



团 体 标 准

T/CES XXX-XXXX

功率模块功率循环试验 老化状态监测方法

Aging state monitoring method for power modules in power cycling tests

2025-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

前 言.....	2
1 范围.....	3
2 规范性引用文件.....	3
3 术语和定义.....	3
4 符号和缩略语.....	4
4.1 符号.....	4
4.2 缩略语.....	4
5 数据采集要求.....	4
5.1 基本要求.....	4
5.2 过程监测参数.....	5
5.3 测量精度.....	5
5.4 测量位置.....	5
5.5 测量环境条件.....	5
6 数据清洗方法.....	6
6.1 异常数据检测和处理.....	6
6.2 数据噪声处理.....	6
7 老化状态表征方法.....	6
7.1 健康基准模型.....	6
7.2 导通电阻变化量计算.....	6
7.3 失效阈值设定.....	7
8 监测报告.....	7
附录 A（规范性） IGBT 模块老化状态表征示例.....	8
参 考 文 献.....	10

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

本文件的发布机构提请注意，本文件涉及专利号为 202210524777.2《功率模块老化参数准在线辨识方法和结温校准方法及系统》的使用。

该专利持有人已向本文件的发布机构保证，文件的使用者可免费使用本专利。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案。相关信息可以通过以下联系方式获得：

专利持有人姓名：中国科学院电工研究所

地址：北京市海淀区中关村北二条 6 号

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会电动车辆工作组归口。

本文件起草单位：中国科学院电工研究所、中汽研新能源汽车检验中心（天津）有限公司、比亚迪汽车工程研究院、中国一汽研发总院、中国汽车工程研究院股份有限公司、北京纵横机电科技有限公司、工业和信息化部电子第五研究所、国家新能源汽车技术创新中心。

本文件主要起草人：仇志杰、温旭辉、郑丹、孔治国、凌和平、刘志强、晏飘、谢望玉、李文鹏、陈媛、郭大铭。

本文件为首次发布。

功率模块功率循环试验老化状态监测方法

1 范围

本文件规定了功率模块功率循环试验中的过程监测数据要求以及通过过程监测数据进行老化状态表征和失效阈值确定的方法。

本文件适用于键合型功率模块（包括 IGBT、MOSFET、二极管）功率循环试验的过程数据监测、数据处理及老化状态确定。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 4023 半导体器件 分立器件和集成电路 第 2 部分：整流二极管

GB/T 4937.34 半导体器件 机械和气候试验方法 第 34 部分：功率循环

GB/T 29332 半导体器件 分立器件 第 9 部分：绝缘栅双极晶体管（IGBT）

IEC 60747-8 半导体器件 分立器件 第 8 部分：场效应晶体管

IEC 60747-15—2010 半导体器件 分立器件 第 15 部分：绝缘功率半导体器件（Semiconductor devices - Discrete devices Part 15: Isolated power semiconductor devices）

3 术语和定义

GB/T 4023、GB/T 29332、IEC 60747-8 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

正向电流 **forward current**

沿着半导体器件正向流动的电流。

3.2

正向电压 **forward voltage**

正向电流流动在半导体器件两端产生的电压。

注：对于 IGBT 指集电极-发射极饱和电压 V_{CEsat} ，对于 MOSFET 指源-漏通态电压 $V_{DS(on)}$ ，对于二极管指正向电压 V_F 。

