

车用 IGBT 模块健康管理技术综述

牛 刚, 刘 峥, 余旭涛

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 面向车用 IGBT 模块健康管理技术, 分别从失效机理、状态监测、故障诊断、寿命预测四个方面综述国内外的研究进展, 提出当前研究中存在的关键问题和技术优缺点, 在此基础上, 对车用 IGBT 模块健康管理技术今后的发展趋势做出展望。

关键词: 车用 IGBT 模块; 失效机理; 状态监测; 故障诊断; 寿命预测

中图分类号: TM464, U270. 7

文献标志码: A

Review on Health Management Technology of Vehicle IGBT Module

NIU Gang, LIU Zheng, YU Xutao

(Institute of Rail Transit (IRT), Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The research progress of health management technology for vehicle IGBT module was reviewed from four aspects: failure mechanism, condition monitoring, fault diagnosis, damage assessment and life prediction. The key problems and technical advantages and disadvantages of the current research were pointed out. Moreover, the future development trend of health management technology for vehicle IGBT module was prospected.

Key words: vehicle IGBT module; failure mechanism; condition monitoring; fault diagnosis; fault prognosis

绝缘栅双极型晶体管(IGBT)同时具备双极功率晶体管以及 MOSFET 功率晶体管的优点, 是电力能源变换与传输的核心器件, 俗称电力电子装置的“CPU”。以车辆系统为例, IGBT 是轨道车辆牵引变流器和各种辅助变流器的主流电力电子器件, 也成为电动汽车逆变器的首选装置, 用以实现电动汽车加速时的电流输出, 以及制动能量回馈时的电流

输入。车载 IGBT 工作时会承受较大的功率波动以及频繁工况变化所带来的累积疲劳损伤。据可靠统计^[1], 约有 38% 的功率变流器系统故障源于 IGBT 的失效。因此, 本文以车辆系统为应用对象, 总结梳理国内外车用大功率 IGBT 模块健康管理 (PHM) 技术的发展状况。

1 IGBT 模块典型失效机理研究现状

按照失效机理、状态监测、故障诊断、寿命预测四部分对进行综述, 文章的结构如图 1 所示。

典型焊接式 IGBT 模块结构图如图 2 所示, 从上至下依次是芯片层、芯片焊料层、DBC 层、DBC 焊料层、铜基板、以及散热器。在此结构基础上, 车用 IGBT 模块通常并联多个芯片以增强模块负载电流的能力。在运行过程中, 模块会经历功率循环、温度循环, 模块内部承受电、热、机械应力的交互作用, 产生疲劳损伤, 逐渐老化失效, 或在过应力作用下发生瞬态失效。

目前研究普遍按失效部位将 IGBT 模块失效分为芯片级失效和封装级失效, 详细的分类如图 3 所示, 对应机理分析综述于表 1。

归纳国内外 IGBT 模块失效机理相关文献可知, 键合线脱落是 IGBT 模块实际应用中最普遍的失效模式, 也是大部分退化形式下模块的最终故障形式, 因此是失效机理研究的热点。现有研究大多针对键合线脱落和焊料层老化机理, 对于芯片级失效机理研究不够深入, 尤其是大功率 IGBT 模块多芯片失效耦合作用的研究仍很少。IGBT 模块失效前往往经历了性能的退化。一般而言, 芯片失效往往是瞬时失效, 较难通过相应参数表征其退化的情况。但由于栅极氧化层受外界影响后会对芯片产生影响, 甚至导致芯片失效, 因此可以通过栅极漏电流

收稿日期: 2021-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(51575396); 上海市多网多模式轨道交通协同创新中心项目

