文章编号:1671-4598(2019)08-0001-06　DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2019.08.001　中图分类号:TM464　文献标识码:A

逆变器开关管故障诊断方法综述

王霞霞，陈超波，高　嵩
(西安工业大学 电子信息工程学院，西安　710021)

摘要： 逆变器作为电机驱动系统的核心部分，其安全性和可靠性对电机驱动系统的正常运行甚至整个系统的运行是至关重要的；针对逆变器开关管故障，文中主要从基于解析模型、基于信号处理和基于数据驱动三个方面对现有逆变器开关管开路故障诊断方法进行了综述，具体叙述了各种逆变器故障诊断方法的原理，并从这些方法的应用系统、诊断时间、算法实现难易和可靠性等角度对各种方法进行对比，突出了各自的优缺点；最后探讨了今后逆变器开关管故障诊断方法的研究难点和方向。

关键词： 逆变器；开关管；故障诊断；开路故障

Review of Fault Diagnosis Methods for Switches in Inverter

Wang Xiaxia, Chen Chaobo, Gao Song
(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an　710021, China)

Abstract: The inverter is the core part of the motor drive system, its safety and reliability are crucial to the normal operation of the motor drive system and the whole control system. In view of the fault for switches in inverter, this paper reviews the existing diagnostic method for open-switch faults in inverter based on analytical model, signal processing and data-driven. The principles of each fault diagnosis method are described in detail and these methods are compared from the perspectives of application, diagnosis time, algorithm complexity and reliability, and their advantages and disadvantages are highlighted. Finally, the difficulties and trends of the research on fault diagnosis of inverter are discussed.

Keywords: inverter; switches; fault diagnosis; open-circuit fault

0　引言

随着电力电子技术的飞速发展，利用逆变器供电的电机驱动系统被广泛用于工业、军事、航空等领域。在电机驱动系统中，如果不能检测到逆变器的故障，将直接影响系统的正常工作并带来不可估量的经济损失。因此，进行逆变器故障诊断方法的研究是非常有必要的。

逆变器主电路是由许多开关管组成，逆变器故障大多情况下是由开关管故障引起的。其中 IGBT 故障占很大比重，据统计逆变器故障的 38%为 IGBT 故障[1]。IGBT 故障的类型主要为短路故障和开路故障，短路故障发生时间极短，一般在硬件电路上对其处理[2]，应用较广的是在电路中串联快速熔断器，将 IGBT 短路故障转化成 IGBT 开路故障，然后进行故障诊断。在电机驱动系统中，IGBT 发生开路故障后，电机在短时间还可以正常运行，若长时间不处理故障，其余 IGBT 将会流过很大的电流造成二次故障。

目前，故障诊断的方法可以分为基于解析模型、基于信号处理、基于数据驱动的方法。具体故障分类如图 1 所示。基于解析模型的方法适用于能对被控对象建立数学模型的系统，比较典型的方法有参数估计法、状态估计法、等价空间法，这三种方法两两之间有一定的关系[3-5]。基于信号处理和数据驱动的方法适用于不易建立数学模型，可采集到表征被控对象特征信号的系统。针对逆变器故障，本文同样从这三个大方面对逆变器故障诊断方法进行了综述，具体介绍了各种故障诊断方法的原理，并从不同方面对这些方法进行了对比，最后指出了逆变器故障诊断方法今后的研究方向。

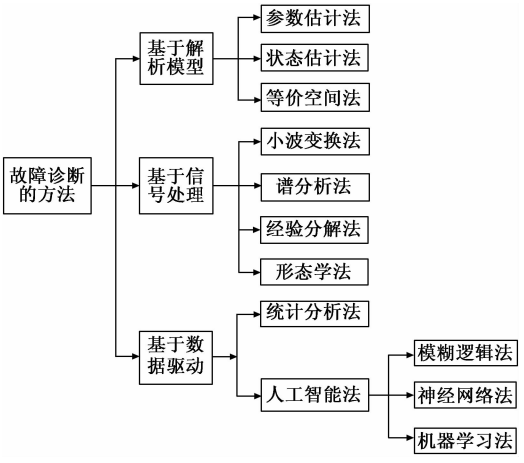

图 1　故障诊断方法的分类

收稿日期: 2019-01-26；　**修回日期:** 2019-02-20。

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”项目(2016YFE0111900)；陕西省教育厅科研计划项目(16JF013)；西安工业大学校长基金(XAGDXJJ18011)。