3.3

正向电压变化量 **forward voltage change**

当前状态下，正向电压（IGBT: V_{CEsat} ，MOSFET: V_{DS} ，二极管: V_F ）与其健康基准值之间的差。

3.4

负载电流 **load current**

功率循环试验过程中，用来引起器件芯片自发热的电流，即加热阶段的电流。

3.5

导通电阻变化量 **on-state resistance change**

正向电压变化量与负载电流之间的比值。

3.6

虚拟结温 **virtual junction temperature**

通过测量器件的热敏感电参数间接估计的芯片有源区温度。

3.7

最高结温 **maximum virtual junction temperature**

功率循环试验过程中，单次循环的虚拟结温最高值。

3.8

最低结温 **minimum virtual junction temperature**

功率循环试验过程中，单次循环的虚拟结温最低值。

3.9

循环温差 deviation of the virtual junction temperature

功率循环试验过程中，单次循环的虚拟结温最高值与最低值的差值。

3.10

(负载电流) 导通时间 on-time of load current

单次循环中，负载电流接通（加热阶段）的时长。

3.11

(负载电流) 关断时间 off-time of load current

单次循环中，负载电流切断（降温阶段）的时长。

3.12

循环次数 cycles

功率循环试验受试器件经历的负载电流加载和切断周期的总数。

3.13

主端子 main terminal

功率电路中具有高电位且承载主电流的端子。该端子可能含有一个以上物理形式的连接器。

[来源：IEC 60747-15—2010，3.2.3]

4 符号和缩略语

GB/T 4023、GB/T 29332、IEC 60747-8 界定的以及下列符号和缩略语适用于本文件。

4.1 符号

	名称	文字符号
4.1.1 电压	正向电压	V_{on}
	正向电压变化量	ΔV_{on}
4.1.2 电流	正向电流	I_{on}
	负载电流	I_L
	额定电流	I_N
4.1.3 电阻	导通电阻变化量	ΔR_{on}
4.1.4 温度	虚拟结温	T_{vj}
	最高结温	$T_{vj,max}$
	最低结温	$T_{vj,min}$
	循环温差	ΔT_{vj}
4.1.5 时间	(负载电流) 导通时间	t_{on}
	(负载电流) 关断时间	t_{off}
4.1.6 其他物理量	循环次数	N
	导通电阻温度系数	k_R

4.2 缩略语

IGBT：绝缘栅双极晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor）

MOSFET：金属氧化物半导体场效应晶体管（Metal-oxide-semiconductor Field-effect Transistor）

DUT：受试器件（Device Under Test）

AAKR：自联想核回归（Auto-associative Kernel Regression）

GPR：高斯过程回归（Gaussian Process Regression）

5 数据采集要求

5.1 基本要求

功率循环试验应依照 GB/T 4937.34 的要求实施，功率循环试验方法及试验过程中各参数的变化曲线如图 1 所示。功率循环试验及其过程监测数据的采集应符合下列要求：

- 试验设置时，允许分别调节各个 DUT 的栅极电压（IGBT: V_{GE} ，MOSFET: V_{GS} ）来获得所需的虚拟结温 T_{vj} 和循环温差 ΔT_{vj} ，但各个 DUT 的栅极电压仅允许设置在使 DUT 工作在饱和区的范围内，且在测试开始时设置一次并在试验过程中保持不变；
- 试验过程中，应保持负载电流 I_L 、导通时间 t_{on} 、关断时间 t_{off} 不变；
- 由老化引起的虚拟结温升高宜不超过功率模块允许工作温度范围；
- 每个循环周期都必须进行一组过程监测数据的采集和记录，同时应记录当前的循环次数；
- 当 DUT 为碳化硅 MOSFET 时，宜采用正向沟道加热、反向体二极管小电流压降作为热敏感电参数测温的模式实施功率循环试验。

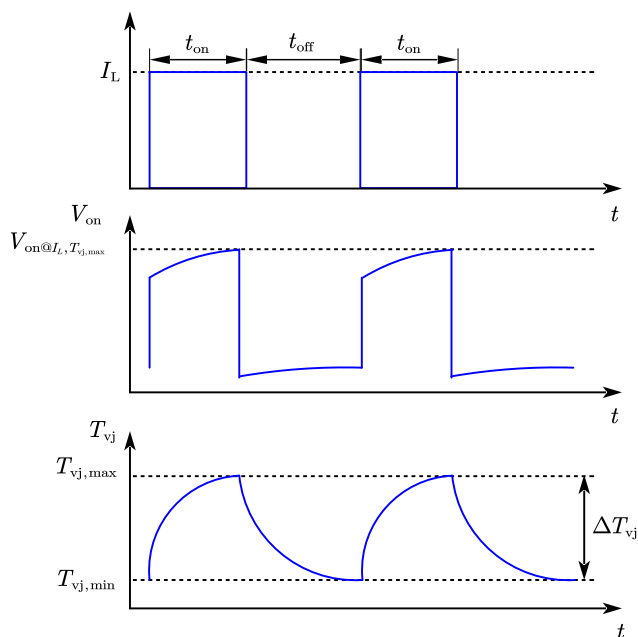


图1 功率循环试验方法及 I_L 、 V_{on} 和 T_{vj} 曲线

5.2 过程监测参数

为了进行键合线老化状态监测，功率循环试验过程监测参数应包括：

- 最高结温 $T_{vj,max}$
- 最低结温 $T_{vj,min}$
- 循环温差 ΔT_{vj}
- 负载电流切断前的正向电压 $V_{on@I_L, T_{vj,max}}$