第一作者: 牛刚(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为车辆智能维护与健康管理。

E-mail: gniu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

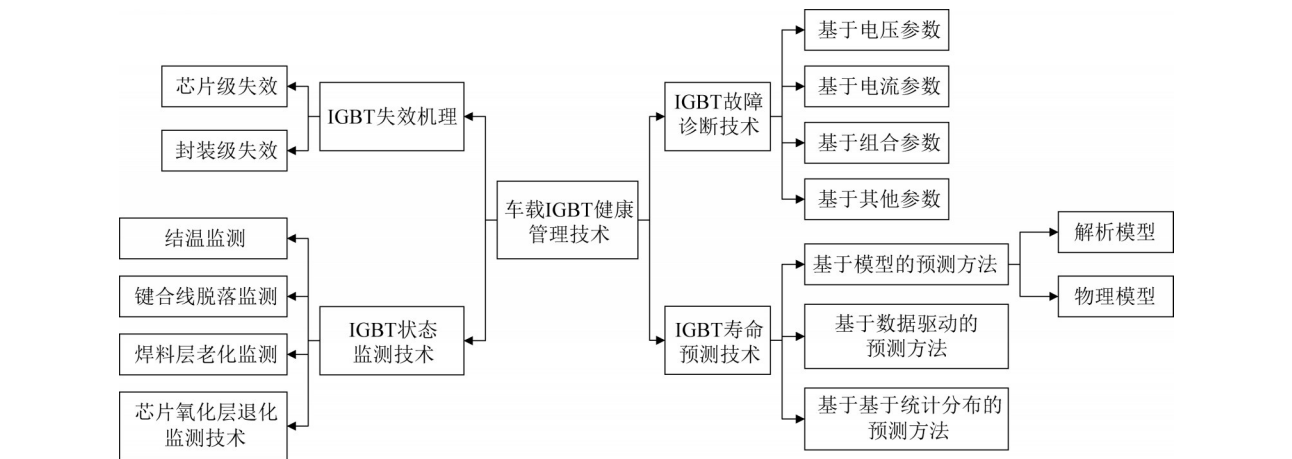


图 1 车用 IGBT 模块健康管理技术框架

Fig.1 Technical framework for health management of vehicle IGBT modul

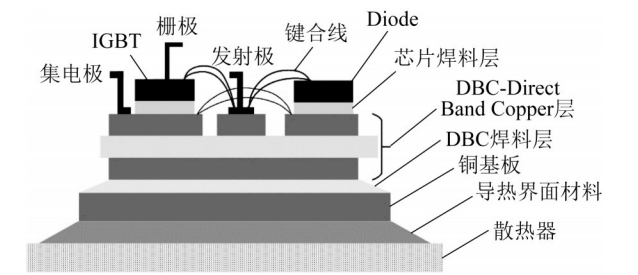


图 2 焊接式 IGBT 模块结构图

Fig.2 Structure diagram of welded IGBT module

2 IGBT 模块状态监测技术研究现状

状态监测是指利用各种分析检测方法,直接或间接提取能够有效表征对象系统运行状态的参数,通过参数的变化追踪监测对象系统状态的变化。按照监测对象,本文将 IGBT 模块状态监测手段划分为以下四种:结温监测,键合线脱落监测,焊料层老化监测以及芯片氧化层退化监测。根据参阅文献将各种监测手段以及其特点总结如表 2 所示。

3 IGBT 模块故障诊断技术研究现状

车载大功率 IGBT 主要用于车辆变流装置如整流器和逆变器等,每个装置由多个 IGBT 组成。根据在车辆运行过程中的故障类型可以将 IGBT 故障分为突变故障和老化故障,老化故障由于过程缓慢,发生之后不会对系统造成太大的影响,因此该类故障的处理方法主要是对老化特征因子进行提取,从

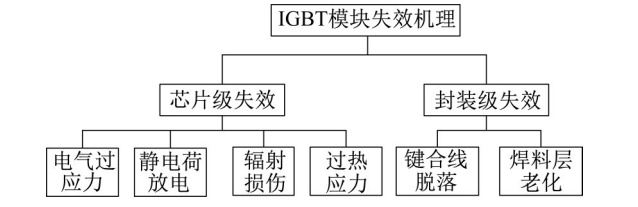


图 3 IGBT 模块失效分类

Fig.3 IGBT module failure classification

和栅极阈值电压两种表征参数,通过表征 IGBT 栅极氧化层的退化情况,进而表征芯片的退化情况。

表 1 IGBT 模块失效机理分析
Tab.1 Failure mechanism analysis of IGBT module

失效位置		失效原因	失效机理	失效影响
芯片级失效	芯片	过电流	电流脉冲失效 短路安全工作区超限 静态擎住效应	升温,热损伤,最终烧毁(开路)
		过电压	栅极氧化层退化击穿 动态擎住效应	绝缘退化,阈值电压漂移, 栅极控制失效
		静电荷放电	人体放电 集电极栅极毛刺间放电 邻近强带电体栅极感应放电	局部栅极氧化层击穿,热损伤
		辐射损伤	高能宇宙粒子碰撞	升温、热损伤(开路)
		疲劳	热膨胀系数差异,键合点应变	键合线脱落(开路)
封装级失效	键合线	线间电磁力	线间电磁力促进脱落	键合线脱落(开路)
	焊料层	疲劳	热膨胀系数差异,结合面裂纹	焊料层老化,热阻增大, 散热受阻,烧毁(开路)

表 2 各类 IGBT 模块监测参数手段及其优缺点

Tab.2 Monitoring parameter means of various IGBT modules and their advantages and disadvantages

监测对象及手段		测量参数	优点	缺点
结温监测	红外探测法	结温	检测结果准确	破坏封装、不适合在线监测
	热传感器法	结温	简单易实现	破坏封装、检测精度差、只能测量单点温度、不适合在线测量
	模型分析法	温度曲线	对封装无破坏性、精度较高	对模型的精度要求高、需要不断更新参数,计算较慢,不适合实时监测
	稳态电参数法 ^[2-4]	短路电流、小电流注入饱和压、大电流饱和压降、栅极电流峰值	可实现在线监测 监测参数与温度线性度较好	各种热敏参数受工况影响,同时受到键合线脱落影响
	瞬态电参数法 ^[5-7]	栅极阈值电压、集电极电流变化率、米勒平台电压、开通/关断延迟时间、平带电压、关断时间、寄生电感电压峰值	可实现在线监测 无需电流注入	获取瞬态参数对硬件的要求较高,增加了成本;热敏参数受工况和键合线脱落影响
	参数组合法 ^[8-9]	电流下降时间、寄生电感电压峰值	可实现在线监测 监测精度高 通过某些参数组合可避免 工况对监测参数的影响	热敏参数受工况和键合线脱落影响
键合线脱落监测	稳态电参数 ^[10-12]	饱和压降、模块跨导、等效通态电阻、短路电流	易于测量 对硬件要求不高	须获得结温以修正结温影响,
	瞬态电参数 ^[13]	开关通断时间、电压	可实现在线监测	须修正结温影响,对传感器的精度要求高
焊料层老化监测	温度参数 ^[14-15]	壳温分布、变流器输出五次谐波	一般不需额外硬件,降低检测成本	一般用表面温度代替内部温度,精度低,且实时性差
	热阻参数 ^[16]	降温曲线	通过建立热网络模型对瞬时热阻进行监测,可实现准在线测量	对模型精度要求高
芯片氧化层退化监测				由于芯片失效大多为瞬态,且变化微弱,因此需要的监测精度高,该方法正在起步阶段