作者简介: 王霞霞(1993-)，女，陕西延安人，硕士研究生，主要从事智能控制，逆变器故障诊断方向的研究。

陈超波(1978-)，男，浙江宁波人，硕士，教授，主要从事智能控制和故障诊断与容错控制方向的研究。

1 逆变器的拓扑结构

在电机驱动系统中，逆变器的结构如图 2 所示，逆变器由 6 个带反向二极管 $D_1 \sim D_6$ 的 IGBT $T_1 \sim T_6$ 构成，U_{dc} 为直流母线电压，i_a，i_b，i_c 为三相绕组电流，e_a，e_b，e_c 为三相反电动势，R 为定子绕组电阻，L 为定子电感。逆变器将直流电转化成三相交流电，进而给电机供电。

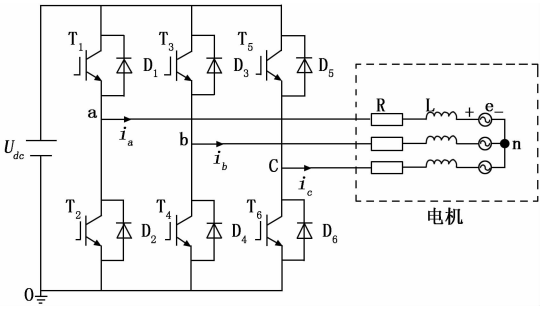

图 2 逆变器的结构

2 基于解析模型的逆变器 IGBT 故障诊断方法

基于解析模型的故障诊断是先对被控对象的运行机理进行分析并建立其数学解析模型，然后根据模型和观测参数构建的残差信号来对故障诊断。基于解析模型的故障诊断原理如图 3 所示，基于解析模型的方法包括残差生成和决策两个步骤。残差生成是用于生成故障信息，决策是确定故障是否发生。

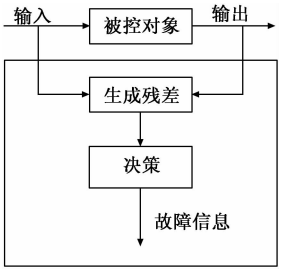

图 3 基于解析模型的故障诊断原理

2.1 观测器法

基于解析模型的故障诊断方法的一个重要步骤就是残差生成，通过设计控制系统的观测器得到观测值与实际系统的测量值比较，即可得故障信号的残差[6-10]。基于观测器的故障诊断原理如图 4 所示。对于逆变器故障，文献［6］通过设计状态观测器得到残差信息与设定的阈值比较诊断逆变器开路故障，但这种方法有一定的局限性，只能诊断单个 IGBT 开路故障。逆变器中也有可能发生两个及两个以上 IGBT 同时开路故障，文献［7］以永磁同步电机系统为研究对象，提出了一种基于 Luenberger 观测器的故障诊断方法，该方法能对多个 IGBT 同时发生开路故障进行诊断，而且采用的是自适应阈值，提高了诊断准确率。到目前为止，逆变器故障诊断常用的观测器有 Luenberger 观测器[7]、卡尔曼滤波器[8]、非线性 PI 观测器[9]、滑模观测器[10]等。由于滑模观测器在设计时考虑了系统的不确定性和干扰因素，可以准确地估计系统的状态变量，应用前景较广。

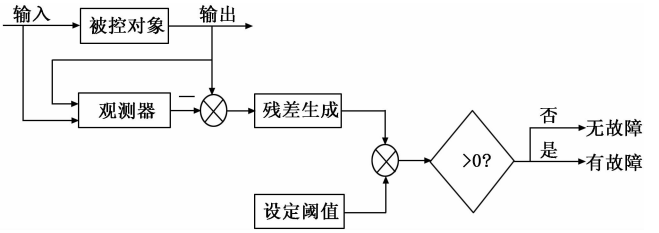

图 4 基于观测器的故障诊断原理

2.2 开关函数模型法

为了描述逆变器开关时的具体状态和快速诊断故障，开关函数模型法应运而生[11-12]。该方法是假定开关管为理想开关且不考虑同相两个开关管之间的开关死区建立逆变器正常工作时 IGBT 的电压与开关函数之间的关系为：

