

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.3.227

中图分类号: TM464

文献标志码: A

压接式 IGBT 寿命评估软件开发与案例分析

肖 凯¹, 王 振¹, 严喜林¹, 刘叶春²(中国电源学会学生会员), 胡剑生³,
刘 平²(中国电源学会会员)

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院, 广州 510000; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 3. 许继电气股份有限公司, 许昌 461000)

摘要: 压接式 IGBT 功率器件是新型电力系统应用装备中的核心部件之一。由于电力设备工作环境复杂, 工况多变, 长期作用下会导致功率器件发生疲劳失效。为保证电力系统关键设备的安全稳定运行, 需要对压接式 IGBT 器件的剩余寿命进行评估, 从而在器件发生失效前及时进行相应的处理。首先通过建立压接式 IGBT 器件多物理场模型分析影响器件老化进程的力学参数; 然后, 基于分析结果, 在现有寿命预测模型中选取适合于压接式 IGBT 的模型, 并开发适用于压接式 IGBT 的寿命评估软件; 最后用寿命评估软件进行案例分析, 得到器件的寿命评估结果, 对器件的应用提供了指导。

关键词: 压接式 IGBT; 多物理场模型; 老化失效; 特征参量; 寿命预测

Lifetime Assessment Software Development and Case Study for Press-pack IGBTs

XIAO Kai¹, WANG Zhen¹, YAN Xilin¹, LIU Yechun², *Student Member, CPSS*, HU Jiansheng³,
LIU Ping², *Member, CPSS*

(1. Electric Power Research Institute, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510000, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Xuji Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: Press-pack IGBT power devices are one of the core components in new power system application equipment. Due to the complex working environment and variable working conditions of power equipment, the fatigue failure of power devices will be caused over time. To ensure the safe and stable operation of key equipment in power systems, it is necessary to assess the remaining lifetime of press-pack IGBT devices, thereby timely taking appropriate actions before a device failure occurs. First, a multi-physics field model of press-pack IGBT devices is established, and the mechanical parameters affecting their aging process are analyzed. Based on the analysis results, a suitable model for press-pack IGBTs is selected from the existing lifetime prediction models, and a lifetime assessment software applicable to press-pack IGBTs is developed. Finally, a case study is conducted based on the developed lifetime assessment software, and the assessment result of devices is obtained, providing guidance for the applications of devices.

Keywords: Press-pack IGBT; multi-physics field model; aging failure; characteristic covariate; lifetime prediction

压接式绝缘栅双极性晶体管 IGBT (insulate-

gate bipolar transistor) 因其双面散热、抗冲击能力强及短路故障后仍能暂时工作的优势, 目前在柔性直流输电系统等大功率应用场景受到广泛关注。在张北直流电网工程和昆柳龙混合输电工程等国家级电网工程中均使用了压接式 IGBT 器件^[1-2], 涉及的装备包括: 模块化多电平换流阀^[1]、混合式直流断路器^[3-4]和直流耗能装置^[5]等。然而在实际应用中, 交

收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-02-26; 录用日期:
2024-03-04; 网络首发日期: 2024-03-29

基金项目: 南方电网公司科技资助项目 (CGYKJXM20220108)

This work is supported by the China Southern Power Grid Corporation Science and Technology Project Funding under the grant CGYKJXM20220108

变的热应力给压接式 IGBT 的可靠性带来了严峻挑战^[6]。如在换流阀设备中,绝大部分的故障情况来源于换流阀元件,而压接式 IGBT 的故障则在其中占据了较大比例,对换流阀设备的可靠运行造成了重要影响^[7]。为了对压接式 IGBT 的健康状态进行监控,避免器件损坏对系统的安全稳定运行造成影响,有必要对系统内部压接式 IGBT 的寿命进行预测,并基于其剩余寿命的预测值提前作出反应,对剩余寿命较短、濒临失效的器件及时进行维修或更换,从而提高电力系统的稳定性。

对于常见的焊接式 IGBT 的寿命预测,国内外专家和学者们已经提出了较多方案,并在实际工程中得到了较为广泛的应用^[8]。但压接式 IGBT 的结构与焊接式 IGBT 有较大差异,这使得二者的失效机理存在较大程度的不同,器件失效的特征物理量也有较大差别^[9]。因此,在对压接式 IGBT 进行寿命预测时,无法直接简单地沿用焊接式 IGBT 的寿命预测方法^[10],有必要针对压接式 IGBT 研究能够表征其失效的特征物理量,再依据其特征量选用合适的寿命预测方法。

目前,针对压接式 IGBT 的寿命评估尚未见较为全面的软件工具,寿命评估软件的研究仍停留在焊接式 IGBT 的领域^[11]。为了提升压接式 IGBT 在工程应用中的可靠性,为压接式 IGBT 的实际应用提供指导,有必要针对压接式 IGBT 开发寿命评估软件。

本文针对压接式 IGBT 器件,通过建立多物理场模型对其进行仿真分析,获取表征其失效的特征物理量;然后分析现有寿命预测模型对压接式 IGBT 的适用性,选择出最佳方法;最后开发了压接式 IGBT 寿命预测软件,并进行案例分析,实现对压接式 IGBT 的寿命评估。