而判断其健康状态,对寿命进行预测,与该内容相关的技术在 2.4 节进行综述。而突变故障发生之后如若不能及时进行检测和诊断,并采取被动或主动容错控制,将会对整个系统造成严重损害。

通常来说,突变故障又分为短路故障和开路故障。IGBT 模块雪崩、过热、过压击穿等都会导致短路故障,短路故障具有很强的破坏力,一般通过短路保护电路来避免短路故障造成的巨大危害;而开路故障主要是由于焊接脱落、电路失效、器件破裂或者短路故障导致,开路故障发生后短期内并不会对系统造成较大损害,可以持续工作一段时间,但是在工作状况恶劣的情况下,将会造成灾难性二次故障。

3.1 基于电流参数

采用电流参数,配合信号处理方法,可对故障特征进行提取。当 IGBT 发生开路故障时,IGBT 对应信号分析技术方面,由于当故障发生时,未故障相的定子电流会有相应的畸变,其谐波含量也会随之增加,因此可以通过时频分析方法提取瞬时频率,从而对开路故障进行检测。文献^[21]提出了一种基于定子电流的 Hilbert-Huang 变换 (HHT) IGBT 开路故障检测方法,通过计算经过 CEEMDAN 分解得

因此可以通过对故障特征的有效提取以及对故障位置的定位和故障模式的隔离,有效地减轻故障的危害,保证系统的良好运行。

近几年有学者针对 IGBT 的故障诊断技术进行了追踪调研,从基于电流和基于电压两个方向^[17]、定性和定量两个角度^[18]、从基于模型、基于数据以及基于信号处理三个角度^[19]以及比较监督和非监督类型算法^[20]展开了逆变器开关管的故障诊断技术综述。

在此基础上,本文从工程应用角度出发,综合最新几年的车载 IGBT 故障诊断技术,将 IGBT 故障诊断所需信号种类以及其优缺点总结成表格 3 如下:

相的电流只有半个周期,且其余相的电流存在一定程度的畸变。以两电平逆变器 T1 故障为例,当 T1 发生开路故障前后,其仿真电流波形如图 4 所示。到的 IMF 的 RMS (均方根) 选择对应的 IMF,进而对该 IMF 信号进行希尔伯特包络谱分析得到故障的瞬时频率,但该方法并未提及多管故障。

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \text{IMF}^2(t) dt}$$

(1)

当故障发生时,电流信号所含的能量发生瞬间

表 3 故障诊断各类方法所需模型、参数以及其优缺点		
Tab.3 Models, parameters, advantages and disadvantages of various fault diagnosis methods		
信号种类	优点	缺点
电流信号	获取方便 闭环系统中,获取信号不需添加任何传感器 故障诊断可选择的方法多	开环系统中,分析电流信号诊断故障会导致结果精度低不稳定
电压信号	适用于开环系统 具有更好的稳定性	部分系统并未拥有采集电压的相关设备
组合信号	综合电流信号和电压信号各自的优点 准确性更高	对硬件的要求更高,需要同时具有电流传感器和电压传感器
其他信号	瞬时功率、行为残差、磁链残差等作为故障特征 参数为故障诊断提供了多种可能	应用不成熟,且大都未考虑多管故障

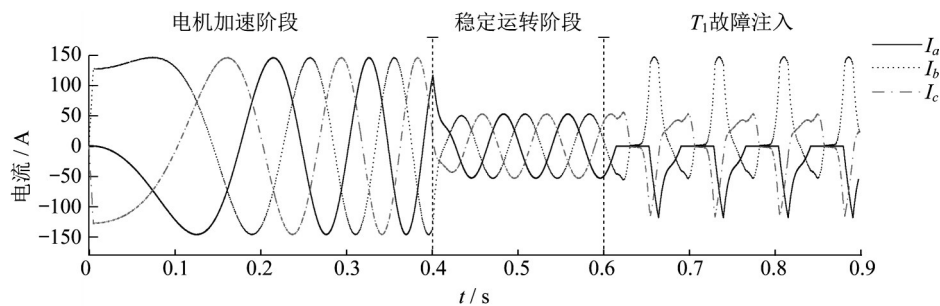


图 4 IGBT(T1)故障前后电流对比

Fig4 Comparison diagram of currents before and after IGBT (T1) fault

变化,因此也可以通过计算对应的熵值或者谱峭度方法,对变化的瞬态信号进行检测。文献^[22]等针对 CRH3 型动车组整流器单管故障和双管故障,采用改进谱峭度方法并结合电流均值法对整流器发出的固定脉冲响应实现故障诊断,改进的谱峭度如公式 2 计算得到。

$$K_x(f)=\frac{E\left\{\left(\sum_{i=0}^L|C_x(t,f)|\right)^4\right\}}{\left[E\left\{\left(\sum_{i=0}^L|C_x(t,f)|\right)^2\right\}\right]^2}-2 \quad (2)$$