$$\left.\begin{aligned} u_{T1} &= (1-s_a)U_{dc} \\ u_{T2} &= s_a U_{dc} \\ u_{T3} &= (1-s_b)U_{dc} \\ u_{T4} &= s_b U_{dc} \\ u_{T5} &= (1-s_c)U_{dc} \\ u_{T6} &= s_c U_{dc} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中，u_{T1}，u_{T2}，u_{T3}，u_{T4}，u_{T5}，u_{T6} 为 IGBT 集电极－发射极之间的电压，s_a，s_b，s_c 为三相 IGBT 的开关函数，其含义为：

$$\left.\begin{aligned} s_{a,b,c} &= 1 \quad \text{上管导通，下管关断} \\ s_{a,b,c} &= 0 \quad \text{上管关断，下管导通} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

通过分析 IGBT 实际承受的电压与式（1）计算的理论电压值比较判断 IGBT 是否发生开路故障。文献［12］通过建立逆变器和整流器的开关函数模型，并分析故障状态下逆变器直流侧电流和整流器交流侧电流进行故障诊断。但开关函数模型诊断故障时需要高速光耦或比较器且没有考虑同相 IGBT 之间的开关死区，容易造成误诊断。

2.3 混合逻辑动态模型法

基于开关函数模型的逆变器故障诊断方法在描述逆变器开关动作状态时，未考虑同相两个 IGBT 之间的开关死区，这样就不能对逆变器进行完全描述，影响故障诊断的准确性[13-14]。为了解决这一问题，研究者研究了基于混合逻辑动态模型的逆变器故障诊断方法。文献［14］提出了基于滑模观测器和混合逻辑动态模型相结合的逆变器故障诊断方法。

混合逻辑动态模型是利用系统中离散变量和连续变量建立的模型，一般表达形式为：

$$\left.\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + B_1 u(t) + B_2 \delta(t) + B_3 z(t) \\ y(t) &= Cx(t) + D_1 u(t) + D_2(t)\delta(t) + D_3(t) z(t) \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中，$x=(x_c, x_d)^T$ 为状态变量且 x_c 为连续变量，x_d 为离散变量；$u(t)$ 为输入变量；$y(t)$ 为输出变量；δ，z 分别为辅助逻辑变量和辅助连续变量；A，$B_1 \sim B_3$，C，$D_1 \sim D_3$ 分别为系数矩阵。

在电机驱动系统中，混合逻辑动态模型是利用开关信

号和电流建立模型，其具体表达式为：

$$\dot{i} = \boldsymbol{A}i + \boldsymbol{B}_1 e + \boldsymbol{B}_2 \delta \tag{4}$$

式中，$i=[i_a, i_b, i_c]^T$ 为状态向量；$\delta=[\delta_1, \delta_2, \delta_3]^T$ 为开关信号（辅助逻辑变量）；$e=[e_a, e_b, e_c]^T$ 为三相反电动势；$\boldsymbol{A}$ 为状态系数矩阵；$\boldsymbol{B}_1$ 为连续输入系数矩阵；$\boldsymbol{B}_2$ 为离散输入系数矩阵。在传统的混合逻辑动态模型建立时，利用的连续变量为电流信号，由于电流易受负载扰动的影响，可靠性较低。今后可考虑利用连续变量电压与离散变量开关信号来建立模型，这样一来可提高诊断准确率。

2.4　图论法

随着计算机技术的发展，产生了基于图论的故障诊断方法，该方法先分析系统内部结构，把系统模型转化为图，然后利用计算机对图分析进行故障诊断。文献［15］提出了一种有向图论的故障诊断方法。文献［16］提出了一种键合图的逆变器开路故障诊断方法。这两种方法可解决过分依赖精确数学模型的模型故障诊断问题，是今后研究的热点。

为了对这几种方法的优劣进行分析，分别从模型检测量、诊断所需时间、应用系统（开环/闭环）、实现难易、受负载和噪声等干扰程度这几方面进行对比（见表 1）。基于解析模型的逆变器 IGBT 故障诊断方法诊断速度快，定位准确度高，诊断技术比较成熟，实际应用比较广，但它过分依赖于精确的数学模型，一旦研究对象的结构发生变化就需重新建模。