1 面向压接式 IGBT 寿命预测的失效特征量分析

无论是压接式 IGBT 还是焊接式 IGBT,对于 IGBT 芯片而言,其老化过程的表现是一致的,即结温的升高^[12],因此结温是压接式 IGBT 和焊接式

IGBT 所共有的失效特征量,而结温的升高则会进一步加速芯片的老化^[13]。在对压接式 IGBT 失效特征量进行分析时,可以采用器件结温的升高作为对器件健康状态造成影响的标志。为了提取压接式 IGBT 的失效特征量,需要建立多物理场模型,通过对其进行仿真研究,分析对压接式 IGBT 可靠性有较大影响的失效特征量。

1.1 压接式 IGBT 多物理场建模

本文针对 ABB 公司生产的 5SNA3000K452300 型压接式 IGBT 进行研究。该型号压接式 IGBT 器件内部采用了子模组的形式,每个子模组内部包括 8 个 IGBT 芯片和 4 个 FRD 芯片。每个子模组形成 1 个独立的电气单元,电压等级为 4 500 V 500 A,其正面为集电极窗口,反面为单个发射极面板,驱动端子在侧面引出,配合 2 个螺丝接口以固定驱动器,内部 IGBT 芯片所能承受的结温范围为 $-50\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,壳温范围为 $50\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然后由这些子模组形成整个压接型 IGBT 器件,4 500 V 3 000 A 压接型 IGBT 器件内部包含 6 个独立的子模组,每个子模组的封装结构主要由发射极垫片、碟簧、银/铝垫片、铜片、焊有 IGBT 芯片的集电极板、门极引线板和铜盖板组成^[14-15],其结构如图 1 所示。

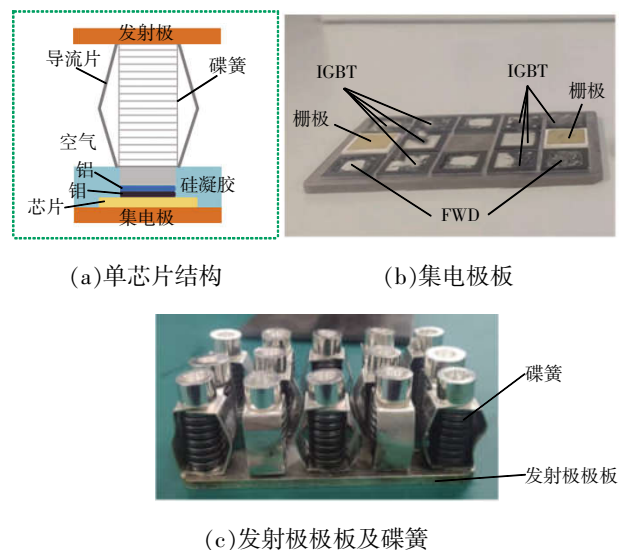


图 1 压接式 IGBT 内部结构

Fig. 1 Internal structure of press-pack IGBT

为了对压接式 IGBT 内部结构进行精准建模,本文将该型号压接式 IGBT 封装结构完全拆除,对

其内部结构进行观察,在测量得到压接式 IGBT 内部各结构尺寸后,利用多物理场仿真软件 COMSOL 对其子模块和单芯片结构进行了模型的建立,如图 2 所示。

根据压接式 IGBT 内部的材料分布,其多物理场模型的材料及其参数设置分别如表 1 和表 2 所示。

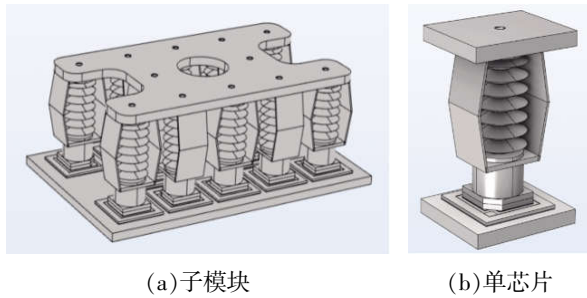


图 2 压接式 IGBT 子模块和单芯片几何模型

Fig. 2 Geometric model of press-pack IGBT submodule and single chip

表 1 多物理场建模材料设置

Tab. 1 Material setup for multi-physics field modeling

组件	材料
集电极	Mo
焊料层	SnAgCu
IGBT 芯片	Si(表面 Al 金属化)
小铜片	Mo
铝片	Al
铜柱	Cu
芯柱	合金
碟簧	合金
导流片	Cu
发射极	Cu

表 2 各材料的热力学参数

Tab. 2 Thermodynamic parameters of each material

材料	热导率/ [W·(m·K) ⁻¹]	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ [J·(kg·°C) ⁻¹]
Mo	138	10 200	250
Si	130	2 330	700
Al	238	2 700	900
Cu	400	8 960	385

