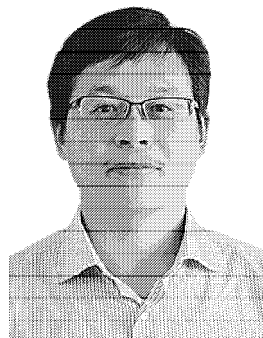


技
术
专
题

功率 IGBT 模块的寿命预测

王彦刚, Chamund Dinesh, 李世平, Jones Steve,
窦泽春, 忻兰苑, 刘国友

(株洲南车时代电气股份有限公司 功率半导体研发中心, 英国 林肯 LN6 3LF)



作者简介: 王彦刚(1974-), 男, 博士, 高级工程师, 目前主要从事新型功率 IGBT 模块的设计封装及可靠性分析等工作。

摘要: 介绍了功率循环试验数据的威布尔分析方法, 分析了现有的典型模块寿命模型, 论述了寿命预测的方法: 将任务曲线转化成温度曲线, 利用雨流计数法, 根据线性疲劳损伤积累理论和寿命模型计算功率循环寿命。最后, 预测了应用于HXD1C电力机车的株洲南车时代电气股份有限公司 3 300 V/1 200 A IGBT 模块的功率循环寿命。

关键词: IGBT 模块; 可靠性; 功率循环试验; 失效机制; 寿命预测

中图分类号: TN34

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2013)02-0013-05

Lifetime Prediction of Power IGBT Module

WANG Yan-gang, Chamund Dinesh, LI Shi-ping, Jones Steve, DOU Ze-chun, XIN Lan-yuan, LIU Guo-you

(Power Semiconductor R&D Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Lincoln, LN6 3LF, United Kingdom)

Abstract: The Weibull methodology for power cycling test data and some reported typical lifetime models were firstly discussed. Then, lifetime prediction procedures were presented including the conversion of mission profile to temperature profile, the temperature cycles counting by Rainflow algorithm, and lifetime calculating based on the fatigue linear accumulation damage theory and lifetime models. Lastly, as an example, power cycling lifetime of 3 300 V/1 200 A IGBT modules manufactured by Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., subjected to the application of HXD1C locomotive was predicted.

Key words: IGBT module; reliability; power cycling test; failure mechanism; lifetime prediction

0 引言

目前, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 模块已经广泛应用于各种电力电子设备中, 如传统的工业变流装置, 电源和牵引传动等系统, 以及新的应用系统如可再生能源开发和电动交通工具等^[1-3]。

IGBT 模块的可靠性是制造商和应用者密切关注的问题之一。为满足新的应用系统需求, 制造者要不断地研究新型的模块结构、开发新型的封装材料、提高工艺水平并探索新的制造工艺; 应用者则更加关注模块在应用条件下的工作寿命; 在系统设计阶段, 人们希望准确地评估模块寿命。

IGBT 模块可靠性问题的根源在于热应力引起的材料机械变形, 这是一个热-机械过程。工作中, IGBT 的通态损耗和开关损耗引起器件结温上升, 随输出功率不同, 损耗功率也不一样, 使器件不断地经历温度循环过程。IGBT 模块是不同材料封装在一起的多层结构,

由于热膨胀系数 (CTE: Coefficient of Thermal Expansion) 的差别, 不同材料在温度循环过程中的膨胀不同, 使材料受到不同程度的压缩或拉伸应力。这种应力将首先破坏模块的连接部分, 如焊层、引线和端子焊点等处, 进而使模块失效^[3]。

为了评估 IGBT 模块的可靠性和寿命, 制造商一般进行加速老化试验, 如功率循环 (PC: Power Cycling) 和温度循环 (TC: Temperature Cycling) 试验。前者通过模块自身功率损耗产生温度循环, 模拟模块工作条件下的可靠性, 后者通过环境温度改变产生温度循环, 模拟应用场所气候条件和存储环境下的稳定性^[4]。根据试验数据和失效机制, 人们提出了一系列 IGBT 模块寿命模型^[5-8], 并发现模块失效前经历的温度循环周期数 (N_f) 由结温变化幅度 (ΔT_j)、最高结温 ($T_{j\max}$, 或平均结温 T_{jm})、最低外壳温度 ($T_{c\min}$) 及周期导通时间 (t_{on}) 等因素决定^[5-8]。要加速模块失效, 试验条件一般比工作条件差很多, 因此寿命预测在保证失效机制相同的条件下, 利用寿命模型进行外推。

