $F(k)$ 和 $P(k)$ 为

$$F(k) = \begin{cases} 0, & k < L \\ \frac{1}{L} \sum_{j=k-L+1}^k f(j), & k \geq L \end{cases} \quad (24)$$

$$P(k) = \begin{cases} 0, & k < L \\ \frac{1}{L} \sum_{j=k-L+1}^k p(j), & k \geq L \end{cases} \quad (25)$$

表 1 $H(k)$ 与故障位置的关系

Table 1 Relationship of $H(k)$ and fault location

$H(k)$	故障位置
255	电流传感器
254	S_{a1} 开路故障
253	S_{a2} 开路故障
251	S_{a3} 开路故障
247	S_{a4} 开路故障
236	S_{b1} 开路故障
223	S_{b2} 开路故障
191	S_{b3} 开路故障
127	S_{b4} 开路故障

定义函数 $Q(k)$ 为

$$Q(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{T_s} \quad (26)$$

设定故障诊断阈值 K_2, K_3, K_4, K_5 ，式 (27)~(29) 可用于诊断系统稳定运行一个网侧电流周期后，网侧电流传感器发生的增益故障、偏移故障和漂移故障。

$$G(k) = \begin{cases} 1, & |F(k)| \leq K_2, P(k) > K_3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (27)$$

$$O(k) = \begin{cases} 1, & |F(k)| > K_2, Q(k) > K_5 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

$$D(k) = \begin{cases} 1, & |F(k)| > K_2, K_4 < Q(k) \leq K_5 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

图 4 是本文所提多类故障联合诊断方法的流程图。首先使用正常状态观测器，计算 \tilde{i}_{N0} ，得到 $E(k)$ ，根据 $E(k)$ 的值确定系统是否发生故障，若检测到系统发生故障，则使用 8 个开路故障状态观测器，计算 $\tilde{i}_{N1} \sim \tilde{i}_{N8}$ ，得到 $H(k)$ ，根据 $H(k)$ 的值区分是功率器件开路故障还是网侧电流传感器故障；若为功率器件开路故障，则进一步根据 $H(k)$ 的值诊断出功率器件开路故障位置；若是网侧电流传感器故障，

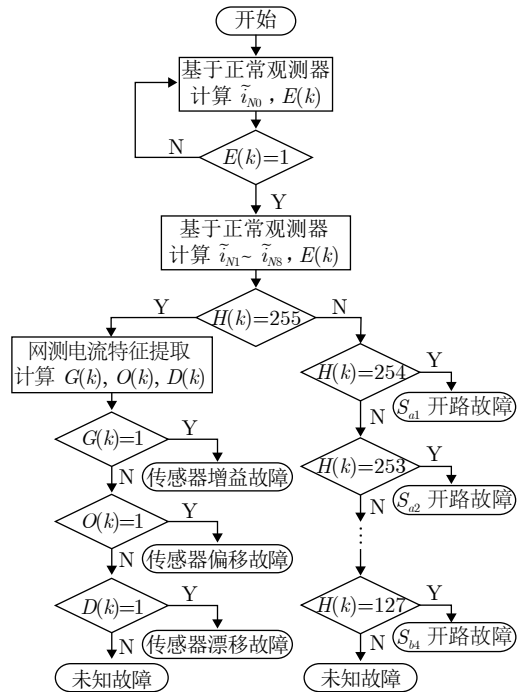


图 4 多类故障联合诊断方法流程图

Fig. 4 Flowchart of joint fault diagnosis method for multiclass faults

则提取网侧电流特征值, 根据特征值与阈值的比较得到 $G(k)$, $O(k)$, $D(k)$ 的值, 诊断出网侧电流传感器故障类型. 该方法能够诊断出牵引整流器两个桥臂上的 8 种功率器件开路故障、网侧电流传感器的增益、偏移和漂移故障.