由于模块中的各种材料不全是线弹性材料,材料属性会随着应力的改变而发生改变,因此本文对这些材料的力学参数进行修正,如表 3 所示。其中,

Si 材料在受到较大压力时不会发生塑性形变而是会发生断裂,而钼材料一般情况下不会发生塑性形变,因此这 2 种材料不在此处进行修正。

表 3 双线性弹塑性模型

Tab. 3 Bilinear elastic-plastic model

材料	杨氏模量 E/Gpa	泊松比 σ	密度 ρ / (kg/m ³)	初始屈服 应力 σ_{y0} / Mpa	运动切 线模量 E_k /Gpa
Cu	110	0.35	8 930	86.49	1.10
Al	70	0.33	2 700	64.40	0.62

仿真模型的边界条件设置:将压接式 IGBT 的上、下表面分别设置为电流的注入、流出,散热条件设置为对流热通量,传热系数为 3 000 W/(m²·K),热接触对设置为 0.006 W/(m²·K),外部温度为 20 °C 室温,给定接触面粗糙度的斜率和高度,给定的摩擦系数为 0.5。仿真模型的多物理场耦合关系如图 3 所示。

1.2 结果分析

相比于焊接式 IGBT,压接式 IGBT 的显著特征为内部无键合线结构,而其内部各结构的连接是通过弹簧施加的压力将芯片、垫片和极板等材料紧紧压紧来实现的,因此压力这一物理量与其运行特性的关系非常密切。除此之外,各层之间的接触状况也会对压接式 IGBT 的性能造成影响,因此接触面粗糙程度也是需要考量的物理量。利用 1.1 节建立的多物理场模型,针对压接式 IGBT 的外加压力和接触面粗糙程度对器件结温的影响进行分析。

1.2.1 外加压力对结温的影响

设置功率损耗为 150 W,环境温度为 20 °C,散热条件为 3 000 W/(m²·K),通过调节 COMSOL 软件固体力学中的边界载荷来改变 IGBT 的外部压力,外部压力分别设置为 480、840、1 200、1 560、1 920 N 这 5 种情况,仿真结果如图 4 和表 4 所示。由仿真结果可知,压接式 IGBT 的结温随着器件外加压力的减小而增大,这是由于压力减小后,各层间的接触热阻变大,导致传热性能降低。