预测应用状态下模块的工作寿命,除寿命模型外,还要知道任务曲线 (Mission Profile)^[9],通过该曲线,计算模型数据,可作出寿命预测。

本文讨论 IGBT 模块功率循环数据的分析方法,典型的寿命模型;研究模块寿命预测过程,包括线性疲劳损伤积累理论和任务曲线的讨论,由任务曲线获得温度曲线,温度曲线的处理方法—雨流法;最后对应用于 HXD1C 电力机车逆变器系统的株洲南车时代电气股份有限公司 (以下简称南车时代电气) 3 300 V/1 200 A IGBT 模块的功率循环寿命进行预测。

1 试验数据分析

可靠性试验可以获得特定样品在试验条件下的寿命,然而,一类产品的可靠性是全部产品可靠性数量指标的总称,产品的可靠性或寿命是在进行一系列试验及数据统计分析后得到的。由于失效具有随机性的特点,讨论可靠性的数量特征时,必须用概率论和数理统计方法。此外,由于制造过程中工艺水平的影响,同批产品的质量也存在一定程度的不一致性,造成产品可靠性和寿命具有统计分布的特性。因此,可靠性试验数据分析要利用概率统计方法,以获得产品可靠性的数量指标,估计该类产品的寿命。

目前,威布尔(Weibull)分布函数是失效数据分析中应用最广泛的函数之一,它非常适用于机械、电气、电子和材料的失效研究。Weibull 模型根据最薄弱环节模型或串联模型得到,能够反映材料缺陷和应力对材料疲劳寿命的影响^[10]。IGBT 模块失效由电子、材料等部分的失效引起,其寿命分布可以用两参数 Weibull 统计分布来描述,其累积失效率由下式表示:

$$F(x, \lambda, \beta) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

对 PC 试验, x 表示失效的周期数; λ 为尺度参数,表征分布的范围; β 是形状参数,表征曲线的基本形状,是该分布的最重要参数。 β 由失效机制决定,不同的失效机制 β 不同, β 越大,试验数据越集中,表明失效更能够被某一种失效机制描述。Weibull 累积分布函数是扩展的指数分布函数,它与很多分布函数相关,如 $\beta=1$ 是指数分布, $\beta=2$ 则为瑞利分布。对式 (1) 变形,可以得到:

$$\ln[-\ln(1-F)] = \beta \ln(x) - \beta \ln(\lambda) \quad (2)$$

式 (2) 左边与 $\ln(x)$ 有线性关系,斜率是 β 。图 1 是某类 IGBT 模块 PC 试验的数据分析。要获得比较准确的分布曲线,则需进行 6

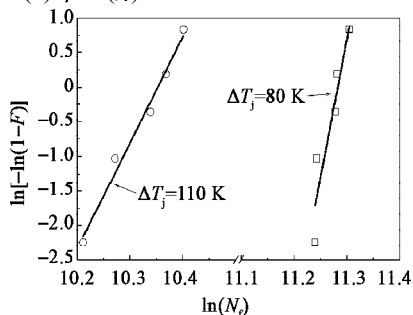


图 1 IGBT 模块 PC 寿命 Weibull 分析^[11]

个试验,直到 5 个样品失效。将 N_f 排序,计算相应的 F 作出图 1,对数据进行线性拟合,得到 λ 和 β 。

基于寿命的统计分布特性,通常采用累积失效率为 10% (或 5%, 1% 等) 的寿命作为模块在该试验条件下的寿命,称为 B_{10} 寿命 (或 B_5, B_1 等)。 B_{10} 寿命可以由 Weibull 曲线获得,或者通过式 (2) 计算。PC 试验所需的时间很长,实际中不太可能对同一类样品进行大量的试验,Weibull 分析可以消除样本数的限制,通过少量试验获得比较接近实际的统计分布,进而预测该类样品在试验条件下的失效率和寿命。图 1 中的数据比较集中, β 较大,说明该模块的失效机制单一,封装工艺水平较高且工艺过程控制得很好。