表 1　基于解析模型的逆变器 IGBT 故障方法对比

诊断方法	模型检测量	诊断时间（大约）	应用系统	实现难易	受负载和噪声等干扰程度
观测器法	电流/电压	16.5ms[6]	任何系统	一般	中等
开关函数模型法	无	———	任何系统	一般	中等
混合逻辑动态模型法	电流	1/8 基波周期[13]	任何系统	一般	一般
图论法	无	1/2 个周期[16]	任何系统	中等	一般

3　基于信号处理的逆变器 IGBT 故障诊断方法

基于信号处理的故障诊断是利用各种信号处理方法对系统输入输出信号的测量值进行分析处理，并提取故障特征信息。在逆变器开关管故障诊断中，基于信号处理的方法是根据采集到的电压电流信号来分析它们的均值、谐波、频率、幅值等关键信息，进而提取故障特征[17]。

3.1　归一化直流法

对逆变器 IGBT 开路故障进行诊断时，设定阈值的不当会引起负载突变情况下误诊断。为解决这个问题，文献［18］提出了基于离散傅里叶变换的归一化方法，此方法首先利用离散傅里叶变换得到定子电流的直流分量和基波幅值，再利用基波幅值将直流分量进行归一化处理，然后根据归一化后直流分量的大小进行故障诊断。归一化直流量的计算公式为：

$$d_i = \frac{I_{i(av)}}{\sqrt{a_{i,1}^2 + b_{i,1}^2}} (i = a,b,c) \tag{5}$$

其中：

$$I_{i(av)} = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} i_i(n) (i = a,b,c) \tag{6}$$

$$a_{i,k} = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} i_i(n)\cos(\frac{2\pi kn}{N}) (i = a,b,c) \tag{7}$$

$$b_{i,k} = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} i_i(n)\sin(\frac{2\pi kn}{N}) (i = a,b,c) \tag{8}$$

进行归一化处理后，要准确定位故障的位置，归一化直流量需要与故障阈值 1 进行比较，两者之间具体关系为：

$$f_{1,j} = \begin{cases} 1 & d_i > 0 \text{ 表示第 } j \text{ 相的下管开路故障} \\ 0 & d_i \leqslant 0 \text{ 表示第 } j \text{ 相的上管开路故障} \end{cases} (j = a,b,c) \tag{9}$$

$$f_{2,j} = \begin{cases} 1 & \max(|d_i|) > 1 \text{ 表示第 } j \text{ 相发生故障} \\ 0 & \max(|d_i|) \leqslant 1 \text{ 表示没有发生故障} \end{cases} (j = a,b,c) \tag{10}$$

诊断时具体的故障位置情况如表 2 所示。

表 2　归一化直流法开关管故障定位

开关管	$f_{2,a}$	$f_{2,b}$	$f_{2,c}$	$f_{1,a}$	$f_{1,b}$	$f_{1,c}$
T_1	1	—	—	0	—	—
T_2	1	—	—	1	—	—
T_3	—	1	—	—	0	—
T_4	—	1	—	—	1	—
T_5	—	—	1	—	—	0
T_6	—	—	1	—	—	1

3.2　小波变换法

小波变换将采集到的信号在多尺度下分解为既包含频域信息又包含时域信息的小波变换系数，这样可对故障特征信息充分提取。文献［19］研究了一种将小波变换与 Concordia 变换相结合的逆变器故障特征提取的方法。文献［20］将采集的相电流进行小波包分解，提取故障特征量，从而诊断 IGBT 短路故障和开路故障。

3.3　小波神经网络法

小波神经网络法先是利用小波变换提取故障信息，然后用神经网络对特征信息学习并训练，从而对故障诊断和定位。文献［21］先对三相电流小波变换，然后将变换得到的小波系数输入到神经网络里进行逆变器故障诊断，仿真表明这种方法诊断故障的准确率较高。

3.4　小波模糊法

这一方法利用小波分析逆变器三相电流的直流偏移量和突变情况，当检测到电流发生突变时，将直流偏移量输入到模糊逻辑系统中，通过直流偏移量的变化来检测和定

位逆变器开关管开路故障，一般应用于速度模糊闭环 V/F 控制的感应电机驱动系统中。在逆变器 IGBT 开路故障研究中，小波变换还可以与其他算法结合进行故障诊断，文献［23］中提出了小波变换和核主元分析相结合的逆变器故障诊断方法。