1.2.2 不同表面粗糙度对结温的影响

设置功率损耗为 150 W,外部压力为 1 200 N,

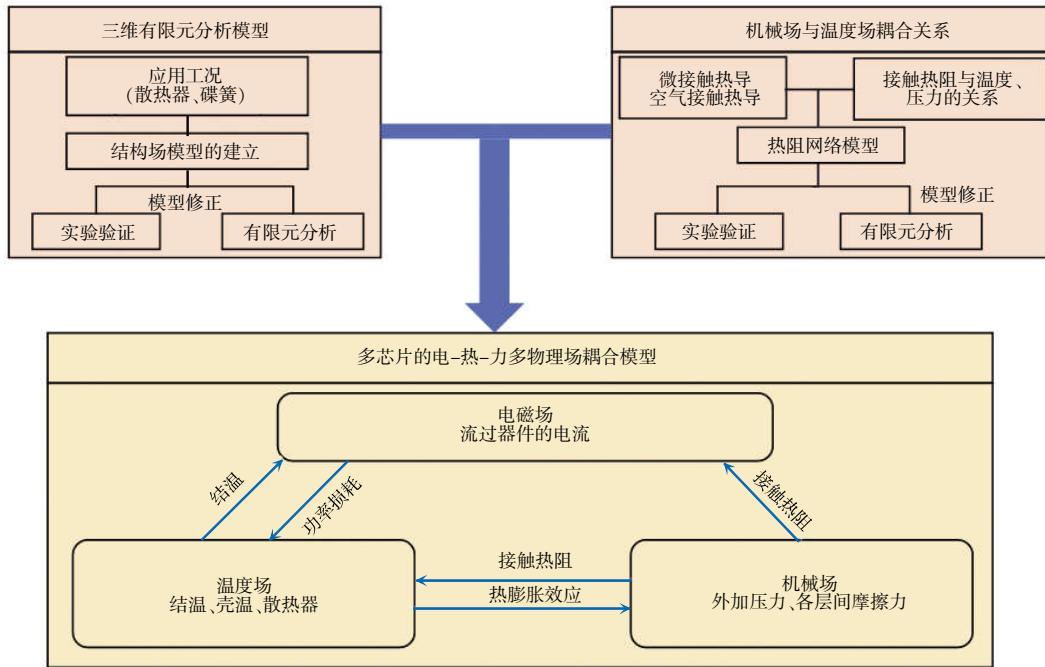


图 3 仿真模型的多物理场耦合关系

Fig. 3 Multi-physics field coupling relationship of simulation model

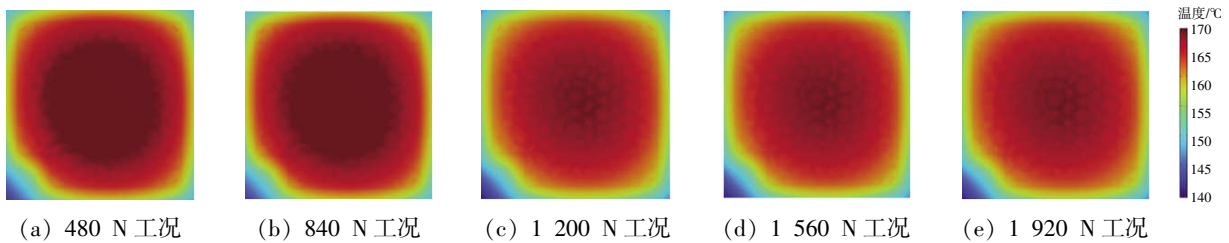


图 4 外加压力对结温影响的仿真结果

Fig. 4 Diagram of simulation result of effect of applied pressure on junction temperature

表 4 外加压力对结温影响的仿真结果

Tab. 4 Simulation results of effect of applied pressure on junction temperature

外加压力/N	温度/°C
480	175.333
840	174.553
1 200	168.262
1 560	168.218
1 920	168.168

散热条件为 $3\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，环境温度为 $20\ ^\circ\text{C}$ ，通过改变固体传热中热接触对的设置来改变 IGBT 粗糙度的平均高度和平均斜率。仿真结果分别如图 5 和表 5 所示。可知，压接式 IGBT 的结温随着器件内部各层间接触面粗糙程度的增大而增大，这是由于接触面粗糙程度上升后，各层间的接触热阻

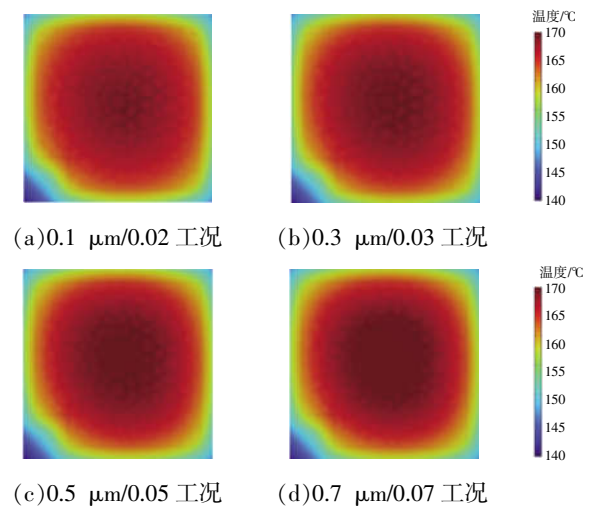


图 5 不同表面粗糙度对结温的影响仿真结果

Fig. 5 Diagram of simulation results of effect of different values of surface roughness on junction temperature

表5 不同表面粗糙度对结温影响的仿真结果

Tab. 5 Simulation results of effect of different values of surface roughness on junction temperature

平均高度/ μm	平均斜率	温度/ $^{\circ}\text{C}$
0.1	0.02	168.288
0.3	0.03	170.345
0.5	0.05	173.489
0.7	0.07	176.356

变大,导致传热性能降低。

综上所述,在对压接式 IGBT 的寿命预测进行研究时,除结温外,器件所受压力的大小和层间接触面粗糙程度也会对器件的剩余寿命造成较大影响,因此需要对现有的寿命预测模型进行评估分析,选取能够充分考虑压接式 IGBT 失效特征量的寿命预测模型,从而得到最为精确的寿命评估结果。

2 压接式 IGBT 寿命评估软件的开发

针对压接式 IGBT 开发寿命预测软件,首先需要选择适合于压接式 IGBT 的寿命预测模型,然后根据寿命预测模型分析其工作流程,最后设计软件界面。

2.1 寿命评估模型的分析与选择

在现有寿命预测模型中,绝大多数的模型是基于器件的结温波动、键合线参数和功率循环周期等特征参数来拟合器件的剩余寿命,但也有寿命预测模型考虑到了器件运行时其内部的力学环境,如断裂模型、Basquin 模型、塑性应变模型、Syed 蠕变模型、MORROW 模型和 Coffin-Manson 改进模型^[16]等。针对上述模型对压接式 IGBT 的适用性进行分析。

断裂模型是一种通过计算器件内部结构从裂纹生成直至完全断裂导致器件损坏的模型,其表达式为

$$\frac{L}{N} = a(\Delta\varepsilon)^b \quad (1)$$

式中: L 为初始裂纹长度; N 为器件寿命,用功率循环次数表示; $\Delta\varepsilon$ 为器件的累积损伤; a 和 b 为常数,可通过实验或仿真结果拟合得到。

压接式 IGBT 失效模式中虽然也存在结构断

裂的情况,但是器件的磨损、弹簧的松弛也会导致器件失效,因此仅用断裂来形容压接式 IGBT 的失效并不合理。

Basquin 模型和塑性应变模型有共通之处,但 Basquin 模型考虑了器件内部发生的弹性应变情况,即在发生形变后仍能恢复原状,然而在压接式 IGBT 内部结构发生老化后,往往会导致不可逆的损伤,在形变之后无法恢复原状,因此 Basquin 模型存在局限性。而塑性应变模型恰好与之相反,仅考虑到了器件发生的塑性应变情况。因此将二者相结合是一种可行的思路。