2 IGBT 模块功率循环寿命模型

模型是寿命预测的基础,是在产品失效的物理机制基础上,通过总结可靠性的试验数据得到的。一般电子产品的寿命至少在 10 年以上,试验时为使样品在相对较短的时间内失效,需要进行加速试验,即通过增高电压 (电场、电流) 和温度等,加快产品老化失效的进程。

IGBT 模块的薄弱环节是材料连接部分,其失效主要是由温度变化产生的热应力引起的材料疲劳和老化。通过 PC 试验,可以研究键合引线 (ΔT_j 决定)、芯片和绝缘衬底的焊接层 (ΔT_j 决定) 以及衬底和散热基板的焊接层 (ΔT_c 决定) 的可靠性。目前,PC 试验被广泛应用于 IGBT 模块的可靠性和寿命模型研究中^[3, 11]。基于失效物理机制,研究者提出了以下几种典型的寿命模型。

2.1 Coffin-Manson 模型

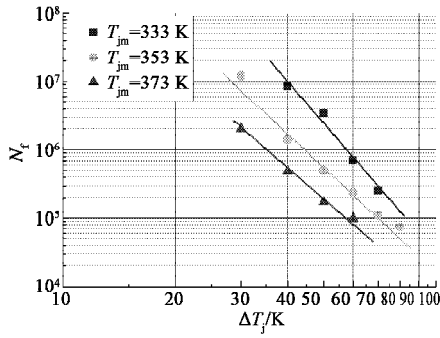
Coffin-Manson 方程曾经被广泛用于描述半导体模块 PC 过程的失效规律^[12]。该方程能很好地表征材料在周期性应力作用下发生疲劳及随疲劳程度增加而导致材料变形和断裂的过程。这个过程与 IGBT 模块失效过程一致,比如焊接层的疲劳破裂和键合引线的断裂等,其公式为:

$$N_f = \left(\frac{A}{\Delta T_j} \right)^n \quad (3)$$

其中 A 和 n 为常数,该模型认为寿命只由 ΔT_j 决定,没有反映绝对温度的影响,因而误差较大。

2.2 LESIT 模型

为了获得统一的标准 IGBT 模块寿命模型,瑞士开展了一个名为 LESIT 的研究项目^[5]。该项目测试了来自欧洲和日本不同厂家生产的模块,这些模块由标准工艺封装,采用有基板结构和非常相似的材料,绝缘衬底采用 Al_2O_3 。试验测量在不同 ΔT_j 和不同平均温度 ($T_m = T_{j \max} - \Delta T_j / 2$) 下的 PC 寿命数据如图 2。

图2 标准 IGBT 模块 PC 寿命试验数据^[5]

基于以上数据,项目组总结出以下标准IGBT模块寿命模型:

$$N_f = B(\Delta T_j)^{-\alpha} \exp\left(\frac{E_a}{kT_m}\right) \quad (4)$$

式中: B 和 α 为常数; E_a 为激活能; k 为玻尔兹曼常数; T_m 为平均温度, 单位为开尔文。参数拟合值分别为: $\alpha=5.039$, $E_a=9.89 \times 10^{-20} \text{ J}$, $B=302 \text{ 500 K}^\alpha$ 。

该模型包含 Coffin-Manson 模型和表征温度加速的 Arrhenius 关系, 比 Coffin-Manson 模型能更好地描述模块的失效机制。然而该模型不能反映焊料失效过程, 因为焊料的疲劳受周期时间和形状(温度保持时间、上升下降时间)的影响。因此, 有人提出采用 Norris-Landzberg 模型^[6, 8], 在式(4)中引入功率周期的频率因子 $f^{-\beta}$, 可以较好地反映焊料疲劳引起的失效。

2.3 CIPS08报道的多参数综合模型

随着封装技术的改进, IGBT 模块的寿命有了很大提高。焊料层疲劳成为与键合引线脱落同等重要的失效机制。2008年, Bayerer 等在分析大量不同模块 PC 数据的基础上, 提出了包含一系列影响因子的多参数模型^[7]:

$$N_f = K \Delta T_j^{\beta_1} \exp\left(\frac{\beta_2}{T_{j_{\min}} + 273}\right) t_{\text{on}}^{\beta_3} I^{\beta_4} V^{\beta_5} D^{\beta_6} \quad (5)$$