3.5 谱分析法

谱分析法[24]主要是将采集信号中的各种频率成分进行分解，对故障信息进行特征提取。针对逆变器 IGBT 开路故障，文献［24］通过对逆变器正常、单个开关管开路故障、单相开路故障三种状态下的母线电流进行频谱分析，进而根据母线电流所包含的低频成分来诊断故障但不能定位故障。文献［25］研究了频谱分析与其它方法相结合的故障诊断方法。

3.6 电流检测法

3.6.1 电流矢量轨迹斜率法

电流矢量轨迹斜率法[26]是在 Concordia 变换的基础上进行的，Concordia 变换公式为：

$$\left.\begin{aligned} i_\alpha &= \sqrt{\frac{2}{3}}\left(i_a - \frac{1}{2}i_b - \frac{1}{2}i_c\right) \\ i_\beta &= \sqrt{\frac{2}{3}}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}i_b - \frac{\sqrt{3}}{2}i_c\right) \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

对电流进行周期采样，将电流矢量轨迹的斜率定义为：

$$\psi = \frac{i_{\alpha_k} - i_{\alpha_{k-1}}}{i_{\beta_k} - i_{\beta_{k-1}}} \tag{12}$$

其中：k，$k-1$ 为当前时刻和上一时刻。在无故障时，电流矢量轨迹为一个圆且 Ψ 是不断变化的。当发生故障时，电流矢量轨迹就变成不同的半圆。根据轨迹和斜率的变化进行逆变器 IGBT 开路故障检测与定位。

3.6.2 电流矢量瞬时频率法

电流矢量瞬时频率法是利用变换过电流的瞬时频率来检测故障，电流矢量瞬时频率的估算公式为：

$$f_i = \frac{1}{2\pi}\frac{\mathrm{d}\theta_s}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{2\pi T}\frac{1}{i_k i_{k-1}}\left(i_{\beta_k} i_{\alpha_{k-1}} - i_{\beta_{k-1}} i_{\alpha_k}\right) \tag{13}$$

其中：

$$i_k = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \tag{14}$$

通过分析可得发生故障时 f_i 为零，因此可通过 f_i 是否小于阈值（f_i 的最小值）判断 IGBT 是否发生故障。这种方法相对于电流矢量轨迹斜率法来说比较容易实现，但它不能定位故障。

3.6.3 平均电流 Park 矢量法

平均电流 Park 矢量法[27]首先要对三相电流进行 Park 变换，变换后的表达式为：

$$\left.\begin{aligned} I_\alpha &= I_a \\ I_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_b - I_c) \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

然后计算变换后电流在一个周期内的平均值：

$$\left.\begin{aligned} I_{\alpha(av)} &= \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} i_v(n) \\ I_{\beta(av)} &= \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} i_v(n) \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

这样就可得到电流一个周期内平均值的模和相位为：

$$\left.\begin{aligned} I &= \sqrt{I_{\alpha(av)}^2 + I_{\beta(av)}^2} \\ \angle\theta &= \arctan\left(\frac{I_{\beta(av)}}{I_{\alpha(av)}}\right) \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

当 IGBT 正常工作时，I 为零。当 IGBT 发生开路故障时，平均电流 Park 矢量的模和相位会发生变化，根据模和相位的变化来检测和定位故障。

电流检测法除了以上几种外，文献［28］利用电流矢量轨迹半径的变化来诊断单个 IGBT 故障。文献［29］中将一个周期内的负载电流均值和它的绝对值均值相结合诊断多个 IGBT 开路故障。为了对这几种方法的优劣进行分析，分别从信号检测量、诊断所需时间及诊断效果、应用系统（开环/闭环）、实现难易、受负载和噪声等干扰程度这几方面进行对比（见表 3）。基于信号处理的方法无需建立被控对象的数学模型，其中利用电流信号进行故障诊断时需要的额外硬件电路较少，但诊断速度慢，易受负载变化的影响。利用电压信号进行故障诊断时诊断速度快，但硬件电路复杂。