4 实时仿真结果

为了验证所提故障诊断方法的有效性和准确性, 在中车株洲电力机车研究所有限公司搭建了实时仿真平台, 该平台包括 1 个 CRH2 型高速列车牵引变流器的实物控制器, 1 个 dSPACE 实时仿真器和 1 个上位机, 如图 5 所示^[9]. 实物控制器的核心控制芯片是 EP2K8T144C8N 和 TMS320F28335, 用于加载控制策略程序; dSPACE 实时仿真器用于实现本文所建三电整流器正常与开路故障模型、作为负载的逆变器和牵引电机模型以及系统中的传感器; 上位机提供控制界面. 实物控制器从 dSPACE 接收电压、电流和速度信号, 发出脉冲控制信号输入到 dSPACE. 结合 MATLAB/Simulink 和 ControlDesk 软件实现对仿真的实时控制, 控制系统的步长是 40 μ s, dSPACE 的实时仿真步长是 10 ns. 变流器和牵引电机的参数如表 2 和表 3 所示. 在实时仿真室验中, 网侧电流传感器增益故障的增益系数 $a = 1.1$ 倍, 偏移故障的偏移系数 $b = 15$ A, 漂移故障的漂移系数 $c = 10$ A/s.

利用本文所提故障联合诊断方法, 对三电整流器功率器件开路故障和网侧电流传感器故障进行诊断, 图 6 是功率器件 S_{a1} 开路故障诊断结果, 在 2 s

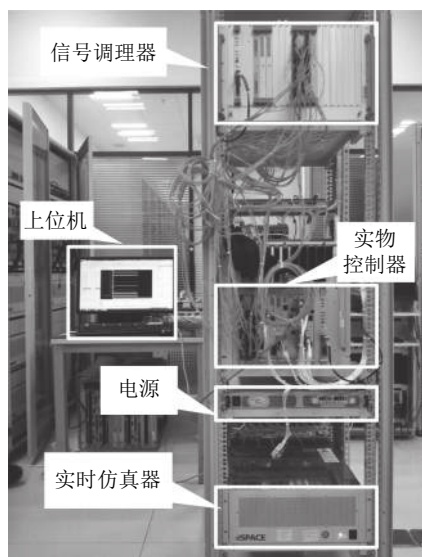


图 5 实时仿真平台

Fig. 5 Real-time simulation platform

表 2 变流器参数

Table 2 Parameter of converter

参数	符号	值
网侧电压有效值	u_N	1500 V
变压器电感	L_N	2 mH
变压器电阻	R_N	0.2 Ω
直流环节电压	u_1, u_2	1 300 V
支撑电容	C_1, C_2	1 600 mF

表 3 牵引电机参数

Table 3 Parameter of traction motor

参数	符号	值
定子电阻	R_s	0.15 Ω
定子电感	L_{ls}	1.42 mH
转子电阻	R_r	0.16 Ω
转子电感	L_{lr}	0.6 mH
互感	L_m	25.4 mH
额定电压	U_{rate}	2 000 V
额定频率	f_{rate}	140 Hz
额定转速	n_{rate}	4 140 r/min
额定输出功率	P_{rate}	300 kW
额定转差率	s_{rate}	1.4%