5.3 测量精度

测量值的误差应满足表 1 中的规定。

表 1 参数测量误差

物理量	测量误差绝对值
电压	$\leq 2\%$
电流	$\leq 2\%$
虚拟结温	$\leq 2^\circ\text{C}$

5.4 测量位置

正向电压的测量线应接在功率模块的主端子。

5.5 测量环境条件

测量环境条件应满足表 2 中的规定。

表 2 测量环境条件

温度	23℃±5℃
湿度	RH=25%~75%

6 数据清洗方法

6.1 异常数据检测和处理

6.1.1 异常值检测方法

宜采用的异常值检测方法包括：

- 根据已有知识设定阈值来识别异常，如根据试验条件和 DUT 特性确定的结温、正向电压等参数的正常范围。
- 基于距离度量的方法，识别与其他数据点距离较远的点。
- 基于局部密度的方法，比较数据点的局部密度与其他点的局部密度，识别出局部密度较低的点。

6.1.2 异常值处理方法

宜采用的异常值处理方法包括：

- 使用前一个或者后一个不包含异常值的数据记录填充存在异常值的数据记录。
- 基于 K-最近邻（KNN）算法，使用 K 个最近邻数据的均值对异常值进行插补。

6.2 数据噪声处理

宜采用的数据噪声处理方法包括：

- 移动平均、指数平滑等滤波方法。
- 小波变换去噪方法。

7 老化状态表征方法

7.1 健康基准模型

取功率循环试验开始后前 1000 组过程监测数据作为健康状态过程监测数据，用回归方法建立健康状态下的 DUT 导通特性模型，健康状态下导通特性模型的表达式为：

$$V_{\text{on, Health}} = f(I_{\text{on}}, T_{\text{vj}}) \quad (1)$$

其中， I_{on} 的值取负载电流 I_L ，同一组监测数据中的 $T_{\text{vj,max}}$ 和 $V_{\text{on}@I_L, T_{\text{vj,max}}}$ 作为 $(T_{\text{vj}}, V_{\text{on, Health}})$ 的一个样本数据点。

可以使用如下回归方法建立健康状态下的 DUT 导通特性模型：

- 多元多项式回归模型，表达式为：

$$V_{\text{on, Health}} = \beta_0 + \beta_1 I_{\text{on}} + \beta_2 T_{\text{vj}} + \beta_3 I_{\text{on}} T_{\text{vj}} \quad (2)$$

- 非参数回归模型：如线性插值、多项式插值、自联想核回归（AAKR）、高斯过程回归（GPR）等。

7.2 导通电阻变化量计算

针对功率循环试验过程中的实时状态监测数据，按照下式计算当前的导通电阻变化量：

$$\Delta R_{\text{on}}(T_{\text{vj}}) = \frac{V_{\text{on}} - V_{\text{on, Health}}}{I_{\text{on}}} \quad (3)$$

其中， I_{on} 的值取负载电流 I_L ， T_{vj} 取当前监测数据中的 $T_{\text{vj,max}}$ ， V_{on} 取当前监测数据中的 $V_{\text{on}@I_L, T_{\text{vj,max}}}$ ，同时，将 I_{on} 和 T_{vj} 带入健康状态下导通特性模型 $f(I_{\text{on}}, T_{\text{vj}})$ 中，计算得到 $V_{\text{on, Health}}$ 。

使用如下表达式将当前监测数据下的导通电阻变化量 $\Delta R_{\text{on}}(T_{\text{vj}})$ 折算到同一参考温度下，

$$\Delta R_{\text{on}}(T_{\text{vj_ref}}) = \Delta R_{\text{on}}(T_{\text{vj}}) \frac{1 + k_R T_{\text{vj_ref}}}{1 + k_R T_{\text{vj}}} \quad (4)$$