表 3 基于信号处理的逆变器 IGBT 故障方法对比

诊断方法	信号检测量	诊断时间及诊断效果	应用系统	实现难易	受负载和噪声等干扰程度
归一化直流法	电流	18.4ms[18]	开环	中等	中等
小波变换法	电流	故障检测率达 99%[19]	开环	高度	中等
小波神经网络法	电流/电压	故障诊断误差率<5%[21]	开环	高度	中等
小波模糊法	电流	5 基波周期[22]	闭环	高度	一般
谱分析法	电流	>1 基波周期[24]	开环	高度	中等
电流矢量轨迹斜率法	电流	———	开环	一般	高度
电流矢量瞬时频率法	电流	———	开环	一般	高度
平均电流 Park 矢量法	电流	———	开环	中等	高度

4 基于数据驱动的逆变器 IGBT 故障诊断方法

4.1 基于统计分析法

对于逆变器故障，基于统计分析法主要是利用核主元分析对故障诊断。核主元分析先借助核函数来进行非线性变换，再将采集的原始数据映射到高维线性特征空间用主元分析提取线性特征。核主元分析需对大量的数据进行处理，计算量大。文献［30］研究了一种基于改进核主元成分分析的故障诊断方法。此方法在核主元分析法的基础上增加灵敏度分析，并对故障特征加权处理，消除了不同量纲和噪声对数据的影响，但该方法工作量大。在今后的研究中，应考虑先对某一特定的故障信号如故障发生后电流的直流分量进行频域分析，然后再与核主元分析结合进行

故障检测，这样可以减少工作量。

4.2　基于人工智能法

4.2.1　模糊逻辑法

模糊逻辑法利用概率集合论的隶属度函数和模糊逻辑规则来对重叠的故障特征信息进行分离，提高诊断准确性。文献［31］将正常工作和故障状态下的平均电流矢量轨迹直径之差 E_d 和表示电流矢量相位区间的整数 I_θ 输入到模块逻辑库中，然后利用模糊逻辑规则诊断故障。由于模糊逻辑的推理易受到环境和参数变化的影响，所以用模糊逻辑诊断故障的有效性比较差。

4.2.2　神经网络法

基于神经网络的故障诊断方法是通过对历史数据进行在线训练得到合适的网络结构和参数，然后对故障进行诊断。文献［32－33］研究了自适应 BP 神经网络与 FFT 相结合的故障诊断方法。该方法对输出的电压进行 FFT，然后将变换结果的前 40 项作为自适应 BP 神经网络的输入，神经网络的输出就是故障的分类。

4.2.3　自适应神经模糊推理法

文献［34－35］提出了基于聚类自适应神经模糊推理法来进行逆变器故障诊断，后者首先将输出的三相电流变换到 d－q 轴上，分析在故障状态下 d－q 相电流轨迹的特征信息并用聚类算法分类。聚类算法降低了系统的维数，模糊推理具有较强的辨别能力，降低维数后缩短了神经网络的训练时间。该方法克服了由负载变引起的扰动问题，但算法复杂。

4.2.4　机器学习法

基于机器学习的故障诊断，文献［36］对 IGBT 开路后的输出电压进行离散小波变换和矩阵奇异值分解来提取故障的特征值，然后在利用支持向量机进行诊断故障。文献［37］在深度学习的基础上提出了基于栈式稀疏自动编码器的逆变器开路故障的诊断方法。

基于数据驱动的方法无需立被控对象的数学模型，对历史数据分析处理就可以进行故障诊断，但需要对大量的样本进行训练，进行故障特征的提取，计算量大。现从样本检测量、诊断时间、应用系统、实现难易、受负载和噪声等干扰程度这几个方面进行分析和对比（见表 4）。基于数据驱动的这几种方法计算量大且故障诊断所耗费的时间长。

表 4　基于数据驱动的逆变器 IGBT 故障方法对比

诊断方法	样本检测量	诊断时间（大约）	应用系统	实现难易	受负载和噪声等干扰程度
统计分析法	电流/电压	———	开环	高度	中等
模糊逻辑法	电流	＞1 基波周期[31]	开环	中等	中等
神经网络法	电流/电压	———	开环	高度	中等
自适应神经模糊推理法	电流	＞1 基波周期[35]	开环	高度	中等
机器学习法	电流	———	开环	高度	一般