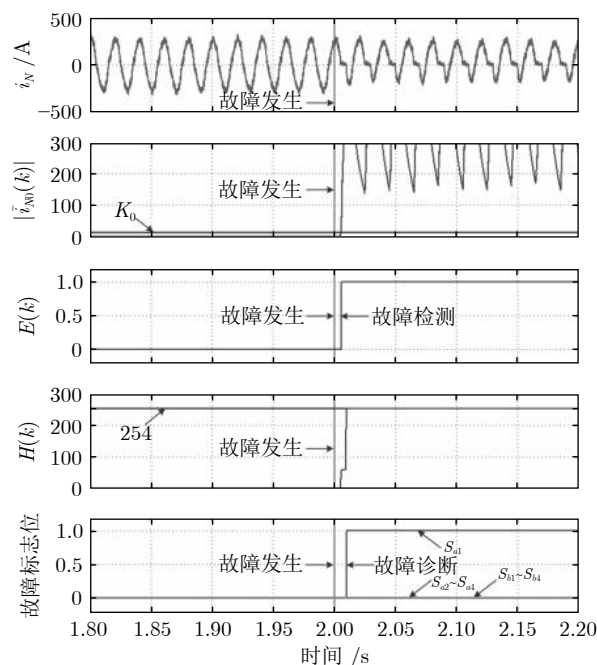


图 6 S_{a1} 开路故障诊断结果

Fig. 6 Results of fault diagnosis when open-circuit fault occurs in S_{a1}

时, S_{a1} 发生开路故障, 随后残差的绝对值 $|\hat{i}_{N0}|$ 迅速增大, 超过 K_0 , 系统检测到有故障发生, 再根据故障诊断函数 $H(k) = 254$, 诊断出是功率器件 S_{a1} 发生开路故障. A 桥臂其余 3 个功率器件和 B 桥臂 4 个功率器件开路故障诊断过程与 S_{a1} 开路故障类似, 不再重复说明. 图 7 是网侧电流传感器增益故障诊断结果, 在 2s 时, 网侧电流传感器发生增益故障, 残差的绝对值 $|\hat{i}_{N0}|$ 立刻增大, 超过 K_0 , 系统检测到有故障发生, 此时故障诊断函数 $H(k) = 255$, 判断为网侧电流传感器故障, 再根据 $|F(k)|$ 和 $P(k)$ 的值, 得到 $G(k) = 1$, $O(k) = 0$, $D(k) = 0$, 诊断出是网侧电流传感器增益故障. 图 8 是网侧电流传感器偏移故障诊断结果, 诊断过程与增益故障类似, 根据 $|F(k)|$ 和 $Q(k)$ 的值, 得到 $G(k) = 0$, $O(k) = 1$, $D(k) = 0$, 诊断出是网侧电流传感器偏移故障. 图 9 是网侧电流传感器漂移故障诊断结果, 根据 $|F(k)|$ 和 $Q(k)$ 的值, 得到 $G(k) = 0$, $O(k) = 0$, $D(k) = 1$, 诊断出是网侧电流传感器漂移故障.

