DOI:10.14188/j.1671-8844.2026.0002
文章编号:1671-8844(2026)09-1528-10

考虑焊料层耦合老化效应的IGBT模块寿命预测模型

程睿[1,2],何怡刚[1,2],迟永宁[3],黄阮明[4]

(1. 武汉大学电网环境保护全国重点实验室,湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学电气与自动化学院,湖北 武汉 430072;
3. 中国电力科学研究院有限公司,北京 100192; 4. 国网上海市电力公司,上海 200122)

摘要: 现有针对绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor,IGBT)器件的可靠性研究大多忽略了不同焊料层疲劳失效对模块热阻的影响导致寿命评估结果偏离实际。为此,提出了一种考虑不同焊料层老化耦合效应的IGBT模块寿命评估模型。首先,在建立IGBT模块有限元模型的基础上,分析不同焊料层对模块瞬态热阻的影响;其次,对辨识瞬态热阻抗曲线参数后所得的Foster热网络模型进行验证;然后,在此基础上结合Coffin-Manson-Arrhenius寿命模型与Miner线性累积损伤准则,构建计及双焊料层疲劳累积的迭代预测流程;最后,在光伏逆变器实际运行工况下对IGBT模块进行寿命评估,并与已有寿命预测方法进行比较分析。对比结果表明,所提模型能有效刻画不同焊料层的耦合效应,显著提升IGBT模块寿命预测的准确性与工程适用性,可为可靠性评估与维护策略制定提供量化依据。

关键词: IGBT模块;寿命预测;焊料层老化耦合;瞬态热阻;热网络模型
中图分类号: TM 46　**文献标志码:** A

A lifetime prediction model for IGBT modules considering the coupling aging effect of solder layers

CHENG Rui[1,2], HE Yigang[1,2], CHI Yongning[3], HUANG Ruanming[4]

(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
4. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: Most of the existing reliability studies on insulated gate bipolar transistor (IGBT) devices ignore the impact of fatigue failure of different solder layers on the thermal resistance of the module, resulting in deviations of the lifetime assessment results from the actual conditions. Therefore, this paper proposes a lifetime assessment model for IGBT modules considering the coupling effect of different solder layer aging. Firstly, based on the establishment of the finite element model of the IGBT module, the influence of different solder layers on the transient thermal resistance of the module is analyzed. Secondly, the Foster thermal network

收稿日期: 2026-01-04
作者简介: 程睿(2001-),女,硕士研究生,主要从事电气设备在线监测与状态评估研究,E-mail: 2020302191374@whu.edu.cn。
通信作者: 何怡刚(1966-),男,教授,博士生导师,主要从事电力设备故障诊断及状态评估研究,E-mail: yghe1221@whu.edu.cn。
基金项目: 智能电网重大专项(2030)(编号:2024ZD0801300)。

本文引用格式: 程睿,何怡刚,迟永宁,等.考虑焊料层耦合老化效应的IGBT模块寿命预测模型[J].武汉大学学报(工学版),2026,59(9):1528-1537.

Citation: CHENG Rui, HE Yigang, CHI Yongning, et al. A lifetime prediction model for IGBT modules considering the coupling aging effect of solder layers[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2026, 59(9): 1528-1537.

model, obtained after identifying the parameters of the transient thermal impedance curve, is verified. Then, on this basis, an iterative prediction process considering the fatigue accumulation of the dual solder layers is constructed by combining the Coffin-Manson-Arrhenius lifetime model with the Miner linear cumulative damage criterion. Finally, the lifetime of the IGBT module is evaluated under the actual operating conditions of the photovoltaic inverter, and a comparative analysis with the existing lifetime prediction methods is conducted. The comparison results indicate that the proposed model can effectively characterize the aging coupling effect of different solder layers, significantly improve the accuracy and engineering applicability of IGBT module lifetime prediction, and provide quantitative basis for reliability assessment and maintenance strategy formulation.

Key words: IGBT module; lifetime prediction; solder layer aging coupling; transient thermal impedance; thermal network model

在电力电子系统中，变流装置是广泛应用于电能转换与控制的设备。其中，绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor，IGBT)作为变流器中的核心部件，担负着能源传输与功率变换的重要职能[1]。然而，IGBT在实际运行中面临较高的失效风险，相关统计指出，IGBT故障约占变流器系统总故障的40%[2-4]。其原因在于，IGBT功率模块在实际运行中产生的功率损耗会导致逆变器内部及周边环境温度升高，进而降低其运行可靠性。因此，IGBT模块的可靠性问题已成为制约电力电子系统稳定可靠运行的核心问题之一。

IGBT模块中各层材料的热膨胀系数存在差异[5]，当芯片工作产生的热量使模块承受热载荷时，各层材料承受的热应力不同，产生的形变量也不同。这种热失配现象会导致焊料层等机械强度较弱区域产生裂纹等形变，进而引发模块性能逐步退化。研究表明，通常当焊料层失效到一定程度时，键合线才会发生失效[6]。当结温的波动幅度不太剧烈(如波动范围为80 K)时，键合线不会出现明显退化，但焊料层内部的热阻明显增大[7-8]，这种情况下焊料层更易疲劳老化，器件失效主要是由热阻增大引起。因此，在IGBT模块寿命评估中计入焊料层疲劳失效，对于揭示其老化机制具有重要意义。