5　结语

本文主要对现有针对逆变器 IGBT 开路故障诊断的方法进行综述，并详细介绍了逆变器故障诊断方法的原理，并对这些方法在几个方面进行了对比。在前人的基础上，今后值得关注的逆变器开关管故障诊断研究方向如下：

1）从目前的研究现状可知，逆变器故障诊断的方法有各自的优点和局限性，如何利用各种诊断方法的优点，将提取的不同故障类型、不同来源的故障信号进行有机结合进行故障诊断。

2）基于电流信号的诊断方法往往依赖于控制策略，易受负载突变的影响，在开环系统中有较好的可靠性，但在闭环系统的可靠性较弱。基于电压信号的故障诊断方法虽不受负载突变的影响且在闭环系统有较高的可靠性，但基于电压信号的方法普适性不高。如何提高基于电流信号的诊断方法在闭环系统中可靠性以及基于电压信号的诊断方法的普适性是逆变器故障诊断方法研究的难点；

3）对于逆变器故障问题，只是对故障的检测和定位方法进行研究，在故障发生的一定时间里如何保证系统仍然可以正常工作，也就是容错控制的研究。针对逆变器开关管故障，对容错策略的研究将是今后的研究热点；

4）目前对故障预测方面的研究还处于崛起阶段，逆变器的故障预测可以通过对历史数据分析处理来对开关管的寿命和故障变化的趋势等进行预测，这样就可以在故障的早期阶段排除故障。

参考文献：

［1］Lu B. A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters［J］. IEEE Transactions on Industry Applications，2008，45（5）：1770－1777.

［2］杨欣荣，蒋　林，王婧林，等. 基于小波变换的无刷直流电机逆变器故障诊断［J］. 电测与仪表，2017，54（5）：113－118.

［3］Magni J F，Mouyon P. On residual generation by observer and parity space approaches［J］. IEEE Transactions on Automatic Control，1994，39（2）：441－447.

［4］赵学智，叶邦彦，陈统坚. 基于 SVD 的奇异性信号检测原理及其应用［J］. 振动与冲击，2008，27（6）：11－14.

［5］Mehra R K，Peshon I. An innovations approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems［J］. Automatica，1971，7：637－640.

［6］Campos－Delgado D U，Espinoza－Trejo D R. An observer－based diagnosis scheme for single and simultaneous open－switch faults in induction motor drives［J］. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2011，58（2）：671－679.

［7］Jlassi I，Estima J O，Khil S K E，et al. Multiple open－circuit faults diagnosis in back－to－back converters of PMSG drives

for wind turbine systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (5): 2689 - 2702.

[8] Park B G, Jang J S, Kim T S. EKF-based fault diagnosis for open phase faults of PMSM drives [A]. Power Electronics and Motion Control Conference IEEE 6th International [C]. Wuhan: IEEE, 2009: 418 - 422.

[9] Espinoza-Trejo D R, Campos-Delgado D U, Barcenas E. Robust fault diagnosis scheme for open circuit faults in voltage source inverters feeding induction motors by using nonlinear proportional integral observers [J]. IET Power Electron, 2012, 5 (7): 1204 - 1216.

[10] 柏同杨，汪 飞，吴春华，等. 基于滑模观测器的 MMC IGBT 开路故障诊断 [J]. 电子测量技术，2017，40 (11)：44 - 47.

[11] 安群涛，孙 力，赵 克，等. 基于开关函数模型的逆变器开路故障诊断方法 [J]. 中国电机工程学报，2010，30 (6)：1 - 6.

[12] 侯新国，卜乐平，邵 英. 带变频驱动系统的感应电机故障诊断研究 [J]. 电机与控制学报，2011，15 (8)：23 - 28.

[13] 葛兴来，苟 斌，蒲俊楷，等. 基于混合逻辑动态模型的逆变器开路故障诊断 [J]. 铁道学报，2016，38 (8)：35 - 40.

[14] 张晓光，李正熙. 无电压传感器逆变器开路故障诊断方法 [J]. 电机与控制学报，2016，20 (4)：84 - 92.

[15] 丘东元，彭锦凤，张 波. 电力电子变换器结构性故障的有向图论诊断方法 [J]. 电机与控制学报，2010，14 (8)：13 - 18.