其中， $T_{\text{vj_ref}}$ 为参考温度， k_R 为键合线温度系数，对于铝键合线， $k_R = 0.00429 / ^\circ\text{C}$ 。

7.3 失效阈值设定

计算导通电阻变化量的失效阈值的表达式为：

$$\Delta R_{\text{on_EOL}}(125^\circ\text{C}) = \frac{0.05V_{\text{on}}}{I_N} \quad (5)$$

其中， I_N 取数据手册中给出的功率模块额定电流， V_{on} 取 DUT 数据手册中提供的 125°C 温度、额定电流条件下的正向电压典型值。

某 IGBT 模块老化状态表征示例参见附录 A。

8 监测报告

监测报告至少应给出以下几个方面内容：

- (a) 试验对象信息（型号、唯一性标识等）；
- (b) 试验条件（栅极电压、负载电流、导通时间、关断时间等）；
- (c) 5.2 中规定的试验过程监测数据；
- (d) 循环次数；
- (e) 导通电阻变化量；
- (f) 失效阈值。

附录 A
(规范性)
IGBT 模块老化状态表征示例

A.1 总则

本示例中给出了一个 IGBT 模块功率循环试验键合线老化状态表征应用的示例。

A.2 功率循环试验过程监测数据

功率循环过程监测数据如图 A.1 所示。

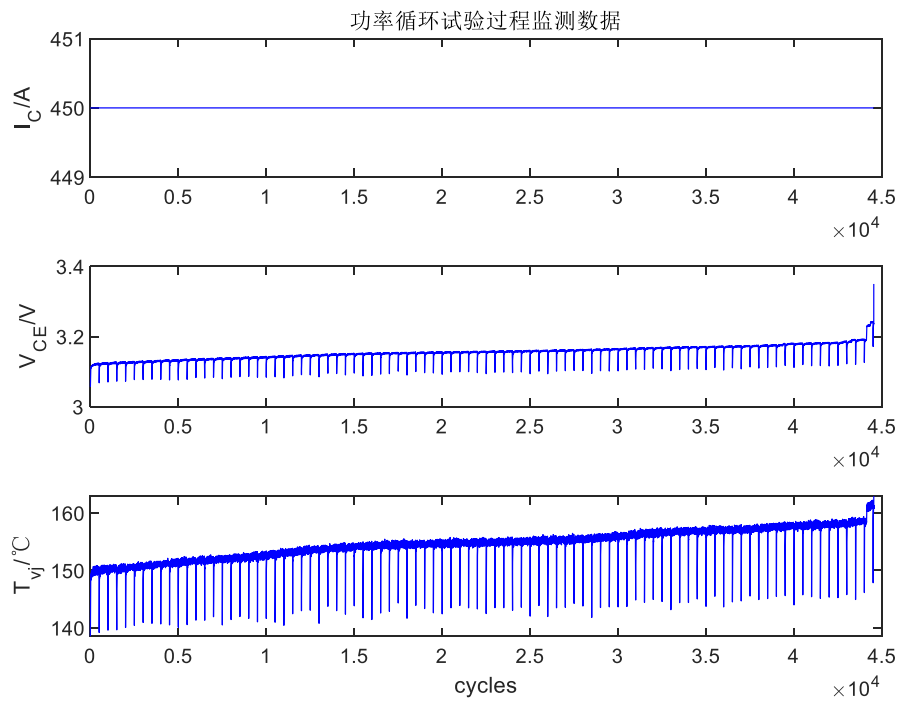


图 A.1 功率循环过程监测数据

A.3 IGBT 模块键合线老化状态表征

首先提取功率循环试验开始后前 1000 组过程监测数据，如图 A.2 所示。