通过不同故障特征的提取,采用数据驱动的方法,通过对神经网络或是分类器进行训练,最终得到的模型可以对不同故障进行分类,实现故障有效诊断。文献^[23]基于三相变流器输出的电流信号,提出一种基于集成的随机分类器来识别三相 PWM 变换器中的 IGBT 开路故障。除此之外,Kou Lei^[24]等人通过分析三相脉冲整流器的开路故障,提出了一种基于电流暂态综合特征的深度前反馈神经网络的诊断和定位方法。

基于模型方法上也同样用于车用 IGBT 的故障诊断中,主要是采用电流残差作为分析信号。变流器系统是由连续和离散变化的事件组成,其特征满

足混杂系统的条件。混杂系统建模方法之一即为基于混合逻辑动态模型(MLD)模型,该方法考虑到了系统的控制、电压和电流条件,因此基于 MLD 建模的方法被应用到诊断中。文献^[25]研究了一种基于观测器误差和电流平均值的自适应阈值方法。考虑到暂态模式和稳态模式,利用产生的残差的演化及其相应的阈值来检测故障的发生。然后,利用电流和将 IGBT 故障与电流传感器故障区分开来,通过电流平均值实现 IGBT 故障隔离,具体的技术路线图如图 5 所示。

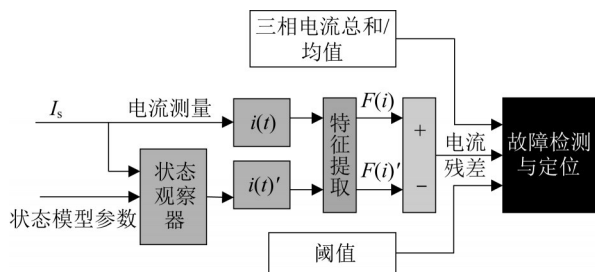


图 5 基于观测器电流残差的故障诊断技术的框图

Fig.5 Block diagram of fault diagnosis technology based on observer current residual

除了电流残差作为故障特征之外,由于发生开路故障后,三相电流的波形会发生有规律且明显的变化(对应相电流半个周期变为零),因此基于模型

的电流轨迹方法也用于诊断中。文献^[26]提出一种基于电流形状因子残差的 IGBT 开路故障诊断方法,通过定义自适应阈值进行诊断。另外,文献^[27]对模型故障下的相电流轨迹进行分析,以零故障相电流为故障特征,通过对故障后的电流表达式进行积分,根据积分符号实现故障的定位,利用此方法在不同控制策略下依托半实物仿真平台进行了验证。

3.2 基于电压参数

对于方便提取电压的变流装置而言,将电压作为故障特征参数可以得到更加稳定和精确的诊断结果。在基于数据的诊断方法中,有文献^[28]利用主成分分析(PPCA)和支持向量机(SVM)进行诊断。且当电平数增多时,故障的种类、故障数据的维度等也会随之增加,一般的分类算法无法较快的对故障进行分类诊断,通过分析开路故障前后的电压等级的变化,文献^[29]采用基于傅里叶变换对数据进行预处理,并通过主元分析将数据中的特征降维,最后基于贝叶斯网络的方法对七电平逆变器的 IGBT 开路故障进行诊断,并采用对变载波和调制波的电压进行重构容错。

在基于模型方面,文献^[30]提出了一种基于电压偏差的平均模型诊断方法,该方法通过建立的模型分别得到线电压和相电压的估计值,分别与观测到的真实值计算残差,进而得到故障特征值,可以对单管开路的 IGBT 和电流传感器故障进行诊断。针对于电压、电流均可采样的三相逆变器,文献^[41]提出将逆变器桥臂电压作为故障特征,利用平均模型法分别得到三线制和四线制的逆变器的诊断变量,结合误差自适应的阈值方法,得到鲁棒性强的单管、双管故障诊断规则。文献^[31]通过建立换流器开关函数模型,利用三相电压残差作为故障特征,实现了单桥臂 IGBT 开路和双桥臂 IGBT 开路故障的在线诊断,并进行了实验验证了方法的抗干扰性,上下桥臂电压残差的阈值如公式 3 和 4 所示。

$$\text{上桥臂: } \Delta u_k > 0.5U_{dc} \quad (3)$$

$$\text{下桥臂: } \Delta u_k > -0.5U_{dc} \quad (4)$$

3.3 基于组合参数

除了单独利用电流和电压参数之外,还可以利用电流和电压组合参数对故障进行诊断。例如,文献^[32]使用高速列车和工业驱动中可获取的开关指令信号、接触网电流和直流链路电压作为系统参数,基于 MLD 模型输出与实际系统输出的系统参数连续比较结果得到残差,用于 IGBT 故障诊断,非常适合于电力牵引应用。文献^[33]基于级联 H 桥(CHB)多电

平变换器开路 IGBT 检测技术,利用单个电流传感器和单个电压传感器来监测支路的电流和输出电压。将实测电压与期望电压进行比较,并根据偏差的大小和电流流向确定断路故障的位置,但该方法需要加装电流传感器和电压传感器。

归纳上述国内外 IGBT 模块状故障诊断相关文献可知,基于电流的诊断方法获取可以适用于大部分的车用 IGBT 故障诊断,相比之下,基于电压和基于其他或组合参数的诊断方法可以保证有较好的精度;另外多种信号融合技术也会降低诊断的实时性。针对 IGBT 的故障种类逐渐增多、故障诊断的方法趋于成熟和多样化,并且开始考虑故障的容错控制。但是到目前为止,针对于 IGBT 的故障种类大都停留在单管开路和双管开路,目前有效的多元信号融合诊断、有效的故障容错方法以及故障的演化传递特性的研究极少。