[16] 胡轲珽，刘志刚，胡冉冉，等. 一种新型基于模型的动车组牵引逆变器开路故障诊断方法 [J]. 铁道学报，2018，40 (2)：31 - 38.

[17] Ren L, Xu Z Y, Yan X Q. Single-sensor incipient fault detection [J]. IEEE Sensors J, 2011, 11 (9): 278 - 287.

[18] Rothenhagen K, Fuchs F W. Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in voltage source active rectifiers [A]. International Power Electronics Specialists Conference [C]. Aachen, Germany: IEEE, 2004: 4348 - 4354.

[19] 崔 江，王 强，龚春英. 结合小波与 Concordia 变换的逆变器功率管故障诊断技术研究 [J]. 中国电机工程学报，2015，35 (12)：3110 - 3116.

[20] 甘 醇，吴建华，杨仕友. 基于小波包能量分析的开关磁阻电机功率变换器故障诊断 [J]. 中国电机工程学报，2014，34 (9)：1415 - 1422.

[21] Charfi F, Sellami F, Al-Haddad K. Fault diagnosis in power system using wavelet transforms and neural networks [A]. 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics [C]. Montreal, Quebec, Canada, 2006: 1143 - 1148.

[22] Mamat M R, Rizon M, Khanniche M S, Fault detection of 3-phase VSI using wavelet - fuzzy algorithm [J]. American Journal of Applied Sciences, 2006: 1642 - 1648.

[23] 杨晓冬，王崇林，史丽萍. H 桥逆变器 IGBT 开路故障诊断方法研究 [J]. 电机与控制学报，2014，18 (5)：112 - 118.

[24] 杨忠林，吴正国，李 辉. 基于直流侧电流检测的逆变器开路故障诊断方法 [J]. 中国电机工程学报，2008，28 (27)：18 - 22.

[25] Kamel T, Biletskiy Y, Cheng L C. Real-time diagnosis for open-circuited and unbalance faults in electronic converters connected to residential wind systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (3): 1781 - 1792.

[26] Peuget R, Courtine S, Rognon J P. Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge based model [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1998, 34 (6): 1318 - 1325.

[27] Mendes A M S, Cardoso A J M. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives by the average current Park's vector approach [A]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference [C]. Madison, USA: 1999: 704 - 706.

[28] Choi U M, Jeong H G, Lee K B, et al. Method for detecting an open-switch fault in a grid-connected NPC inverter system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (6): 2726 - 2739.

[29] Estima J, Cardoso A J M. A new approach for real-time multiple open-circuit fault diagnosis in voltage source inverters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47 (6): 2487 - 2494.

[30] Lin M, Li Y H, Qu L, et al. Fault detection of a proposed three-level inverter based on a weighted kernel principal component analysis [J]. Journal of Power Electronics, 2016, 16 (1): 182 - 189.

[31] Zidani F, Diallo D, Benbouzid M E H, et al. A fuzzy-based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed PWM inverter induction motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (2): 586 - 593.

[32] Khomfoi S, et al. Fault diagnostic system for a multilevel inverter using a neural network [J]. IEEE Trans Power Electronics, 2007, 22 (3): 1062 - 1069.

[33] Babu B P, Srinivas J V S, Vikranth B, et al. Fault diagnosis in multi-level inverter system using adaptive back propagation neural network [A]. IEEE Conference & Exhibition on Control, Communication and Automation [C]. 2008: 494 - 498.

[34] Kamel T, Biletskiy Y, Chang L C. Fault diagnosis and on-line monitoring for grid-connected single-phase inverters [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 126: 68 - 77.

[35] Park J H, Kim D H, Kim S S, et al. C-ANFIS based fault diagnosis for voltage-fed PWM motor drive system [A]. Annual Conference of the NorthAmerican Fuzzy Information Processing Society [C]. Banff, Alta, Canada, 2004: 379 - 383.

[36] 胡志坤，王美铃，桂卫华，等. 基于支持向量机的时序周波波形分类方法 [J]. 浙江大学学报 (工学版)，2010，44 (7)：1327 - 1332.

[37] 尹桥宣，段 斌，沈梦君，等. 模块化五电平逆变器子模块开路故障的智能诊断方法 [J]. 电力系统自动化，2018，42 (12)：127 - 133.