Syed 蠕变模型通过描述焊料层蠕变现象的变化来映射焊料层的疲劳过程,但压接式 IGBT 内部并不存在如焊料层般易于发生疲劳的结构,弹簧结构的疲劳则同结温波动的关系更加密切,因此这种模型同压接式 IGBT 并不契合。

MORROW 模型是对 Coffin-Manson 模型的修正,在 Coffin-Manson 模型的基础上考虑到了平均应力不为 0 时的情况,并结合器件所受的压力、不同材料间热膨胀系数的差值来模拟功率循环过程中的磨损,同压接式 IGBT 的多种失效模式相契合。

Coffin-Manson 改进模型是在 Coffin-Manson 模型的基础上加入了压力的影响,其表达式^[16]为

$$N_f = a(E\alpha\Delta T_j + P)^b \exp\left(\frac{c}{T_m}\right) \quad (2)$$

式中: N_f 为器件的剩余寿命,单位为功率循环次数; E 为材料的杨氏模量; α 为硅的热膨胀系数; ΔT_j 为结温波动; T_m 为最高结温; P 为压力; a 、 b 、 c 均为常数,由实验或仿真数据拟合得到。本文利用文献[16]中的试验数据取 $a=4\ 387.2$, $b=-18.2$, $c=26\ 977.6$ 。

上述模型中的特征参量绝大多数是针对焊接式 IGBT 而言的,在考虑将针对焊接式 IGBT 的寿命预测方法移植到压接式 IGBT 中时,应充分考虑 2 种器件间的差异,对模型中的参数进行合理修正。前文提到,压接式 IGBT 中无键合线结构,其内部各结构是借助外加压力紧紧压在一起实现紧密接触,因此,焊接式 IGBT 中常会发生的“键合线断裂”失效不存在于压接式 IGBT 中。而特殊的压接

封装也为压接式 IGBT 带来了不同于焊接式 IGBT 的失效模式。现有研究表明,压接式 IGBT 主要有微动磨损失效、接触面烧蚀失效、栅极氧化层失效、弹簧失效、边界翘曲失效和宇宙射线失效 6 种失效模式,其中多数失效模式的机理都与机械磨损有关。结合多物理场仿真分析可知,力学参数在压接式 IGBT 老化失效过程中起到了较为重要的作用。经分析可见,Coffin-Manson 改进模型同时考虑到了结温波动、平均结温和压力的影响,与压接式 IGBT 较为契合。在将该模型应用于压接式 IGBT 时,压力应理解为器件的外加压力,而并非焊接式 IGBT 中常见的“焊料层”所受压力。该方法虽未考虑不同材料间的热膨胀系数差异,但对于同种封装结构的压接式 IGBT 而言,各层材料的热膨胀系数并不会发生改变,因此在针对同种型号的压接式 IGBT 进行寿命预测时,并不会由于热膨胀系数的差异造成预测结果准确度的降低。因此 Coffin-Manson 改进模型是现有模型中最契合于压接式 IGBT 的寿命预测方法。

Coffin-Manson 改进模型需要用到器件的结温波动和平均结温数据,而在实际工况下,器件的结温波动并不是完全规则的,每个周期其结温的变化不尽相同,因此难以选出某一特定数值代入公式进行计算。针对该问题,需要一种循环计数的方法来分解复杂的结温变化情况,提取结温波动过程中的循环次数及其对应的幅值,累积每个计算周期所造成的损害。雨流计数法可以满足上述要求,即将整体的结温数据简化为若干个循环过程,在每个循环中分别利用寿命预测模型进行损伤计算,最后在对所有循环都运算完毕后,将所有的损伤进行累加,即可得到更为准确的寿命评估结果。

2.2 寿命评估软件的工作流程及界面

将雨流计数法与压接式 IGBT 寿命评估的 Coffin-Manson 改进模型以数学模型形式转换为程序运行代码,实现通过输入器件的工况和运行数据来对器件的剩余寿命和健康状况进行分析和评估,进而根据寿命评估结果指导器件的后续应用。

利用 livelink for MATLAB 模块对深度学习的

仿真模型与 MATLAB 进行二次开发,使得用户能够通过 MATLAB 自动化地控制、运行深度学习模型,实现二者之间数据与结果的互联互通,实现软件间的全耦合运行,进而得到一个包括寿命计算全流程的多功能集成软件,其工作流程如图 6 所示。