3.4 基于其他参数

除了将电流和电压作为故障特征参数之外,也有学者尝试将行为残差^[34]、磁链残差^[35]等作为故障特征参数用以诊断相应故障。

4 IGBT 模块寿命预测技术研究现状

在 IGBT 模块寿命预测技术研究方面,一些文献^[36-39]对寿命预测的解析模型和物理模型进行较为详细的介绍和比较,这些文献对于数据驱动的寿命预测方面少有提及。在实际运行过程中,结温是反映 IGBT 工作状态的重要参数,因此对结温进行有效预测,对 IGBT 剩余有用寿命的评估有指导意义。因此从基于模型、数据的角度,从工程应用的角度对当前 IGBT 寿命预测和结温预测技术进行综述,并总结了各类方法的优缺点,如表 4 所示。

4.1 基于模型的方法

基于模型的方法主要包括基于解析模型和基于物理模型。解析模型主要通过老化试验得到的数据进行拟合,将失效次数与相应的变量(如电流、结温等)组合成为相应的寿命方程,该方法仅是数学方面的拟合,没有理论依据做支撑,因此可信度不高,但是方法简单。基于物理模型则是依据材料失效的机理,从应力应变的角度分析,得到相应的寿命方程,由于建立在失效机理基础上,因此该类方法具有更高精度,但也伴随着复杂的建模和计算难度。

表 4 寿命预测各类方法所需模型、参数以及其优缺点

Tab.4 Models, parameters, advantages and disadvantages of various methods for life prediction					
方法分类		常用模型/参数		优点	缺点
基于模型	解析模型	Coffin—Manson 模型、Lesit 模型等		可反映现场的故障率 模型容易获取	难以实时分析 无法反应变量之间的因果关系
	失效物理模型	基于能量的Morrow 模型、基于应力修正的Coffin—Manson 模型等		可预测已知失效机制下的寿命	模型较难获取 无法预测相关缺陷下的寿命 难以评估整个系统
基于数据驱动		集电极—发射极瞬态尖峰电压、导通压降、导通电流等		不需建立模型 可以实现在线预测	前期需要大量数据进行学习 需要选取可靠地老化特征因子 适用性不强

4.1.1 解析模型方法

在汽车 IGBT 寿命预测方面,文献^[40]通过对 IGBT 模块在驱动工况下的工作状态、功率损耗和结温波动的分析以及考虑到汽车行驶速度和道路条件对 IGBT 功率损耗和结温的影响,建立了一种适用于不同工况下的电动汽车 IGBT 模块 Lesit 寿命预测模型,用于预测给定驱动条件下 IGBT 模块的寿命。针对 CRH5 动车组 IGBT 寿命预测问题,文献^[41]采用半实物仿真的方法,通过模拟 CRH5 动车真实工况并结合热模型得到 IGBT 的结温和壳温分别与电流的关系,采用雨流计数法得到波动数据,再利用 Miner 损伤累积理论分析,得到整流器侧 IGBT 累积损伤度小于逆变器侧,加速工况相比制动和匀速工况更能使 IGBT 损伤。

在不同控制策略层面,文献^[42]针对牵引变流器中的 IGBT 寿命预测进行了研究,在电流开环弱磁控制和单电流闭环弱磁控制下进行了仿真验证,并与实际工况相结合,对比不同策略下的 IGBT 寿命损耗情况,发现采用单电流闭环弱磁控制的策略可以使 IGBT 寿命延长。

4.1.2 失效物理模型方法

利用失效物理模型方法进行寿命预测通常是以仿真研究以及验证为主,文献^[43]通过设计不同试验条件下的低结温功率循环试验和仿真,提出了一种基于功率循环试验的功率模块贴片焊料层 PoF 寿命预测方法,发现损伤的增长率与结温和结温平均值成正比,但是该方法只考虑了焊料的疲劳问题。文献^[44]提出一种采用电流变化率来预测结温变化的方法,通过对 IGBT 关断机理和关断过程中的电流温度特性进行研究和理论推导,并利用基于 Saber 仿真平台建立的 IGBT 模型搭建了仿真电路进行验证,得到方法的有效性。

4.2 基于数据驱动方法

数据驱动方法是通过分析加速老化过程中各相关参数的变化,提取出老化特征参数,通过训练模型,将参数与寿命相对应,从而实现寿命的预测。不少文献结合 NASA-ARC 加速寿命试验数据中的集电极发射极关断电压尖峰值参数展开相关的研究。利用集电极-发射极关断电压尖峰值数据,文献^[45]提出了过程神经网络的 IGBT 健康预测方法,文献^[46]提出长短期记忆(LSTM)网络的寿命预测方法,也有文献基于 GARCH 模型建立了 IGBT 老化寿命模型,对 IGBT 剩余寿命进行预测。在结温预测方面,文献^[48]提出了基于温敏参数法的结温预测模型。文献^[49-50]通过改进 SVM 算法,利用饱和压降、集电极电流预测结温。