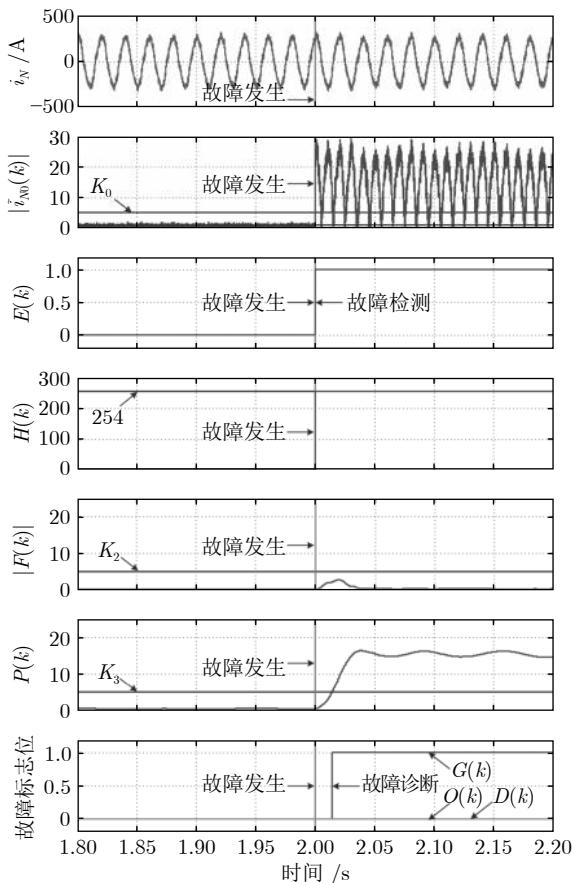


图 7 网侧电流传感器增益故障诊断结果

Fig. 7 Results of fault diagnosis when gain fault occurs in grid current sensor

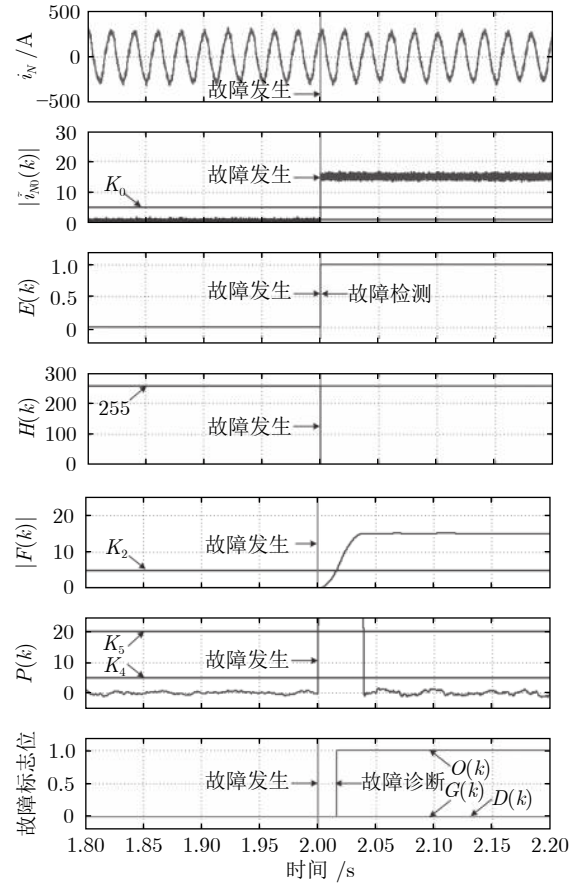


图 8 网侧电流传感器偏移故障诊断结果

Fig. 8 Results of fault diagnosis when offset fault occurs in grid current sensor

5 结束语

本文提出一种高速列车牵引整流器多类故障联合诊断方法, 能够诊断出三电平整流器任一桥臂上的任一功率器件开路故障和网侧电流传感器的增益、偏移、漂移 3 种故障. 首先建立三电平整流器正常与开路故障状态空间模型, 并构建状态观测器, 基于正常状态观测器进行故障检测, 当检测到系统中有故障发生时, 使用故障状态观测器区分功率器件开路故障和网侧电流传感器故障. 若为功率器件开路故障, 则继续使用故障观测器得到开路故障位置, 若为网侧电流传感器故障, 则需要提取网侧电流特征值并与故障诊断阈值比较, 根据比较结果得到网侧电流传感器故障类型, 完成多类故障联合诊断. 本文所提方法在故障诊断过程中, 只需用到系统现有传感器的测量值, 且不用强制改变系统脉冲控制信号, 不会影响系统的安全运行.