焊接型IGBT模块包含2个焊料层，分别为芯片焊料层和直接覆铜基板(direct bonded copper，DBC)焊料层，目前已有许多针对焊料层失效展开的研究。文献[9]提出一种基于焊料层空洞分布统计特征的老化状态评估方法，用于预测电力机车IGBT模块的剩余寿命。文献[10]针对柔性直流输电换流阀中使用的IGBT模块，在功率循环工况下开展了多物理场耦合仿真分析，计算单个功率周期内焊料层所产生的累积非弹性应变，进而对模块的寿命进行预测。文献[11]提出一种基于IGBT动态损耗计算的焊料层多物理场耦合失效的分析方法，通过有限元模型求解得到电-热-机械多场耦合失效的分析结果。然而，这些研究仅考虑了IGBT模块中的芯片焊料层，未考虑DBC焊料层。在变流器运行过程中，IGBT的热源自芯片向下传递，先后流经芯片焊料层和DBC焊料层，二者既是电气连接层，也是整个模块的散热通道，因此，开展计入DBC焊料层疲劳失效的相关研究极为重要，国内外许多学者已针对该问题展开研究。文献[12]表明，整体焊料层损伤时IGBT模块的结温最高；在个别焊料层损伤的情况下，芯片焊料层损坏时的结温高于DBC焊料层损坏时的结温，故实际应用过程中DBC焊料层损伤不容忽视。文献[13]建立了一种以瞬态热阻为基础的状态监测与故障定位方法，定量分析了芯片焊料层与DBC焊料层各自失效对器件整体可靠性的影响程度。文献[14]构建了一种考虑焊料层疲劳损伤累积的IGBT模块寿命预测模型，综合考量了焊料层故障位置差异及其疲劳退化所引起的热特性变化对寿命评估的影响，但未考虑2个焊料层同时老化对寿命评估的影响。

为更贴近工程实际并准确反映焊料层疲劳对IGBT使用寿命的影响，本文构建了一种新的寿命评估模型，该模型着重考虑了2个焊料层在老化过程中的相互耦合作用。

1　IGBT模块结构及瞬态热阻测量

1.1　IGBT模块结构

焊接型IGBT模块的封装结构一般由7层材料与键合线堆叠组成，相邻材料各不相同，结构如图1所示。自下而上分别为：铜基板、DBC焊料层、DBC层(下铜层、陶瓷层、上铜层)、芯片焊料层、芯片、键合线。相较于其他相邻层，2个焊料层与其周围相邻层之间的热膨胀系数差异更为显著；在长期复杂工况下，热机械应力不断累积，导致焊料层产生空

洞、裂纹,其热阻随之增大,热阻增大使热应力进一步上升,最终导致IGBT模块热疲劳失效。

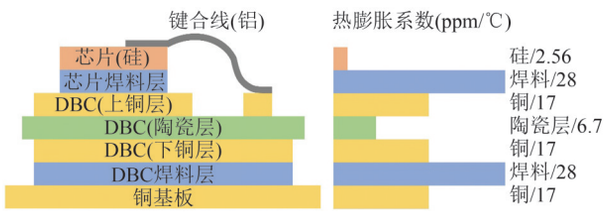


图1 IGBT模块结构

Fig.1 Structure of the IGBT module

为实现电气绝缘并保护芯片免受环境应力与机械损伤,芯片上部覆有绝缘硅胶材料,因此芯片产生的热量主要通过下方焊料层等路径进行传导。基于传热学基本原理,IGBT模块内部的热量传输过程可通过以下公式表征[15]:

$$\rho c_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t}=\nabla(\lambda\nabla T)+q_{\mathrm{v}} \tag{1}$$

式中:ρ为材料密度,kg/m^3;c_{p}为材料的定压比热容,J/(kg·K);T为温度,K;t为时间,s;λ为材料导热系数,W/(m·K);q_{v}为芯片单位体积内的热源强度,W/m^3;∇为空间微分算子。

由此可见,模块的封装结构、材料属性及其层间界面完整性共同决定了其热传导路径与最终的热性能。对上述多层结构的热分析是评估模块散热能力、预测其工作结温的基础。然而,这种基于物理结构和材料参数的分析,主要描述的是模块在恒定功率下的稳态或静态热特性。为了全面评估模块在实际动态工况下的热可靠性,必须进一步研究其瞬态热响应特性。

1.2 热阻理论

焊料层退化会显著影响器件的热阻特性,而热阻参数可有效表征这一变化。作为评价电子器件封装性能的关键参数之一,热阻在热特性分析中常被用作主要评估依据。因此,在研究焊料层疲劳失效问题时,开展IGBT模块热阻抗研究不可或缺。

根据JESD51-1标准,在进行结壳热阻测试时,需确保IGBT模块封装基板温度维持恒定;此时,IGBT模块的结-壳瞬态热阻抗Z_{th}可通过下式计算[16]:

$$Z_{\mathrm{th}}(t)=\frac{T_{\mathrm{j}}(t)-T_{\mathrm{c}}}{P} \tag{2}$$

式中:$Z_{\mathrm{th}}(t)$为t时刻IGBT模块的结-壳瞬态热阻抗,K/W;$T_{\mathrm{j}}(t)$为t时刻IGBT芯片的结温,K;T_{c}为固定壳温,K;P为施加于IGBT芯片的恒定阶跃功率损耗,W。在实际应用中很难保持模块的壳温稳定,但该方法可用于仿真中对IGBT模块瞬态热阻的测量。

对于材料均匀、形状规则的物体,其导热系数与热阻之间的关系可通过热传导的基本定律推导得出。对于一维稳态热传导,傅里叶定律为

$$q=-kA\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \tag{3}$$

式中:q为热流量,W;k为该模块的导热系数,W/(m·K);A为垂直于热流方向的横截面积,m^2;x为沿热流方向的空间坐标,m;dT/dx为温度梯度,K/m。式中的负号表示热量沿温度降低的方向传递。

模块的热阻R定义为温度差与热流量的比值:

$$R=\frac{\Delta T}{q} \tag{4}$$

式中:R为模块的热阻,K/W;ΔT为热传导方向两端的温差,K。

对于厚度为L、横截面积为A的模块,若导热系数k为常数,温度梯度均匀,则有:

$$q=kA\frac{\Delta T}{L} \tag{5}$$

式中:L为模块沿热流方向的厚度,m。

将式(5)代入式(4)可得:

$$R=\frac{L}{kA} \tag{6}$$

焊料层疲劳失效的形式包括裂纹、空洞等,其最终均表现为焊料层热阻增大。因此,在后续仿真中可通过改变焊料层的导热系数k来模拟焊料层的不同老化程度。

2 基于瞬态热阻的焊料层失效仿真分析

2.1 IGBT模块的有限元模型

本文选用SEMIKRON公司的SKM50GB12T4模块作为研究对象,根据文献[17]中的尺寸数据,在COMSOL Multiphysics仿真软件中构建IGBT模块的有限元模型,如图2和图3所示。本文对模型做了部分简化:由于仅研究焊料层失效,所以忽略了键合线的建模;同时基于模块的对称性,仅建立了一侧的三维模型。模块具体尺寸及材料相关属性见表1和表2。