式中: $K, \beta_1 \sim \beta_6$ 为常数, 可以经过数据拟合提取; t_{on} 为 PC 过程中模块的导通时间, s; I 为每根键合引线通过的电流, A; V 为芯片的阻断电压, $\times 100 \text{ V}$; D 为引线直径, μm 。

相同封装技术的模块, 当额定电流电压相同时, 该模型与 Norris-Landzberg 模型相同。该模型也是基于 Al_2O_3 衬底的模块总结得出的, 预测 AlN 衬底模块的寿命可能存在较大误差。另外, 该模型是通过数据统计分析建立的, 缺乏比较确切的物理基础, 但能够在一定程度上较准确地计算不同厂家模块的寿命^[7]。

2.4 ABB 模块寿命模型

如前所述, IGBT 模块失效由几种不同机制导致, 如键合引线失效和焊料层失效等。上述模型是包含各种机制的综合模型, 不能反映不同机制单独作用时的寿命以及模块寿命由哪种机制控制。ABB 公司进行了大量的试验, 总结出模块键合引线、芯片焊料、衬底焊

料及端子的 PC 和 TC 寿命^[13]。ABB 的模块采用传统的封装结构, AlN 衬底和 AlSiC 基板, 是目前高功率 IGBT 模块较普遍采用的封装形式和材料, 因此其寿命模型对类似结构和材料的模块具有很大的意义。

3 IGBT 模块的寿命预测

为了选择合适的模块, 系统设计者需要考虑如额定电流、电压、输出功率、工作温度、频率、损耗(效率)、可靠性和寿命、尺寸、重量、价格等等因素。为了保持系统在工作期间的高可靠性, 模块寿命要大于系统的设计寿命。模块在系统应用条件下的寿命是非常重要的, 除模块自身的质量因素, 其工作状态和环境条件(任务曲线)也严重影响模块的寿命。因此, 寿命模型和任务曲线是进行模块寿命预测必须具备的因素。

3.1 寿命预测假设-功率循环的叠加效应

PC 试验得到不同 ΔT_j 下的模块寿命, 根据数据总结出 PC 寿命模型。应用中, 通常一个工作周期要经历不同的循环过程, 例如牵引机车在两站之间要经过启动、加速、匀速、上坡、下坡、减速和停止等不同的工作周期。这些小周期中模块的功率和损耗不同, 因此 ΔT_j 也不同。预测模块能工作多少个大的工作周期, 需要知道在这个大的周期内小的 PC 周期情况。

采用线性疲劳损伤积累理论即 Miner 定理, 可以预测不同 ΔT_j 周期的共同作用效果^[14]。假设一个大的工作周期包含 n 个小周期(如启动、加速、匀速、减速停止, 则 $n=4$), 对应不同的 ΔT_j , 由寿命模型计算 ΔT_j 对应的寿命 $N_f(\Delta T_j)$ 。在这样一个大的工作周期内, 模块寿命消耗的比例为:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_f(\Delta T_{j_i})} \quad (6)$$

若此工作周期内有 m 个相同的小循环, 则与该循环相对应项的分子为 m 。 R 的倒数为模块可以承受的大的工作周期的数目, 根据周期时间可以计算模块工作寿命。该方法假设不同 ΔT_j 的失效机制相同, 如果不同, 模块寿命由最快失效机制决定。

3.2 任务曲线 (Mission Profile)

任务曲线描述系统或产品在完成规定任务的周期内经历的事件和所处的环境条件, 规定任务如飞行器的飞行任务, 牵引机车或其他车辆的运输任务等。每一次任务中, 系统要经历速度、输出功率及环境条件等的变化。图3是一次飞行任务曲线, 它包括起飞、爬升、加速、巡航、下降、减速、着陆等过程。

在这个任务中, IGBT 模块在不同时期的输出电压、电流和频率都有变化, 导致模块的功耗随之变化, 功耗和环境温度变化使模块经历不同的温度循环。进行寿命预测需要将产品的任务曲线转换成温度曲线: 首先计算模块在每个功率周期内的功耗, 包括导通和开关损耗; 然后需要计算 IGBT 和续流二极管(FWD: Free