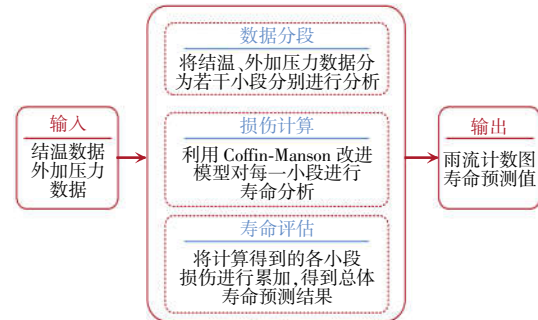


图 6 压接式 IGBT 软件工作流程

Fig. 6 Workflow of software for press-pack IGBTs

(1)数据输入。软件输入需要结温和外加压力数据,测量压接式 IGBT 一段运行时间内的结温波动数据,从压接式 IGBT 使用的夹具上读取外加压力的数据。

(2)数据分段。由于结温数据较为复杂,因此根据结温的极值和波动范围进行分段,忽略较小的结温波动,使得每小段的结温极值和波动范围尽量相似,雨流计数的分段示意如图 7 所示。

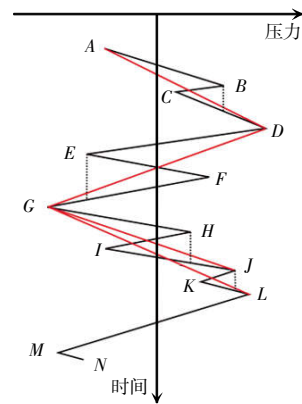


图 7 雨流计数法示意

Fig. 7 Schematic of rain flow counting method

(3)损伤计算。提取每小段的结温波动数值和平均结温,并将同该段时间内的外加压力一起代入 Coffin-Manson 改进模型中,得到计算结果。

(4)寿命评估。将每小段的损伤计算结果进行累加,得到总损伤,进一步得到器件寿命的预测值。

(5)结果输出。在软件中将雨流计数图和寿命预测值进行输出,根据结果对器件剩余寿命的健康与否进行评估,从而指导后续工作。

压接式 IGBT 寿命评估软件界面如图 8 所示,主要包括开始界面、数据导入界面和结果展示界面。本软件结合了雨流计数法和 Coffin-Manson 改

进模型。其中,雨流计数法的主要功能是将实测的载荷历程简化为若干个载荷循环,从而将复杂的结温波动过程分解成周期性循环,提取结温波动过程中的循环次数和每次循环对应的幅值。将雨流统计的结果同 Coffin-Manson 改进模型相结合,得到集成于 GUI 界面中的方便、快速的压接式 IGBT 寿命评估软件。

3 案例分析

在软件现场应用中,仅需取得待监测压接式 IGBT 器件的结温和外加压力数据并输入至压接式 IGBT 寿命评估软件中,便能得到压接式 IGBT 的仿真数据与预期寿命结果,其可为工程技术人员的检修、维护工作提供指导,从而保障电力电子设备的可靠运行。

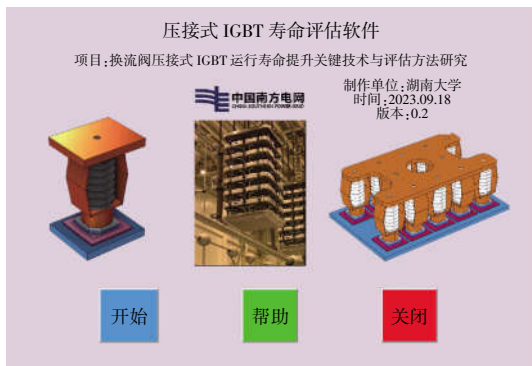
为了验证该寿命预测算法和软件的准确性,本文借助南方电网公司的设备,提取了换流阀设备中一新一旧 2 种压接式 IGBT 的内部参数,测量了其运行过程中的平均结温和结温波动,器件型号为 5SNA 3000K452300,与仿真器件一致。运行工况如表 6 所示。

表 6 测试工况

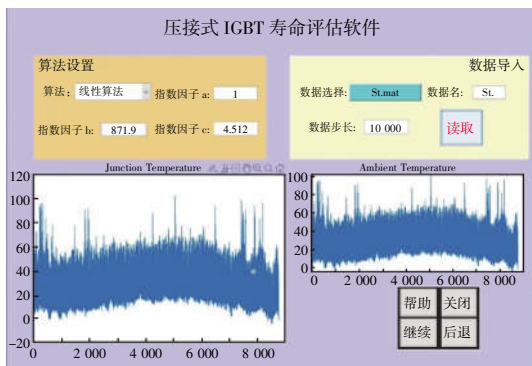
Tab. 6 Test conditions

参数	数值
电压/V	4 500
电流/A	2 000
外界温度/K	293.15
传热系数 $[W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}]$	3 000
运行状态	整流

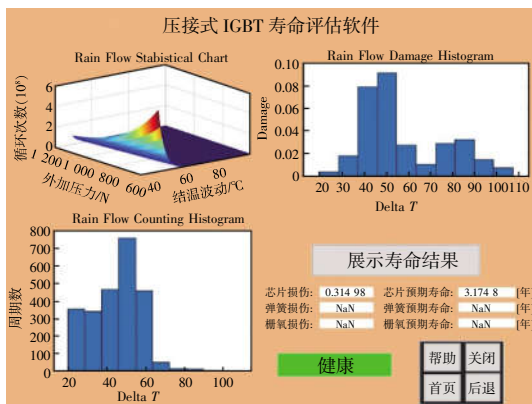
利用温度传感器采集得到 2 种器件的结温波形,如图 9 所示。2 种器件的外加压力均由相同型号夹具提供,恒定为 1 200 N。运行程序,得到 2 种器件的雨流计数,如图 10 所示。软件输出的寿命评估结果为:新器件剩余寿命为 3.174 8 a,旧器件剩余寿命为 0.646 9 a。根据寿命评估结果,新器件可继续正常使用,而旧器件濒临失效。为了换流阀系统的安全稳定运行,应对其加以监控,并及时进行更换。