为验证有限元仿真的准确性与科学性,本文对健康条件下的IGBT模块设置边界条件,监测模块的热阻抗,并查看其与数据手册是否对应。本文设

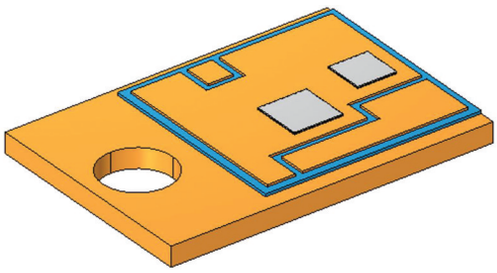


图 2　IGBT模块的有限元模型

Fig.2　Finite element model of the IGBT module

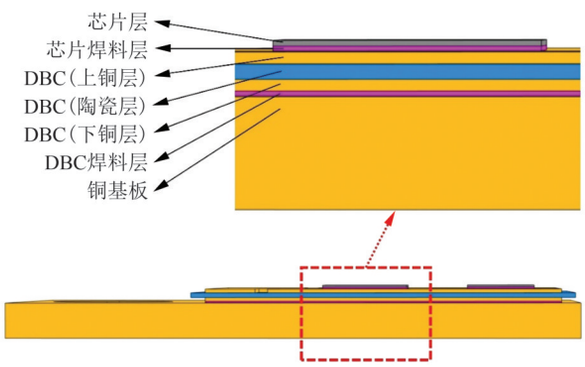


图 3　IGBT模块有限元模型的具体结构

Fig.3　Specific structure of the finite element model of the IGBT module

表 1　IGBT模块物理尺寸

Table 1　Physical dimensions of the IGBT module

结构	材料	长/mm	宽/mm	高/mm
二极管芯片	Silicon	5.55	5.55	0.15
IGBT芯片	Silicon	6.90	6.90	0.15
二极管芯片焊料层	96.5Sn3.5Ag	5.55	5.55	0.12
IGBT芯片焊料层	96.5Sn3.5Ag	6.90	6.90	0.12
DBC(上铜层)	Cu	28.50	25.80	0.30
DBC(陶瓷层)	Al_2O_3	30.65	28.00	0.38
DBC(下铜层)	Cu	28.50	25.80	0.30
DBC焊料层	96.5Sn3.5Ag	28.50	25.80	0.12
铜基板	Cu	91.40	31.40	2.80

表 2　材料属性

Table 2　Properties of materials

材料	密度/(kg·m^{-3})	导热系数/(W·$(m·K)^{-1}$)	常压热容/(J·$(kg·K)^{-1}$)
Silicon	2 329	124	700
96.5Sn3.5Ag	7 300	35	226
Cu	8 960	380	390
Al_2O_3	3 780	15	830

置IGBT芯片功率损耗为50 W，底板温度为25 ℃，所得IGBT模块热阻抗曲线如图4所示。

由图4可知，健康状态下该模块热阻抗最终稳定值为0.531 85 K/W，与数据手册给出的0.53 K/W相比，误差仅有0.349%，验证了该有限元建模的科学性和合理性。

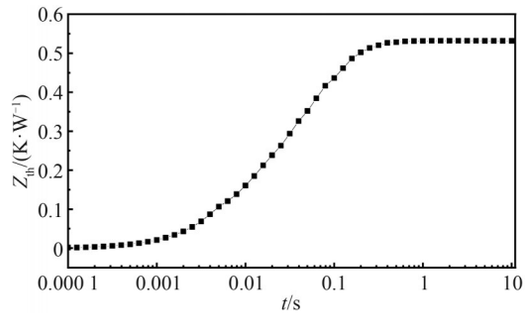


图 4　健康状态下IGBT模块的瞬态热阻抗曲线

Fig.4　Transient thermal impedance curve of the IGBT module in a healthy state

2.2　不同焊料层老化对瞬态热阻抗的影响

为有效模拟焊料层在长期服役过程中的性能退化，并对其老化状态进行直观量化，本文定义了基于材料导热系数变化的老化程度指标。由1.2节可知，在固定几何尺寸时，焊料层的热阻R完全由其固有属性导热系数k决定，初始未老化状态下的导热系数记为k_0。焊料层的老化过程，如微观裂纹萌生、界面空洞增长及金属间化合物粗化等均会显著降低材料的有效导热系数，本文定义焊料层老化程度η为导热系数的相对衰减率：

$$\eta \equiv \frac{k_0 - k_{\text{aged}}}{k_0} = 1 - \frac{k_{\text{aged}}}{k_0} \tag{7}$$

式中：k_0为健康状态下的导热系数，取35 W/(m·K)；k_{aged}为老化后焊料层的导热系数；$0 \leqslant \eta \leqslant 1$。

本文通过改变焊料层的导热系数模拟不同焊料层的失效程度。仿真过程中，IGBT器件保持恒定导通，二极管保持关断，芯片的热损耗功率设置为50 W，底板温度恒定为25 ℃。首先，本文设置DBC焊料层的老化程度η_2为0，即始终处于健康状态，分析芯片焊料层不同老化程度对IGBT模块热阻抗的影响。本文分别设置芯片焊料层老化程度为0、20%、40%、60%、80%，结果如图5所示。图中η_1为芯片焊料层的老化程度。

由图5可知，IGBT模块的瞬态热阻抗曲线从0 s即开始分离，且随着芯片焊料层老化程度的增大，模块稳定后的热阻抗呈非线性增长，老化越严重，热阻抗增长速度越快。

保持边界条件不变，本文设置η_1为0，即始终处于健康状态，分析DBC焊料层不同老化程度对IGBT模块热阻抗的影响。本文分别设置DBC焊料层老化程度η_2为0、20%、40%、60%、80%，结果如图6