Wheeling Diode) 芯片的功耗, 以分别确定二者的温度曲线; 根据功耗和模块热阻计算芯片温度, 热阻可以基于 RC 网络 (Cauer 或 Foster 模型), 通过有限元模拟获得。

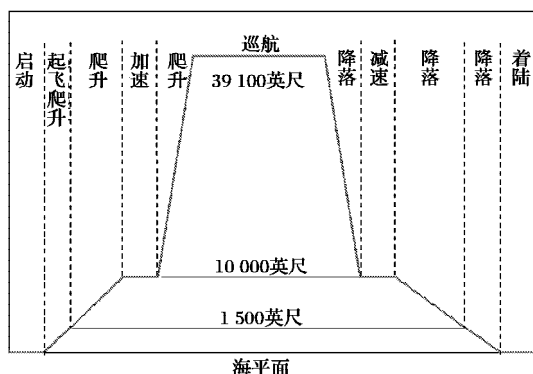


图3 飞机的飞行任务曲线

3.3 温度循环曲线的处理 - 雨流计数法(Rainflow Algorithm)

雨流法是疲劳设计和失效评定中应用最广泛的一种方法, 它对封闭的应力-应变迟滞回线逐个计数, 反映材料应力-应变过程产生的疲劳损伤。雨流法将一个多重应力过程产生的应变疲劳简化为一系列只包含单一应力作用的应变过程。采用 Miner 规则和雨流法, 可以估算系统在复杂工作状态下的疲劳寿命^[15]。

图4是雨流法处理温度循环过程的例子。工作任务中可能包含大量较小的 ΔT_j 和一些较大的 ΔT_j (如图4), 较小 ΔT_j 对模块造成的损害很小, 在分析时可以不予考虑。如利用 LESIT 模型预测模块寿命, 计算发现, $\Delta T_j < 10 \text{ K}$ 的循环对寿命预测的影响可以忽略。这样可以将实际温度曲线简化成比较规则的曲线, 采用雨流法对温度循环计数, 根据模型作出寿命预测。

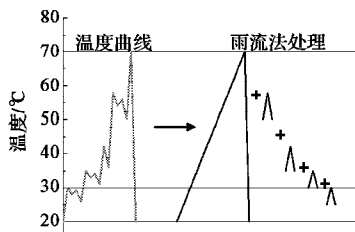


图4 雨流计数法分析温度曲线

表1是利用 LESIT 模型和雨流法计算 IGBT 模块在完成图4任务时的寿命, 可见 $\Delta T_j = 50 \text{ K}$ 的循环决定了模块寿命, 其他较小的温度周期对寿命影响非常小。

表1 LESIT 模型和雨流法预测 IGBT 模块寿命

ΔT_j	T_{jm}	周期	LESIT 模型	周期应力比	寿命影响率
50	45	1	5.04E06	1.98E-07	0.999 78
8	54	1	2.78E10	3.60E-11	1.81E-4
7	38.5	1	1.62E11	6.17E-12	3.11E-5
5	32.5	1	1.39E12	7.21E-13	3.63E-6
5	27.5	1	2.05E12	4.88E-13	2.46E-6
$N_f = 5.04E06$					

综上所述, IGBT 模块寿命预测的过程如图5所示。许多因素影响预测的准确性, 如寿命模型、功耗计算、热阻模拟等。

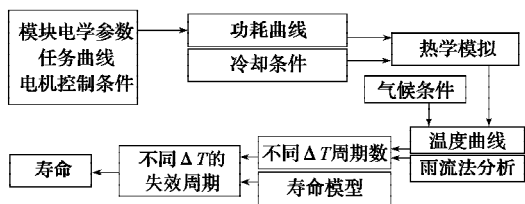


图5 IGBT 模块寿命预测流程

4 应用于HXD1C型电力机车的 IGBT 模块寿命预测

HXD1C 型电力机车由南车株洲电力机车有限公司研制, 是大功率交流传动干线重载货运运用6轴电力机车, 其持续功率7 200 kW, 最高运行速度120 km/h。每台机车配2台由南车时代电气研制的TGA9型VVVF主变流器。每台主变流器由三重四象限整流器、1个中间直流环节和3个PWM逆变器组成, 四象限整流器和PWM逆变器由水冷IGBT变流模块(3 300 V/1 200 A)组成。