(a)开始界面



(b)数据导入界面



(c)结果展示界面

图 8 压接式 IGBT 寿命评估软件界面

Fig. 8 Interface of press-pack IGBT lifetime assessment software

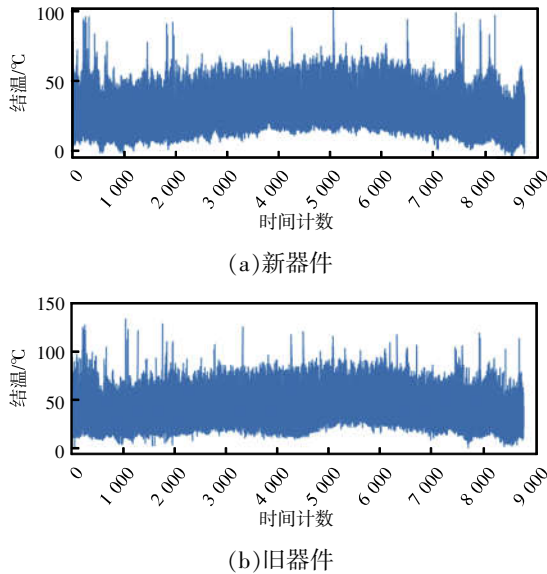


图 9 2 种器件的结温波形

Fig. 9 Junction temperature waveforms of two devices

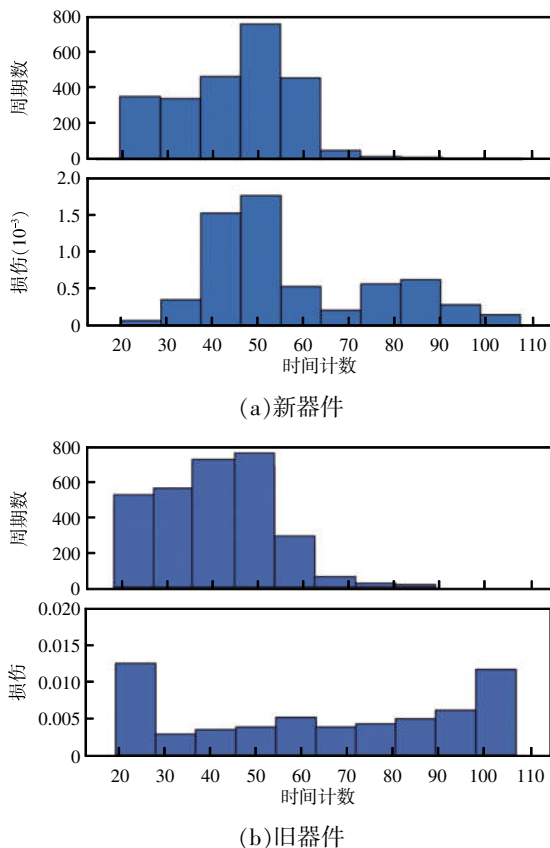


图 10 2 种器件的雨流计数

Fig. 10 Rain flow counting for two devices

4 结语

压接式 IGBT 常用于大功率应用场景,目前在

柔性直流输电中换流阀、直流断路器等设备中受到广泛应用,解决其可靠性问题是进一步推广应用的基础。本文针对压接式 IGBT 开发了寿命评估软件,首先通过对压接式 IGBT 器件进行多物理场建模仿真,分析其内部力学参数与可靠性的关系,对其失效特征量进行了选择。仿真结果表明,在压接式 IGBT 中,其外加压力和接触面粗糙程度的变化均会对器件的结温造成较为严重的影响。针对压接式 IGBT 结温参数较为复杂的问题,选用雨流计数法对结温进行分段分析,在现有 IGBT 寿命预测方法中选择充分考虑到力学参数影响的 Coffin-Manson 改进模型作为压接式 IGBT 的寿命预测模型,并针对压接式 IGBT 强调了模型参数与焊接式 IGBT 的区别。最后基于寿命评估模型开发了针对压接式 IGBT 的寿命评估软件,并进行了案例分析,将实测数据导入软件中,生成对器件寿命的评估结果,对压接式 IGBT 的工程应用有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 肖凯,王振,严喜林,等. 基于导通压降的大容量 IGBT 模块结温观测与误差分析研究[J/OL]. 电源学报: 1-18. (2024-02-08)[2024-02-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240206.1023.004.html>.
Xiao Kai, Wang Zhen, Yan Xilin, et al. Observation and error analysis of junction temperature of large-capacity IGBT module based on on-state voltage drop [J/OL]. Journal of Power Supply: 1-18. (2024-02-08) [2024-02-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240206.1023.004.html> (in Chinese).
- [2] 罗皓泽,陈忠,杨为,等. 压接式 IGBT 和晶闸管器件失效模式与机理研究综述[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 137-152.
Luo Haoze, Chen Zhong, Yang Wei, et al. Review on the failure mode and mechanism of press-pack IGBT and thyristor devices [J]. Electric Power, 2023, 56(5): 137-152 (in Chinese).
- [3] 刘晨阳,王青龙,柴卫强,等. 应用于张北四端柔直工程±535 kV 混合式直流断路器样机研制及试验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3638-3646.
Liu Chenyang, Wang Qinglong, Chai Weiqiang, et al. Development and experimental research of ±535 kV hybrid