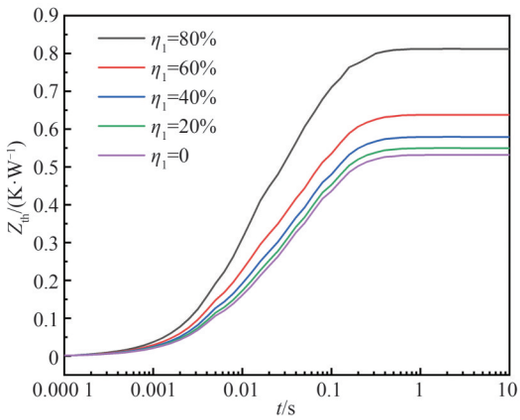


图 5 芯片焊料层对模块的瞬态热阻抗的影响

Fig.5 Influence of the chip solder layer on the transient thermal impedance of the module

所示。

由图 6 可知,IGBT 模块的瞬态热阻抗曲线约从 0.04 s 开始分离。芯片焊料层老化导致热传导路径发生变化,由于热量从芯片传导至芯片焊料层所需时间极短,因此曲线分离出现较早。相比之下,热量传递至 DBC 焊料层所需时间较长,故当该层发生疲劳失效时,对应的曲线分离点在时间轴上相对滞后。

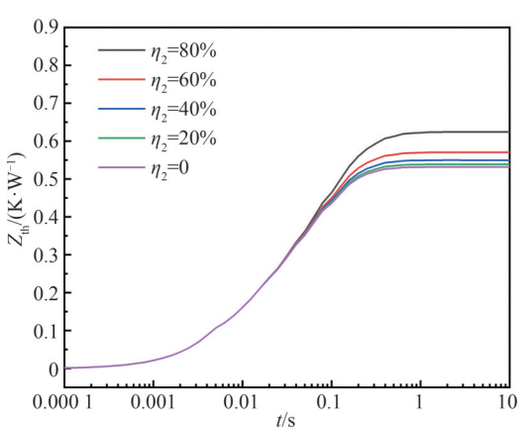


图 6 DBC 焊料层对模块的瞬态热阻抗的影响

Fig.6 Influence of the DBC solder layer on the transient thermal impedance of the module

由图 5 和图 6 对比可知,在相同的老化程度下,不同焊料层对模块热阻抗的影响不同,其中芯片焊料层对 IGBT 模块热阻抗的影响更大,两者对热阻增大的贡献量对比如表 3 所示。原因在于芯片作为主要发热源,其产生的热量首先流经芯片焊料层;当热量进一步传递至 DBC 焊料层时,热流已发生一定扩散,该处对整体热阻的影响相对减弱,因此 DBC 焊料层热阻增加引起的附加温升相对较小。从传热路径看,芯片焊料层位于热流上游,其老化程度对结温的影响更大,因此对模块的热阻抗影响也更大。

表 3 不同焊料层老化对模块热阻抗的影响

Table 3 The influence of different solder layer aging degrees on the thermal resistance of the module

η/%	DBC 焊料层		芯片焊料层	
	模块热阻抗/(K·W^{-1})	增量百分比/%	模块热阻抗/(K·W^{-1})	增量百分比/%
0	0.531 85	0	0.531 85	0
20	0.538 73	1.293 6	0.549 81	3.376 9
40	0.549 76	3.367 5	0.579 36	8.933 0
60	0.570 46	7.259 6	0.637 84	19.928 6
80	0.624 25	17.373 3	0.812 17	52.706 6

为分析非离散条件下 2 个焊料层老化程度对 IGBT 模块热阻抗的影响,本文采用参数化扫描方法得到不同焊料层老化组合下对应的模块热阻抗值,如图 7 所示。

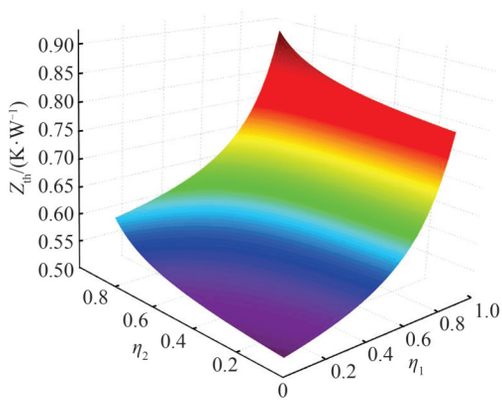


图 7 双焊料层不同老化程度下对应的热阻抗

Fig.7 Thermal impedance corresponding to different aging states of the dual solder layers

由图 7 可得,随着 2 个焊料层老化程度的增大,IGBT 模块的热阻呈非线性上升,且模块热阻对 2 个焊料层老化的响应呈现耦合效应,致使 IGBT 最终失效。

综上所述,当不同焊料层处于不同的老化程度时,其对热阻抗曲线的变化过程和最终结果均有影响,并会在 IGBT 模块的瞬态热阻抗曲线上反映出来,即双焊料层的不同老化组合与模块的热阻抗曲线一一对应,因此两者可以互相映射。

3 Foster 热网络建模与参数辨识

基于电热类比理论,采用集总参数模型构建 Foster 或 Cauer 型等效热网络是研究 IGBT 瞬态热特

性的常用手段[18-19]。其中，Cauer模型是一种物理拓扑模型，其热阻-热容（thermal resistance - thermal capacitance，RC）单元严格按照实际物理结构的几何层和材料层对应排列，但其参数不易获取；Foster模型是一种纯数学拟合模型，以四阶Foster热网络为例（见图8），其中：$P(t)$为t时刻施加于IGBT芯片的功率损耗；R_i为第i阶热阻；C_i为第i阶热容；T_c为IGBT模块的壳温。其RC单元没有直接的物理位置对应，仅是一个用于高度拟合热阻抗曲线的数学网络。