归纳上述国内外 IGBT 模块寿命预测以及结温预测相关文献可知,大多方法目前停留在仿真和验证方面。虽然越来越多的智能算法如深度学习等被尝试运用到寿命预测中,然而文献大多采用 NASA 的加速寿命实验公开测试数据,存在数据源头单一的情况,且方法的实时性和有效性不能有“突破性的创新和进步”。总体而言,考虑多寿命因子、多工况下、多数据源兼容的寿命预测方法应该是未来努力的方向。

5 总结与展望

5.1 总结

本文面向车用 IGBT 模块健康管理,从失效机理、状态监测、故障诊断以及寿命预测四个方向入手,介绍了现阶段国内外 IGBT 智能运维技术的发展状况。其中失效机理是 IGBT 健康管理的研究基础,状态监测、故障诊断和寿命预测则是研究的最终目的。针对 IGBT 健康管理的技术主要存在以下难

点:首先,在失效机理方面,针对IGBT-二极管芯片耦合作用,尤其大功率IGBT模块内多芯片失效耦合作用的研究很少;其次,在状态监测方面,当前状态监测方法多从单一参量与退化状态的关系入手,且进行了一定的假设,在实际工程应用中,尤其是大功率工况波动的应用具有较大的局限性;第三,在故障诊断层面上,现阶段研究并未考虑故障在更高层系统内的传递影响,除此之外,诊断的实时性和在线诊断的可行性在多数文献中并未体现;最后,在寿命预测阶段,由于受到监测条件的约束,现阶段的预测水平仍停留在基于模型的方法上,基于数据驱动的预测方法所选取的数据也大多源于加速寿命试验,与现实工况相差甚大。

5.2 展望

基于上述存在的问题,对未来的IGBT健康管理技术提出对应展望:首先,在失效机理研究方面,建议进一步通过相关实验研究芯片退化的有效表征参数。考虑到在实际工作中,IGBT的运行工况可能发生突变,该情况可能不会导致其立即失效,但是基于失效机理的相关特征参数退化趋势将会有所改变,因此在失效的研究基础上,应该增加异常工况的模拟;与此同时,状态监测技术的发展应紧密联系失效机理,发展芯片级状态监测技术,寻求非侵入、高精度、实时性好、实用性强的监测方法,同退化表征参数结合,寻求新的、更有效的寿命预测方法;在故障诊断层面上,未来研究应充分考虑计算分析的时效性和准确性,深入研究面向实际应用的定性与定量、实测数据与知识模型混合的诊断方法,进一步开展IGBT模块复合故障诊断方法研究以及多IGBT模块故障隔离方法的研究,尤其是基于模型的故障诊断,阈值的选取应当与系统的各个参数紧密结合,在有效的诊断算法的基础上,寻求故障特征的在线辨识;最后,建议今后深入开展早期微弱渐变退化的预测方法研究,IGBT故障从出现到失效存在渐进不确定性过程,时间长度根据不同类型的故障及动态激励有所不同,开展IGBT定量损伤评估和寿命预测,为开展基于预测的可重构健康优化和主动容错控制做好充分准备。

作者贡献声明:

牛刚:提供研究思路与技术指导以及论文完善工作。

刘峥:提供研究思路,撰写论文。

余旭涛:协助文献整理及校对。

参考文献:

- [1] YANG S, BRYANT A, MAWBY P, *et al.* An industry based survey of reliability in power electronic converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441.
- [2] XU Z X, XU F, WANG F. Junction temperature measurement of IGBTs using short-circuit current as a temperature-sensitive electrical parameter for converter prototype evaluation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3419.
- [3] SINGH A, ANURAG A, ANAND S. Evaluation of Vce at inflection point for monitoring bond wire degradation in discrete packaged IGBTs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 2481.
- [4] 李志刚, 李雄, 张强, 等. SPWM模式下逆变器中IGBT结温的快速评估方法[J]. 高压电技术, 2017, 43(11): 3683.
LI Zhigang, LI Xiong, ZHANG Qiang, *et al.* Rapid assessment method of IGBT junction temperature in inverter under sinusoidal pulse width modulation [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3683.
- [5] STRAUSS B, LINDEMANN A. Measuring the junction temperature of an IGBT using its threshold voltage as a temperature sensitive electrical parameter (TSEP)[C]//IEEE. 2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). Leipzig: IEEE. 2016: 459-467.
- [6] 李武华, 陈玉香, 罗皓泽, 等. 大容量电力电子器件结温提取原理综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3546.
LI Wuhua, CHEN Yuxiang, LUO Haoze, *et al.* Review and prospect of junction temperature extraction principle of high power semiconductor devices [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3546.
- [7] BAKER N, IANNUZZO F. The temperature dependence of the flatband voltage in high-power IGBTs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(7): 5581.
- [8] SHAO L, HU Y, XU G. A high precision on-line detection method for IGBT junction temperature based on stepwise regression algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 186172.
- [9] WANG X, ZHU C, LUO H, *et al.* IGBT junction temperature measurement via combined TSEPs with collector current impact elimination[C]//2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2016: 1.
- [10] 龚灿, 孙鹏菊, 杜雄, 等. 基于键合线压降的IGBT模块内部缺陷监测研究[J]. 电源学报, 2016, 14(6): 153.
GONG Can, SUN Pengju, Du Xiong, *et al.* Research on condition monitoring for defects inside IGBT modules based on voltage drop of bond wires[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(6): 153.
- [11] 李亚萍, 周维维, 孙鹏菊, 等. 基于模块跨导的IGBT键合线健康状态准在线监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 7035.
LI Yaping, ZHOU Luowei, SUN Pengju, *et al.* A quasi-online method monitoring healthy state of bond wires in IGBTs