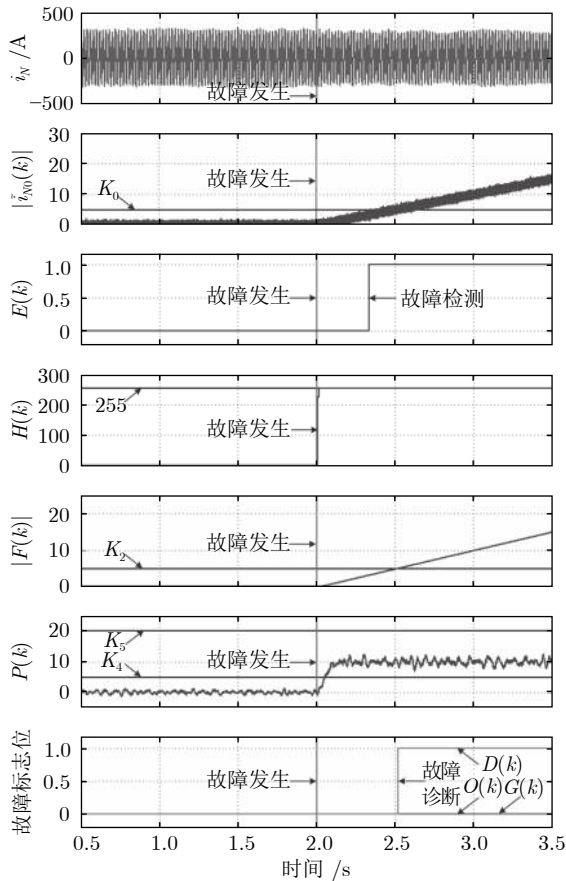


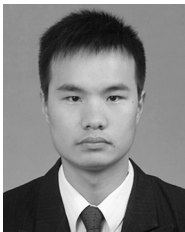
图9 网侧电流传感器漂移故障诊断结果

Fig. 9 Results of fault diagnosis when drift fault occurs in grid current sensor

References

- Zhou Dong-Hua, Ji Hong-Quan, 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)
- Steimel A. Electric railway traction in Europe. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2002, **2**(6): 6–17
- Yang X Y, Yang C H, Peng T, Chen Z W, Liu B, Gui W H. Hardware-in-the-Loop fault injection for traction control system. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, **6**(2): 697–706
- Dai Shun-Hua. Introduction and failure analysis of traction converter for CRH 2 EMUs. *Railway Locomotive and Car*, 2013, **33**(2): 93–97
(戴舜华. CRH 2 型系列动车组牵引变流器介绍及故障分析. *铁道机车车辆*, 2013, **33**(2): 93–97)
- Yang S Y, Xiang D W, Bryant A, Mawby P, Ran L, Tavner P. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: a review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, **25**(11): 2734–2752
- Tao H W, Peng T, Yang C, Chen Z W, Yang C H, Gui W H. Open-circuit fault analysis and modeling for power converter based on single arm model. *Electronics*, 2019, **8**(6): 633
- Lu B, Sharma S K. A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, **45**(5): 1770–1777
- Peng T, Tao H W, Yang C, Chen Z W, Yang C H, Gui W H, Karimi H R. A uniform modeling method based on open-circuit faults analysis for NPC-three-level converter. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2019, **66**(3): 457–461
- Huang Z J, Wang Z S, Zhang H G. A diagnosis algorithm for multiple open-circuited faults of microgrid inverters based on main fault component analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018, **33**(3): 925–937
- Zhao H S, Cheng L L. Open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of DF wind turbine. *IET Renewable Power Generation*, 2017, **11**(4): 417–424
- Li Z, Peng T, Zhang P F, Han H, Yang J. Fault diagnosis and fault-tolerant control of photovoltaic micro-inverter. *Journal of Central South University*, 2016, **23**(9): 2284–2295
- 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*, 2019, **55**(2): 1608–1618
- Wu F, Zhao J. Current similarity analysis based open-circuit fault diagnosis for two-level three-phase PWM rectifier. *IEEE Transactions on Power Electronic*, 2017, **32**(5): 3935–3945
- Youssef A B, El Khil S K, Slama-Belkhdja I. State observer-based sensor fault detection and isolation, and fault tolerant control of a single-phase PWM rectifier for electric railway traction. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, **28**(12): 5842–5853
- Wang X Q, Wang Z, Xu Z X, Cheng M, Wang W, Hu Y H. Comprehensive diagnosis and tolerance strategies for electrical faults and sensor faults in dual three-phase PMSM drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, **34**(7): 6669–6684
- Chen Z W, Yang C H, Peng T, Dan H B, Li C G, Gui W H. A cumulative canonical correlation analysis-based sensor precision degradation detection method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, **66**(8): 6321–6330
- Gou B, Ge X L, Wang S L, Feng X Y, Kuo J B, Haberler T G. An open-switch fault diagnosis method for single-phase PWM rectifier using a model-based approach in high-speed railway electrical traction drive system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, **31**(5): 3816–3826
- Ge X L, Pu J K, Gou B, Liu Y C. An open-circuit fault diagnosis approach for single-phase three-level neutral-point-clamped converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, **33**(3): 2559–2570
- Wu F, Zhao J. A real-time multiple open-circuit fault diagnosis method in voltage-source-inverter fed vector controlled drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, **31**(2): 1425–1437