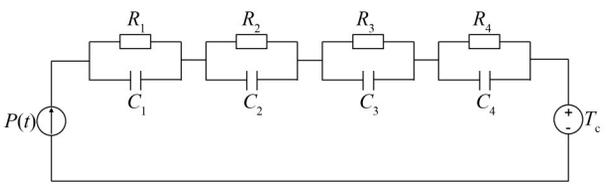


图8　Foster热网络模型

Fig.8　Foster´s thermal network model

本文采用基于非线性最小二乘拟合的参数辨识方法，通过最小化实测热阻抗曲线与Foster模型阶跃响应函数之间的残差平方和，实现从时域热响应数据到多阶RC网络参数的稳健估计，热阻拟合公式采用文献和器件手册中常用的指数函数形式：

$$Z_{\mathrm{th}}(t)=\sum_{i=1}^{n}R_i\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \tag{8}$$

式中：R_i为第i阶的热阻值，℃/W；τ_i为第i阶的热时间常数，$\tau_i=R_i\times C_i$，单位为s；C_i为第i阶的热容值，W·s/℃；n为模型阶数，根据所需精度选择，常见为三阶或四阶。

本文选取IGBT模块的芯片焊料层老化程度为40%、DBC焊料层老化程度为20%的工况进行验证。在已知该状态下模块瞬态热阻抗曲线的基础上，采用非线性最小二乘法拟合得到的Foster模型数据如表4所示，表中C为热容值，W·s/℃。

表4　IGBT模块的Foster热网络参数

Table 4　Parameters of the Foster thermal network model for the IGBT module

序号	R/(℃·W^{-1})	C/(W·s·℃$^{-1}$)
1	0.129 2	0.092 3
2	0.268 2	0.068 9
3	0.132 7	0.021 8

为验证热网络模型的准确性，本文对比分析了同一工况下Foster热网络模型与有限元模型结温曲线的误差。在Matlab的Simulink平台中搭建该热网络模型，分别施加占空比为0.5、频率为10 Hz、幅值不同的方波，对比分析结温波动和结温均值这2项热参数的差异。

表5中：ΔT_j为IGBT结温达到稳态后的结温波动值；T_{jm}为IGBT结温达到稳态后的结温均值。由数据对比可知，在不同方波幅值下，Foster热网络模型所得2项热参数与有限元模型相比结果如下：结温波动差最大为0.755 3 ℃，误差率最大为2.9%；平均结温差最大为0.001 4 ℃，误差率最大为3.5×10^{-3}%。因此基于Foster热网络的结温预测方法可以准确分析芯片焊料层和DBC焊料层不同程度疲劳损伤后的结温特性。

表5　不同建模方式的热参数对比

Table 5　Comparison of thermal parameters for different modeling approaches

幅值/W	Foster热网络		有限元模型	
	ΔT_j/℃	T_{jm}/℃	ΔT_j/℃	T_{jm}/℃
30	9.953 7	33.791 25	9.716	33.791 0
40	13.271 8	36.722 30	12.954	36.721 0
50	16.591 5	39.652 45	16.193	39.651 5
60	19.909 7	42.582 95	19.432	42.582 0
70	23.228 0	45.513 40	22.568	45.512 0
80	26.546 3	48.443 85	25.791	48.442 5

4　考虑双焊料层连续老化的IGBT模块寿命评估

4.1　寿命预测模型

由上述分析可知，不同焊料层失效对模块瞬态热阻抗特性的影响存在差异。鉴于Foster热网络可通过瞬态热阻抗曲线提取模块的结温信息，因此不同焊料层老化后的IGBT模块与其对应的Foster热网络模型之间具有一一对应的映射关系。本文通过观测模块的瞬态热阻抗曲线并动态修正热网络参数的方式，实现计入不同焊料层疲劳累积的寿命预测。研究采用Miner线性累积损伤准则计算累计疲劳损伤值，并建立与其模块热阻之间的线性对应关系。以模块热阻相较健康状态增大50%作为完全失效判据，此时模块达到失效状态，其对应关系为

$$R_{\mathrm{th}}(D)\approx R_{\mathrm{th},0}\times(1+0.5D) \tag{9}$$

式中：$R_{\mathrm{th},0}$为模块健康状态下的热阻；D为每一轮寿命评估后得到的疲劳累积损伤值，当$D=1$时模块失效。

本文已得到各焊料层在不同老化程度下的模块热阻值。考虑到实际应用中芯片焊料层和DBC焊料层的老化程度逐渐增大，且芯片焊料层由于距

离热源更近而更容易疲劳失效,因此在热阻与2个焊料层老化程度的对应关系中,选取芯片焊料层与DBC焊料层老化程度比例为5:1,以得到每一轮疲劳累积后模块不同焊料层的老化程度。评估首先从健康状态开始,分析特定时间段内模块的损伤累积,根据疲劳累积与模块热阻的对应关系得到当前模块的热阻;然后由模块热阻得到2个焊料层的老化程度,进而得到此时模块的热阻抗曲线;接着根据热阻抗曲线实时调整此时Foster热网络模型的各项参数,根据实际工况得到模块在该老化状态下的热载荷曲线,以此再进行下一轮寿命评估。基于上述步骤进行循环迭代评估,直至模块达到最终失效。以光伏逆变器中IGBT模块的寿命评估为例,其完整流程如图9所示。其中,P_{loss}为IGBT模块的损耗。

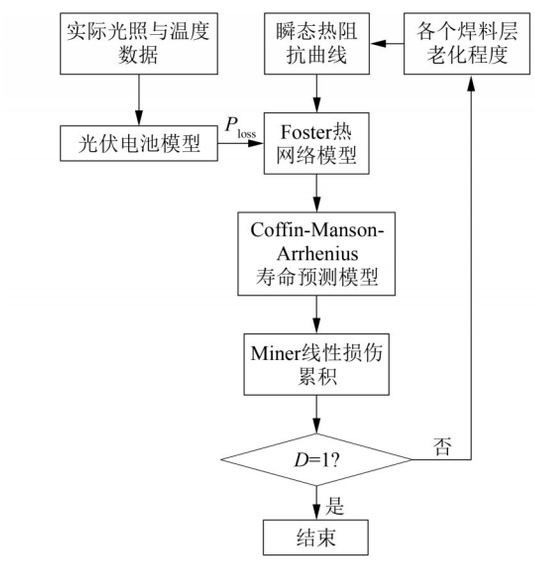


图9 光伏逆变器中IGBT寿命评估流程

Fig.9 Lifetime prediction process for the IGBT module in a photovoltaic inverter

4.2 光伏逆变器中IGBT模块寿命预测算例分析

为评估本文所提的寿命预测模型的有效性,笔者将其与现有模型进行比较,以分析光伏逆变器内IGBT模块的实际寿命。本文采用基于Coffin-Manson-Arrhenius关系的解析寿命模型,该模型可表述为