- DC circuit breaker prototype applied in Zhangbei four-terminal VSC-HVDC project [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3638-3646 (in Chinese).
- [4] 程显, 余亚东, 葛国伟, 等. 混合式直流断路器状态感知技术与智慧框架体系探讨[J/OL]. 电网技术: 1-12. (2023-08-03)[2024-02-22]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1016>.
- Cheng Xian, Yu Yadong, Ge Guowei, et al. Discussion on state sensing technology and intelligent framework system of hybrid DC circuit breaker [J/OL]. Power System Technology: 1-12. (2023-08-03)[2024-02-22]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1016> (in Chinese).
- [5] 许彬, 高冲, 张静. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越的新型直流耗能装置拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 88-97.
- Xu Bin, Gao Chong, Zhang Jing. A novel DC chopper topology for grid side fault ride through in VSC-HVDC based offshore wind power connection [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 88-97 (in Chinese).
- [6] Liu Renkuan, Li Hui, Yao Ran, et al. Overview of monitoring methods of press-pack insulated gate bipolar transistor modules under different package failure modes [J]. IET Power Electronics, 2023, 16(4): 683-698.
- [7] Li Cui, Jin Rui, He Feng, et al. A failure mechanism of IGBT module in MMC and improvement [J]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023, 2645 (1): 012008.
- [8] Abuelnaga A, Narimani M, Bahman A S. A review on IGBT module failure modes and lifetime testing [J]. IEEE Access, 2021, 9: 9643-9663.
- [9] 邓二平, 张经纬, 李尧圣, 等. 焊接式 IGBT 模块与压接型 IGBT 器件可靠性差异分析[J]. 半导体技术, 2016, 41(11): 801-810, 815.
- Deng Erping, Zhang Jingwei, Li Yaosheng, et al. Analysis of the reliability differences between IGBT modules and press-pack IGBTs [J]. Semiconductor Technology, 2016, 41(11): 801-810, 815 (in Chinese).
- [10] Yao Ran, Duan Zeyu, Li Hui, et al. Lifetime prediction for press pack IGBT device by considering fretting wear failure [J]. Microelectronics Reliability, 2023, 145: 114984.
- [11] Wang Huai, Ma Ke, Blaabjerg F. Design for reliability of power electronic systems [C]// IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, QC, Canada, 2012: 33-44.
- [12] Li Hui, Zhou Bailing, Yao Ran, et al. A thermal twin modeling method of press pack IGBT based on power loss [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(12): 6922-6928.
- [13] Zhang Yiming, Deng Erping, Zhao Zhibin, et al. A physical thermal network model of press pack IGBTs considering spreading and coupling effects [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2020, 10(10): 1674-1683.
- [14] Liu Renkuan, Li Hui, Yao Ran, et al. Research on long-term reliability of silver sintered press-pack IGBT modules [J]. Power Electronic Devices and Components, 2022, 3: 100012.
- [15] Zhan Cao, Zhu Lingyu, Dai Jiangang, et al. Wear-out mechanism of press-pack IGBTs under accelerated aging test [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 10(5): 5132-5141.
- [16] 江泽申. 压接式 IGBT 器件功率循环试验及寿命预测 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- Jiang Zeshen. Power cycling test and lifetime modeling of press-pack IGBT [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018 (in Chinese).



肖凯

作者简介:

肖凯(1991-),男,硕士,工程师。研究方向:高压直流输电换流阀及阀冷工作。E-mail: xiaokaihv@csg.cn。

王振(1979-),男,硕士,正高级工程师。研究方向:高压直流输电换流阀。E-mail: wangzhen7910@csg.cn。

严喜林(1986-),男,硕士,高级工程师。研究方向:高压直流输电换流阀。E-mail: yanxilin1986@csg.cn。

刘叶春(2000-),男,中国电源学会学生会员,硕士研究生。研究方向:功率器件可靠性。E-mail: 18807493212@163.com。

胡剑生(1979-),男,本科,高级工程师。研究方向:高压直流输电换流阀。E-mail: hujiansheng@xj.cee-group.cn。

刘平(1983-),男,中国电源学会会员,通信作者,博士,副教授。研究方向:电力电子与电驱系统性能综合优化与高可靠运行关键技术。E-mail: pingliu@hnu.edu.cn。