- 20 Gou Bin, Pu Jun-Kai, Ge Xing-Lai, Feng Xiao-Yun. A fault diagnosis and fault-Tolerant control method based on state observer for sensor in single-phase PWM rectifiers. *Journal of the China Railway Society*, 2017, **39**(2): 44–51
(苟斌, 蒲俊楷, 葛兴来, 冯晓云. 基于状态观测器的单相整流系统传感器故障诊断与容错控制方法. 铁道学报, 2017, **39**(2): 44–51)
- 21 Yu Bing, Jiang Sheng-Cheng, Wang Gao-Lin, Zhao Wen-Long, Xu Dian-Guo. Fault diagnosis and tolerant control for speed sensors based on state observers in induction motor drives. *Proceedings of the CSEE*, 2012, **32**(18): 123–130
(于冰, 蒋生成, 王高林, 赵文龙, 徐殿国. 基于状态观测器的感应电机速度传感器故障诊断及容错控制. 中国电机工程学报, 2012, **32**(18): 123–130)
- 22 Yang C H, Yang C, Peng T, Yang X Y, Gui W H. A fault-injection strategy for traction drive control systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, **6**(7): 5719–5727



陶宏伟 中南大学自动化学院博士研究生. 2014 年获得中南大学学士学位. 主要研究方向为电力电子系统建模, 故障诊断与容错控制.
E-mail: hongwei.tao@csu.edu.cn

(**TAO Hong-Wei** Ph.D. candidate at the School of Automation, Central South University. He received his bachelor degree from Central South University in 2014. His research interest covers modeling, fault diagnosis and fault tolerant control of power electronic systems.)



彭涛 中南大学自动化学院教授. 2005 年获得中南大学博士学位. 主要研究方向为复杂系统的故障诊断与容错控制.
E-mail: pandtao@csu.edu.cn

(**PENG Tao** Professor at the School of Automation, Central South University. She received her Ph.D. degree from Central South University in 2005. Her research interest covers fault diagnosis and fault tolerant control for complex systems.)



杨超 中南大学自动化学院博士研究生. 2014 年获得重庆科技学院学士学位. 主要研究方向为牵引传动控制系统的故障诊断与健康监测. 本文通信作者.
E-mail: chaoyang@csu.edu.cn

(**YANG Chao** Ph.D. candidate at the School of Automation, Central South University. He received his bachelor degree from Chongqing University of Science and Technology in 2014. His research interest covers fault diagnosis and healthy monitoring of traction drive control systems. Corresponding author of this paper.)



陈志文 中南大学自动化学院讲师. 2016 年获得德国杜伊斯堡 – 埃森大学博士学位. 主要研究方向为基于模型和数据驱动的故障诊断技术.
E-mail: zhiwen.chen@csu.edu.cn

(**CHEN Zhi-Wen** Lecturer at the School of Automation, Central South University. He received his Ph.D. degree from University of Duisburg-Essen, Germany in 2016. His research interest covers model-based and data-based fault diagnosis.)



桂卫华 中国工程院院士, 中南大学自动化学院教授. 1981 年获得中南矿冶学院硕士学位. 主要研究方向为复杂工业过程建模, 优化与控制应用, 故障诊断与分布式鲁棒控制.
E-mail: gwh@csu.edu.cn

(**GUI Wei-Hua** Academician of the Chinese Academy of Engineering, and professor at the School of Automation, Central South University. He received his master degree from Central South Institute of Mining and Metallurgy in 1981. His research interest covers complex industrial process modeling, optimization and control applications, fault diagnosis, and distribute robust control.)

(**GUI Wei-Hua** Academician of the Chinese Academy of Engineering, and professor at the School of Automation, Central South University. He received his master degree from Central South Institute of Mining and Metallurgy in 1981. His research interest covers complex industrial process modeling, optimization and control applications, fault diagnosis, and distribute robust control.)