- based on module transconductance [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 7035.
- [12] 孔梅娟, 李志刚. IGBT 模块通态电阻与键合线故障关系研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(11): 91.
- KONG Meijuan, LI Zhigang. Study on the relationship between the on-resistance and the bonding-wire lift of the IGBT module[J]. Power Electronics, 2017, 51(11): 91.
- [13] 李亚萍, 周维维, 孙鹏菊, 等. 基于特定集电极电流下饱和压降的 IGBT 模块老化失效状态监测方法[J]. 电工技术学报. 2018, 33(14): 3202.
- LI Yaping, ZHOU Luowei, SUN Pengju, *et al.* Condition monitoring for IGBT module aging failure on VCE(on) under certain IC conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society. 2018, 33(14): 3202.
- [14] WANG Ze, TIAN Bo, QIAO Wei, *et al.* Real-time aging monitoring for IGBT modules using case temperature [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1168.
- [15] XIANG D, RAN L, TAVNER P, *et al.* Condition monitoring power module solder fatigue using inverter harmonic identification [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 235.
- [16] 余瑶怡, 杜雄, 张军. 基于热时间常数的 IGBT 模块热疲劳老化监测方法[J]. 电源学报, 2020, 18(1): 18.
- YU Yaoyi, DU Xiong, ZHANG Jun. Thermal fatigue monitoring method for igbt module based on thermal time constants[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(1): 18.
- [17] 安群涛, 孙力, 孙立志, 等. 三相逆变器开关管故障诊断方法研究进展[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 135.
- AN Quntao, SUN Li, SUN Lizhi, *et al.* Recent developments of fault diagnosis methods for switches in three-phase inverters. [J] Transactions Of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 135.
- [18] 宋威, 施伟锋, 卓金宝, 等. 多电平逆变器开关管故障诊断方法综述[J]. 微电机, 2019, 52(10): 110.
- SONG Wei, SHI Weifeng, ZHUO Jinbao, *et al.* Review of fault diagnosis methods for switching tubes of multilevel inverters[J]. Micromotors, 2019, 52(10): 110.
- [19] 王霞霞, 陈超波, 高嵩. 逆变器开关管故障诊断方法综述[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(8): 1.
- WANG Xiaxia, CHEN Chaobo, GAO Song. Review of fault diagnosis methods for switches in inverters [J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(8): 1.
- [20] MOOSAVI S S, KAZEMI A, AKBARI H. A comparison of various open-circuit fault detection methods in the IGBT-based DC/AC inverter used in electric vehicle [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 96: 223.
- [21] CHERIF B D E, BENDIABDELLAH A, TABBAKH M. Diagnosis of an Inverter IGBT Open-circuit Fault by Hilbert-Huang Transform Application [J]. Traitement du Signal, 2019, 36(2): 127.
- [22] 王英, 王丹, 陈小强, 等. 基于改进谱峭度与电流均值的牵引整流器开路故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 112.
- WANG Ying, WANG Dan, CHEN Xiaoqiang, *et al.* Open circuit fault diagnosis methods for traction rectifier based on improved Spectral Kurtosis and current mean value [J]. Electric Power Automation Equipmen, 2020, 40(1): 112.
- [23] XIA Y, GOU B, XU Y. A new ensemble-based classifier for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase PWM converter [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 1.
- [24] KOU L, LIU C, CAI G, *et al.* Fault diagnosis for three-phase PWM rectifier based on deep feedforward network with transient synthetic features [J]. ISA transactions, 2020, 101: 399.
- [25] JLASSI I, ESTIMA J O, EL KHIL S K, *et al.* A robust observer-based method for IGBTs and current sensors fault diagnosis in voltage-source inverters of PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 53(3): 2894.
- [26] YOUSSEF A B, EL KHIL S K, BELKHODJA I S. Open-circuit fault diagnosis and voltage sensor fault tolerant control of a single phase pulsed width modulated rectifier [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2017, 131: 234.
- [27] 成庶, 赵俊栋, 李凯迪, 等. 一种基于相电流轨迹的逆变器开路故障诊断方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(10): 2584.
- CHENG Shu, ZHAO Jundong, LI Kaidi, *et al.* An open-circuit fault diagnosis method for inverter based on phase current trajectory [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(10): 2584.
- [28] KURAKU N V P, HE Y, ALI M. Fault Diagnosis of Open Circuit Multiple IGBT's using PPCA-SVM in Single Phase Five-Level Voltage Controlled H-Bridge MLI [J]. IEEE Journal of Industry Applications, 2020, 9(1): 61.
- [29] 刘卓, 王天真, 汤天浩, 等. 一种多电平逆变器故障诊断与容错控制策略[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(5): 229.
- LIU Zhuo, WANG Tianzhen, TANG Tianhao, *et al.* A fault diagnosis and fault-tolerant control strategy for multilevel inverter [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2017, 47(5): 229.
- [30] LI Z, WHEELER P, WATSON A, *et al.* A fast diagnosis method for both IGBT faults and current sensor faults in grid-tied three-phase inverters with two current sensors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(5): 5267.
- [31] 靖永志, 廖珍贞, 龚倩文, 等. VSC-HVDC 送端换流器 IGBT 开路故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(3): 104.
- JING Yongzhi, LIAO Zhenzhen, GONG Qianwen, *et al.* IGBT open-circuit fault diagnosis for VSC-HVDC rectifier [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(3): 104.
- [32] GOU B, GE X, WANG S, *et al.* An open-switch fault diagnosis method for single-phase PWM rectifier using a model-based approach in high-speed railway electrical traction drive system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(5): 3816.