$$N_f = A\Delta T^{\alpha} e^{\frac{E_a}{k_B}(T_m+273)} \tag{10}$$

式中:N_f为在特定载荷条件下模块达到失效的循环次数;k_B为玻尔兹曼常数,取1.38×10^{-23} J/K;T_m为平均结温,℃;E_a为激活能;A与α均为模型参数。本文引用文献[20]中通过加速老化试验所取得的实验参数,以此保证最终实验结果的可靠性,其中参数E_a取9.89×10^{-20} J,A取97.223 1,α取−3.129 2。

在各应力阶段内,假设损伤呈线性累积,采用Miner线性累积损伤准则进行评估,表达式如下:

$$D = \sum_{i=0}^{n} \frac{N_i}{N_f} \tag{11}$$

式中:N_i为第i种载荷下的实际循环次数;当$D \geqslant 1$时认为模块失效。

本文在Matlab/Simulink中搭建光伏电池仿真模型,并采用扰动观察法对不同工况下光伏板的最大输出功率进行追踪。在标准测试条件下,即光照强度为1 000 W/m^2、温度为25℃时,光伏电池的U-I方程为

$$I_L = I_{SC}\left[1 - C_1\left(\exp\left(\frac{U_L}{C_2 U_{OC}}\right) - 1\right)\right] \tag{12}$$

式中:I_L为光伏电池的输出电流,A;U_L为光伏电池的输出电压,V;I_{SC}为光伏电池的短路电流,A;U_{OC}为光伏电池的开路电压,V;C_1和C_2为光伏电池U-I特性曲线的拟合参数,均为无量纲参数;exp(·)为指数函数。其中C_1和C_2可由下式计算:

$$\begin{cases} C_1 = \left(1 - \dfrac{I_m}{I_{SC}}\right) \times \exp\left(-\dfrac{U_m}{U_{OC}}\right) \\ C_2 = \left(\dfrac{U_m}{U_{OC}} - 1\right) / \ln\left(\dfrac{I_m}{I_{SC}}\right) \end{cases} \tag{13}$$

式中:I_m为光伏电池工作在最大功率点时的电流,A;U_m为光伏电池工作在最大功率点时的电压,V。针对实际光照与温度条件,式(13)中的参数(I_{SC}、I_m、U_{OC}、U_m)通过引入相应的修正系数进行校准,从而得到实际参数值。修正后的参数可表示为($D_1 I_{SC}$、$D_1 I_m$、$D_2 U_{OC}$、$D_2 U_m$),其中D_1为电流修正系数,D_2为电压修正系数,可由下式计算得到:

$$\begin{cases} D_1 = \dfrac{S}{1\,000}\left[1 + \alpha_{PV}(T_a - 25)\right] \\ D_2 = \left[1 - \beta_{PV}(T_a - 25)\right]\ln\left(e + \gamma_{PV}\left(\dfrac{S}{1\,000} - 1\right)\right) \end{cases} \tag{14}$$

式中:S为光照强度,W/m^2;T_a为环境温度,℃;α_{PV}和β_{PV}均为温度修正系数;γ_{PV}为光照强度修正系数;e为自然常数。下标PV表示相关参数用于光伏电池模型。本文使用型号为AEG AS-M1202-H(RM10)的光伏板组件,采用2个电池串联、10个电池并联,光伏组件最大输出功率为10 kW。光伏电池中的各参数取值如表6所示。

本文中的三相逆变器采用双极性正弦脉宽调

表 6　光伏电池参数

Table 6　Parameters of photovoltaic cells

参数	数值
U_m	36.92 V
I_m	13.56 A
U_{OC}	44.45 V
I_{SC}	14.04 A
α_{PV}	0.002 5 ℃$^{-1}$
β_{PV}	0.002 88 ℃$^{-1}$
γ_{PV}	0.5 m^2/W

制（sinusoidal pulse width modulation，SPWM）的线性调制方式，交流侧输出线电压有效值设定为220 V，开关频率为5 kHz，调制信号频率为50 Hz。在忽略逆变器自身损耗的条件下，其输出功率可近似等于光伏组件在最大功率点处的发电功率，逆变器交流侧桥臂电流可按下式计算：

$$I_a = \sqrt{2}\,P_m / \sqrt{3}\,U_l \sin(\omega t) \tag{15}$$

式中：I_a为逆变器交流侧桥臂电流，A；P_m为当前工况下光伏组件在最大功率点处的输出功率，W；U_l为逆变器交流侧输出线电压有效值，V；ω为交流侧电流的角频率，rad/s。

本文根据IGBT数据手册提供的导通特性曲线与开关特性曲线进行数据拟合，由桥臂电流计算得到IGBT芯片的导通损耗和开关损耗，两者之和即为IGBT芯片的总损耗。将芯片损耗输入到由模块热阻抗曲线提取得到的三阶Foster热网络中，结合图10和图11所示的实际光照强度和环境温度数据，分析得到健康状态下模块的热载荷谱，结果如图12所示。图中：ΔT_j为模块的结温波动，℃；T_j为模块的最大结温，℃。