3 300 V/1 200 A IGBT模块由南车时代电气自主研制, 它包含3个独立的开关, 工作中并联使用; 采用软穿通IGBT芯片, 最高允许结温150℃。室温下的导通压降2.8 V, 栅源电压加15 V; 125℃时导通压降3.6 V, 开关功耗4 400 mJ, 最多能承受10 μs短路状态。其封装为传统结构, 绝缘衬底采用CTE与硅接近的AlN, 基板为CTE低、导热性好、密度小的AlSiC, 采用无铅焊料焊接, IGBT和FWD的结到外壳的热阻分别为8℃/kW和16℃/kW, 模块长和宽分别为190 mm和140 mm。该模块可以应用在高可靠性的逆变器、电机控制、机车牵引和斩波等系统中。有关该模块的详细数据资料请参照公司网站的产品介绍^[16]。

图6是HXD1C机车的等效运行图, 即任务曲线。假设该机车一天运行15 h, 其余9 h为入库休整时间, 3 h为一个运行周期, 一天经历5个运行周期。每周都经历图6所示的过程。

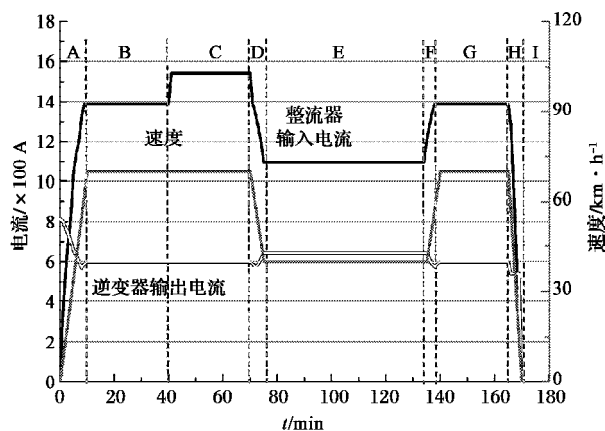


图6 HXD1C 机车等效运行周期的工作状态

A: 启动过程, 逆变器启动电流814 A, 经过10 min 机车速度达到70 km/h。

B: 网压正常 (AC 25 kV), 以70 km/h恒速运行30 min, 进入恒功运行区段, 整流器输入电流和逆变器输出电

流都为额定值。

C: 网压最低(AC 22.5 kV), 以70 km/h运行30 min, 整流器输入电流线性增大到1 544 A, 逆变器输出电流不变。

D: 重载爬坡阶段, 速度从70 km/h降至40 km/h, 用时5 min。

E: 爬坡过程, 以40 km/h速度运行1 h, 逆变器输出电流增大。

F: 爬坡完成, 从40 km/h加速至70 km/h, 用时5 min。

G: 恒功运行, 速度70 km/h运行25 min。

H: 制动停车过程。

I: 停车10 min, 之后进入下一个运行周期。

根据工作状态、模块数据资料和热阻模型, 可以计算出模块温度曲线, 如图7, 采用雨流计数法处理, 得到温度曲线简化形式。

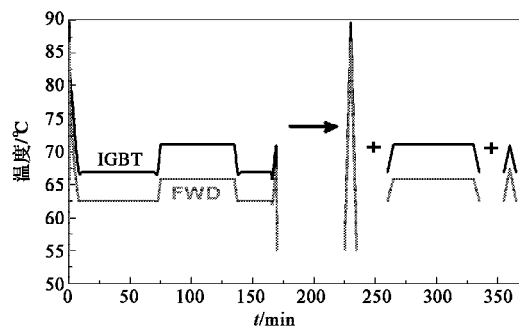


图7 HXD1C 机车等效运行周期的温度曲线和雨流法处理的等效曲线

目前, 南车时代电气正在进行该模块的PC和TC试验, 还没有相应的寿命模型。分别采用LESIT、CIPS08和ABB模型预测此模块在这个应用中的PC寿命, 结果见表2。ABB模型不但可以预测PC工作寿命, 而且能预测在环境温度影响下的TC寿命。由于此模块的封装技术、结构和材料与ABB模块相同, 认为ABB模型能比较准确地预测其寿命。根据ABB模型预测, 南车时代电气3 300 V/1 200 A IGBT模块在HXD1C机车逆变器系统中的功率循环寿命为51年, 可以很好地满足机车系统的寿命要求。