- [33] LAMB J, MIRAFZAL B. Open-circuit IGBT fault detection and location isolation for cascaded multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4846.
- [34] 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.
HU Keting, LIU ZhiGang, HU Ranran, *et al.* A novel model based diagnosis for open-circuit fault in electric multiple unit traction inverter[J]. Journal of the China railway society, 2018, 40(2): 31.
- [35] 王亚飞. 基于磁链观测器的逆变器开路故障实时诊断[J]. 电气化铁道, 2018, 29(5): 81.
WANG Yafei. Flux observer based inverter for real time diagnosis of open circuit fault [J]. Electric Railway, 2018, 29(5): 81.
- [36] 方鑫, 周维维, 姚丹, 等. IGBT 模块寿命预测模型综述[J]. 电源学报, 2014(3): 14.
FANG Xin, ZHOU Luowei, YAO Dan, *et al.* An overview of IGBT Life Prediction Models [J]. Journal of power supply, 2014(3): 14.
- [37] 张树冰, 刘雪婷. 功率模块 IGBT 失效机理与寿命预测研究综述[J]. 电气开关, 2017, 55(5): 19.
ZHANG Shubing, LIU Xueting. A review of failure mechanism and life prediction of IGBT power models [J]. Electric Switchgear, 2017, 55(5): 19.
- [38] HANIF Abu, YU Yuechuan, DEVOTO Douglas, *et al.* A comprehensive review toward the state-of-the-art in failure and lifetime predictions of power electronic devices [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(5): 4729.
- [39] 王彬, 曹琳. 轨道交通用 IGBT 器件寿命预测技术综述[J]. 机车电传动, 2020(1): 9.
WANG Bin, CAO Lin. IGBT module lifetime prediction technology for rail transit [J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(1): 9.
- [40] LI Lingling, WANG Pengchong, WANG Chingsin. Lifetime prediction model for electric vehicle IGBT modules under driving conditions [J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2018, 41(4): 308.
- [41] 曹琳, 叶娜, 李萍, 等. 半实物仿真技术在轨道交通用 IGBT 寿命预测中的应用[J]. 机车电传动, 2019(5): 59.
CAO Lin, YE Na, LI Ping, *et al.* Application of hardware-in-the-loop simulation technology in life prediction of IGBT module for rail transit [J]. Electric Drive For Locomotives, 2019(5): 59.
- [42] 林帅, 方晓春, 林飞, 等. 基于任务剖面的牵引逆变器 IGBT 寿命预测[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(S1): 52.
- LIN Shuai, FANG Xiaochun, LIN Fei, *et al.* Mission profiles-based lifetime prediction for IGBT modules in traction inverter application[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(S1): 52.
- [43] LAI Wei, CHEN Minyou, RAN Li, *et al.* Study on lifetime prediction considering fatigue accumulative effect for die-attach solder layer in an IGBT module [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(4): 613.
- [44] 郝巧红, 马文华. 基于电流变化率的 IGBT 结温预测方法研究[J]. 电气传动, 2018, 48(10): 85.
HE Qiaohong, Ma Wenhua. Research on IGBT junction temperature prediction method based on change rate of current [J]. Electric Drive, 2018, 48(10): 85.
- [45] CHEN B, LU G, FANG H, *et al.* IGBT neural network prediction method of radar transmitter based on levenberg-marquard optimization [J]. International Journal of Future Generation Communication and Networking, 2016, 9(9): 1.
- [46] 史业照, 郭斌, 郑永军. 基于 LSTM 网络的 IGBT 寿命预测研究 [J/OL]. [2022-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20200810.1312.006.html>.
SHI Yezhao, GUO Bin, ZHENG Yongjun. Research on IGBT life prediction based on LSTM network [J/OL]. [2022-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20200810.1312.006.html>.
- [47] 白梁军, 黄萌, 饶臻, 等. 基于 GARCH 模型的 IGBT 寿命预测[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5787.
BAI Liangjun, HUANG Meng, RAO Zhen, *et al.* Lifetime prediction of IGBT based on GARCH Model [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5787.
- [48] 姚芳, 胡洋, 李铮, 等. IGBT 模块结温预测 BP 神经网络模型[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2017, 47(3): 367.
YAO Fang, HU Yang, LI Zheng, *et al.* The research on the BP neural network model of junction temperature of IGBT modules [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2017, 47(3): 367.
- [49] 刘伯颖, 胡佳程, 李玲玲, 等. IGBT 老化状态下基于 BAS-SVM 模型的结温预测方法 [J/OL]. [2020-08-15]. <https://doi.org/10.13911/j.cnki.1004-3365.190577>.
LIU Boying, HU Jiacheng, LI Lingling, *et al.* Junction temperature prediction method on BAS-SVM model in aging state of IGBT [J/OL]. [2020-08-15]. <https://doi.org/10.13911/j.cnki.1004-3365.190577>.
- [50] WANG Zhengping, LI Guoyi, TSENG Minglang, *et al.* Distributed systematic grid-connected inverter using IGBT junction temperature predictive control method: an optimization approach [J]. Symmetry, 2020, 12(5): 825.