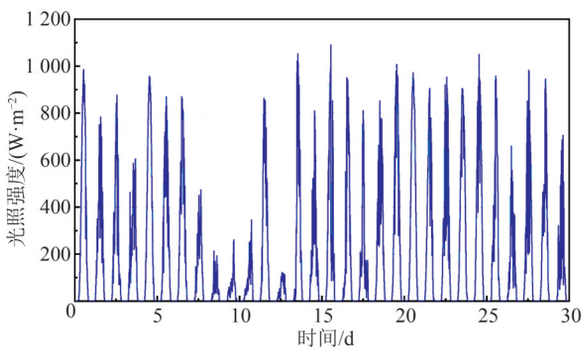


图 10　实际光照强度

Fig.10　Actual light intensity

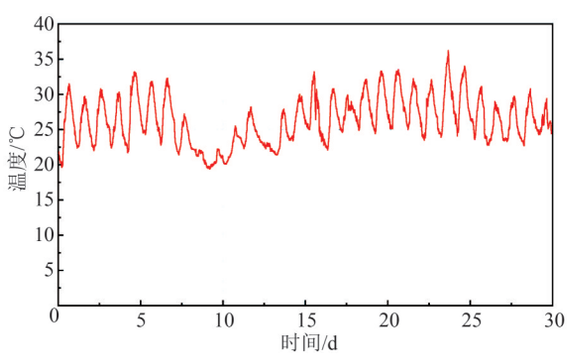


图 11　实际温度

Fig.11　Actual temperature

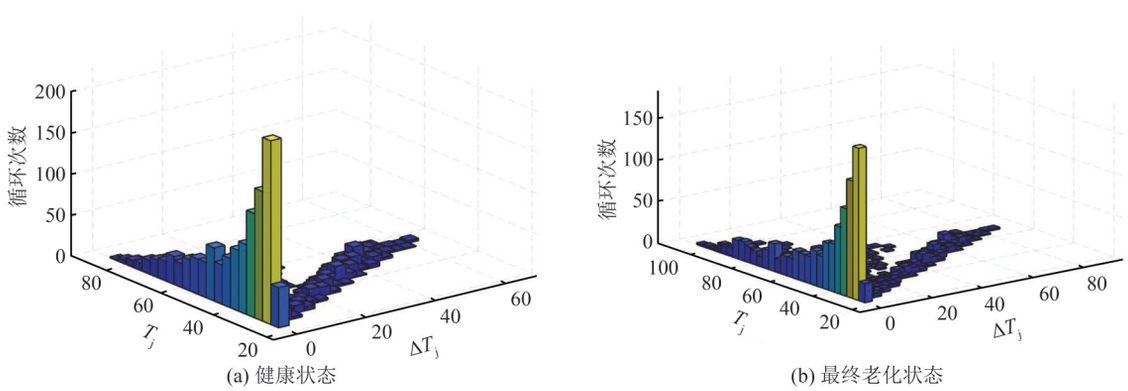


图 12　老化前后IGBT模块的热载荷对比

Fig.12　Comparison of the thermal load of the IGBT module before and after aging

由图12(a)可知，在健康状态下，模块的结温波动均小于63 ℃，且结温波动大部分集中在0 ℃～5 ℃区域，最大平均结温约80 ℃。当模块经历最后一轮老化状态的寿命评估时，其热载荷如图12(b)所示，模块的结温波动最大可达80 ℃左右，最大平均结温约100 ℃。

考虑不同焊料层对热阻的贡献时，IGBT模块寿命预测结果对比如表7所示。本文模型（考虑双焊料层老化耦合）的预测结果为28.594 2 a；若仅考虑芯片焊料层老化失效，寿命模型的评估结果为25.641 7 a；若仅考虑DBC焊料层老化失效，寿命模型的评估结果为32.085 5 a。若不考虑各焊料层疲

劳累积效应的影响,按照传统寿命模型进行评估,结果为34.028 1 a,该结果高估了模块寿命。

表7 考虑不同焊料层老化时IGBT模块寿命预测的结果对比

Table 7 Comparison of lifetime prediction results for IGBT modules with and without considering the aging of different solder layers

评估模型	条件与说明	预测寿命/a
传统模型	不考虑焊料层老化效应	34.028 1
本文模型	仅考虑芯片焊料层的热阻贡献	25.641 7
	仅考虑DBC焊料层的热阻贡献	32.085 5
	考虑双焊料层老化耦合	28.594 2

不同方法下IGBT模块寿命预测结果对比如表8所示。由文献[21]中针对光伏逆变器中IGBT模块的寿命预测结果可知:若在实验过程中仅监测芯片焊料层的空洞情况,模块寿命为29.370 0 a;若在使用阶段性寿命预测方法时仅计及芯片焊料层对模块热阻增大的贡献,预测得到的模块寿命为26.080 0 a。因此若计入DBC焊料层的疲劳老化,实际应用过程中模块寿命应在26.080 0 ~29.370 0 a之间,本文模型的预测结果为28.594 2 a,验证了本文预测模型的准确性。

表8 不同方法下IGBT模块寿命预测结果对比

Table 8 Comparison of lifetime prediction results for IGBT modules using different methods

对比指标	条件与说明	预测寿命/a
文献[21]实验监测结果	实验监测,仅考虑芯片焊料层空洞	29.370 0
文献[21]模型预测结果	阶段性预测,仅计及芯片焊料层的热阻贡献	26.080 0
本文模型预测结果	考虑双焊料层耦合老化效应的寿命预测模型	28.594 2

相较于仅考虑单一焊料层老化的分阶段寿命预测方法,同时考虑双焊料层耦合老化效应的模型能够在保证预测结果可靠性的基础上,显著提升寿命评估的准确性,其克服了单一焊料层假设带来的片面性,能够综合反映不同位置焊料疲劳对热载荷的差异化影响及相互耦合效应,并可为工程实际中的系统维护与更换策略提供更合理的时间窗口,从而有助于在安全性与经济性之间取得更优平衡。

5 结论

本文基于芯片焊料层和DBC焊料层疲劳失效对模块热阻带来的非线性耦合影响,提出了一种寿命评估模型。该模型首先基于模块热阻对焊料层老化程度进行量化,进而根据热阻抗曲线特征动态修正Foster热网络参数,最终建立了能够综合考虑不同焊料层疲劳耦合效应的寿命评估框架。本文通过将其与传统寿命预测模型以及考虑单一焊料层疲劳失效的寿命预测模型进行对比,分析验证了该模型的准确性与实用性。本文得到以下结论:

1)考虑到IGBT模块中的传热路径,不同焊料层老化对瞬态热阻抗曲线的影响不同,2个焊料层的老化组合与瞬态热阻抗曲线一一对应。

2)不同焊料层疲劳失效对IGBT模块的整体热阻存在非线性耦合影响。

3)基于瞬态热阻抗曲线分析得到的Foster热网络模型可准确有效地得到模块的热载荷。

4)在寿命预测过程中,应考虑到在实际应用过程中2个焊料层同时老化,因此计入DBC焊料层的老化程度是必要的,且由于芯片焊料层更靠近热源,其老化速度要快于DBC焊料层。

5)本文建立的基于瞬态热阻抗曲线动态修正Foster热网络参数的寿命预测模型能够系统考虑不同焊料层之间老化耦合对模块失效过程的加速影响。

参考文献:

[1] 黄先进, 李鑫, 刘宜鑫, 等. 基于量化电压并行比较的IGBT状态监测保护电路[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2535-2547.
HUANG Xianjin, LI Xin, LIU Yixin, et al. Condition monitoring and protection circuit for IGBTs based on parallel comparison methods of quantized voltages[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2535-2547.

[2] TU C M, XU H L, XIAO B, et al. Study on the failure of IGBT bonding wire based on temperature gradient[C]//IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2020: 3011-3016.

[3] KUMAR D, NEMA R K, GUPTA S. Development of a novel fault-tolerant reduced device count T-type multilevel inverter topology[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 132: 107185.

[4] LU Y Z, CHRISTOU A. Prognostics of IGBT modules based on the approach of particle filtering[J]. Microelectronics Reliability, 2019, 92: 96-105.

[5] WANG Z, TIAN B, QIAO W, et al. Real-time aging

monitoring for IGBT modules using case temperature [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1168-1178.

[6] 赖伟，陈民铀，冉立，等. 老化试验条件下的IGBT失效机理分析[J]. 中国电机工程学报，2015，35(20): 5293-5300.
LAI Wei, CHEN Minyou, RAN Li, et al. Analysis of IGBT failure mechanism based on ageing experiments [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5293-5300.

[7] MOROZUMI A, YAMADA K, MIYASAKA T, et al. Reliability of power cycling for IGBT power semiconductor modules[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(3): 665-671.

[8] ONUKI J, KOIZUMI M, SUWA M. Reliability of thick Al wire bonds in IGBT modules for traction motor drives[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2000, 23(1): 108-112.

[9] 赖伟，李涵锐，李辉，等. 基于失效演化模拟的电力机车用IGBT模块解析剩余寿命建模研究[J]. 中国电机工程学报，2024，44(20): 8189-8200.
LAI Wei, LI Hanrui, LI Hui, et al. Analytical remaining lifetime modeling for electric locomotive IGBT modules based on failure evolution simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8189-8200.

[10] 张宇娇，范虹兴，张炫焜，等. 柔性直流输电换流阀用IGBT模块焊料层疲劳寿命研究[J]. 高电压技术，2020，46(10): 3381-3389.
ZHANG Yujiao, FAN Hongxing, ZHANG Xuankun, et al. Fatigue life analysis of IGBT module solder layer for VSC-HVDC valve[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3381-3389.

[11] 何怡刚，周健波，李兵. NPC三电平中IGBT焊料层多物理场耦合失效分析[J]. 电子测量与仪器学报，2019，33(4): 71-78.
HE Yigang, ZHOU Jianbo, LI Bing. Multi-physics coupling failure analysis of IGBT solder layer in NPC three-level circuit[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(4): 71-78.

[12] SONG S Y, AN T, QIN F, et al. Effect of different solder layer damage on junction temperature of IGBT module[C]//2024 25th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2024: 1-4.

[13] 陈一高，陈民铀，高兵，等. 基于瞬态热阻的IGBT焊料层失效分析[J]. 中国电机工程学报，2018，38(10): 3059-3067.
CHEN Yigao, CHEN Minyou, GAO Bing, et al. Evaluation of solder failure of an IGBT module based on transient thermal impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 3059-3067.

[14] 陈民铀，陈一高，高兵，等. 计及焊料层疲劳累积效应的IGBT模块寿命评估[J]. 中国电机工程学报，2018，38(20): 6053-6061.
CHEN Minyou, CHEN Yigao, GAO Bing, et al. Lifetime evaluation of IGBT module considering fatigue accumulation of solder layers[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 6053-6061.

[15] 陈宇，周宇，罗皓泽，等. 计及芯片导通压降温变效应的功率模块三维温度场解析建模方法[J]. 电工技术学报，2021，36(12): 2459-2470.
CHEN Yu, ZHOU Yu, LUO Haoze, et al. Analytical 3D temperature field model for power module considering temperature effect of semiconductor voltage drop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2459-2470.

[16] ZHANG H Y, HWANG H Y, BU L, et al. Thermal modeling and characterization of SiC power module under both air cooling and liquid cooling conditions [C]//2014 IEEE 16th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), 2014: 618-623.

[17] 王为介，刘畅，陈钰洁，等. 基于反射特征辨识的IGBT焊料层老化状态评估[J]. 铁道科学与工程学报，2025，22(3): 1383-1395.
WANG Weijie, LIU Chang, CHEN Yujie, et al. Aging status evaluation of IGBT solder layer based on reflection feature identification[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(3): 1383-1395.

[18] NEUMANN C, ECKEL H G. Comparative lifetime estimations for IGBT modules in wind turbine converters[C]//2022 24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE′22 ECCE Europe), 2022: 1-11.

[19] SHI Y M, LIU J Q, AI Y, et al. Lifetime prediction method of the traction converter IGBT based on plastic strain energy density[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1): 1286-1298.

[20] 赖伟. 计及低强度热载荷疲劳累积效应的IGBT功率器件寿命模型研究[D]. 重庆：重庆大学，2016.
LAI Wei. Study on lifetime modeling of IGBT module considering fatigue accumulative effect of narrow junction temperature cycles[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[21] 马强. IGBT模块剩余寿命预测方法研究[D]. 天津：河北工业大学，2021.
MA Qiang. Research on prediction method of remaining life of IGBT module[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021.

（编辑：高映月）