表2 HXD1C 电力机车逆变器系统所用3 300 V/1 200 A IGBT 模块功率循环寿命预测

	ΔT_j	T_{jm}	周期	LESIT模型	CIPS08模型	ABB模型
IGBT	35	72.5	1	5.02E06	3.62E05	键合引线 >1 000年
	4.1	69	1	3.06E11	1.58E09	芯片焊料 255年
	4	69	1	3.46E11	7.58E9	衬底焊料 51年
			N_f	5.02E06	3.62E05	
			寿命	2749年	198年	51年
FWD	31.5	70.8	1	9.48E06	5.77E05	键合引线 >1 000年
	4.9	65	1	1.59E11	7.57E08	芯片焊料 353年
	3.2	64	1	1.45E12	2.14E10	衬底焊料 60年
			N_f	9.48E06	5.76E05	
			寿命	5194年	316年	60年

需要指出的是, 一般寿命模型是根据PC试验数据得到, 而在试验中没有考虑如环境温度、振动、湿度及

其他因素对模块寿命的影响, 所以根据模型预测的寿命称为PC工作寿命。系统或模块在实际应用中, 还受到上述诸因素影响, 因此实际工作寿命比PC寿命小一些。但ABB模型增加了环境温度作用下的寿命预测, 其预测值与实际工作寿命更加接近。

5 结语

本文首先讨论了功率循环试验数据的威布尔分析方法, 论述了典型的寿命模型如Coffin-Manson、LESIT、CIPS08和ABB等模型, 然后讨论了寿命预测的过程, 最后以应用于HXD1C电力机车逆变器系统的南车时代电气3 300 V/1 200 A IGBT模块为例, 根据应用任务曲线和现有模型, 预测了模块的功率循环寿命。该模块的结构、封装技术和材料与ABB模块相同, 根据ABB模型预测结果, 可以认为它能够很好地满足机车系统的寿命要求。

参考文献:

- [1] Stockmeier T. From packaging to Un-Packaging-Trends in power semiconductor modules[C]//Power Semiconductor Devices and IC's, ISPSD'08, 20th International Symposium on. Orlando, Florida: The Printing House, Inc., 2008: 12-19.
- [2] Christmann A, Thoben M, Mainka K. Reliability of Power Modules in Hybrid Vehicles[C]//PCIM Europe. Nuremberg: Mesago PCIM, 2009.
- [3] Ciappa M. Selected failure mechanisms of modern power modules[J] Microelectronics Reliability, 2002, 42: 653-667.
- [4] Goehre J, Schimitz S, S-Ramelow M, Lang K-D. Reliability of Power Semiconductor Modules Combining Active and Passive Temperature Cycling[C]//PCIM Europe. Nuremberg: Mesago PCIM, 2012: 1611-1613.
- [5] Held M, Jacob P, Nicoletti G, Scacco P, Poech M H. Fast Power Cycling Test for IGBT Modules in Traction Application[C]//Proc Power Electronics and Drive Systems. Singapore: IEEE Service Center in New York, Piscataway NJ, 1997: 425-430.
- [6] Norris K C Landzberg A H. Reliability of controlled collapse interconnections[J] IBM Journal of Research and Development, 1969, 13(3): 266-271.
- [7] Bayerer R, Herrmann T, Lutz T, Lutz J, Feller M. Model of power cycling lifetime of IGBT Modules-Various Factors Influencing Lifetime[C]//Integrated Power Systems(CIPS), 2008 5th International Conference. Nuremberg: VDE Conference Publications, 2008.
- [8] Kovacevic I F, Drofenik U, Wolar J K. New Physical Model for Lifetime Estimation of Power Modules[C]//International Power Electronics Conference(IPEC). Sapporo: IEEE Conference Publications, 2010: 2106-2114.
- [9] Coquery G, Carubelli S, Ousten J P, Lallemand R, Lecoq F, Lhotellier D, de Viry V, Dupuy Ph. Power module lifetime estimation from chip temperature direct measurement in an automotive traction inverter[J] Microelectronics Reliability, 2001, 41(9-10): 1695-1700.
- [10] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability[J] Appl. Mech.-Trans. ASME, 1951, 18(3): 293-297.

(下转第27页)