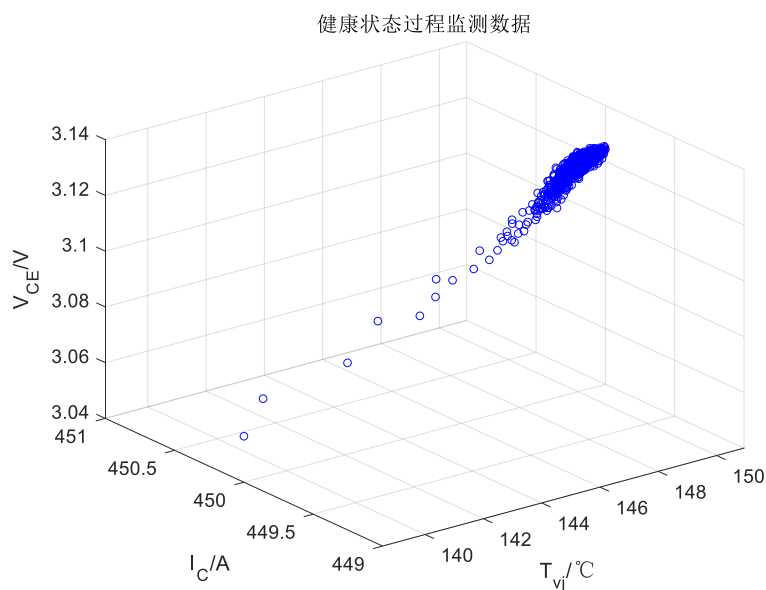


图 A.2 健康状态下的功率循环过程监测数据

由于功率循环试验过程中， I_C 保持不变，因此，使用线性模型拟合 V_{CEsat} 和 T_{vj} 的导通特性模型：

$$V_{CEsat, Health} = \beta_0 + \beta_1 T_{vj} \quad (A.1)$$

通过线性拟合得到式(A.1)中包含的系数 $\beta_0 = 2.2305$ ， $\beta_1 = 0.0059$ 。

根据数据手册，获得该款模块在 125°C 额定电流 $I_C = 450\text{A}$ 条件下的导通压降 $V_{CEsat} = 2.72\text{V}$ ，按照式(5)计算导通电阻变化量的失效阈值为 $\Delta R_{on_EOL}(125^\circ\text{C}) = 3.02 \times 10^{-4} \Omega$ 。按照式(3)计算功率循环试验过程的导通电阻变化量，并按照式(4)将其折算到 $T_{vj_ref} = 125^\circ\text{C}$ 。结果如图 A.3 所示。

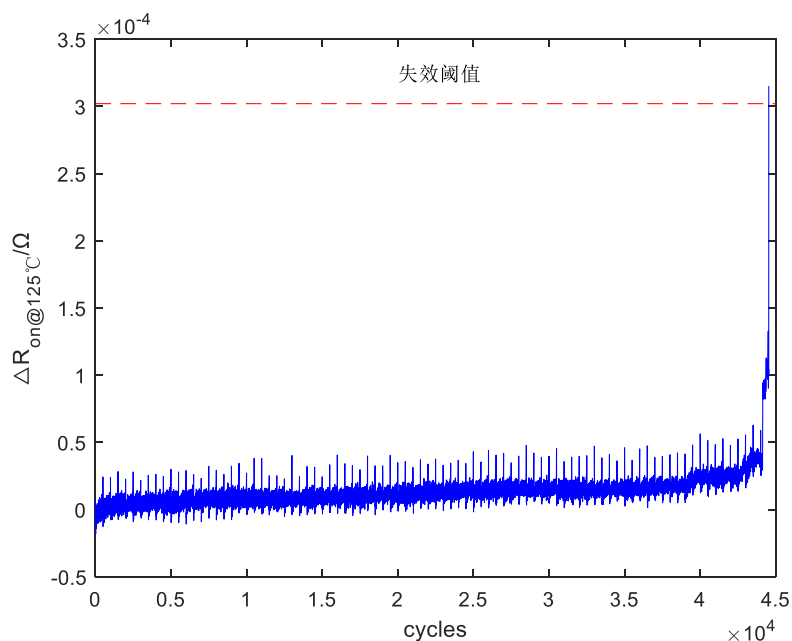


图 A.3 功率循环试验过程中的导通电阻变化量

参 考 文 献

- [1] GBT 22394.1-2015 机器状态监测与诊断 数据判断和诊断技术 第1部分 总则
 - [2] GBT 22394.2-2021 机器状态监测与诊断 数据判读与诊断技术 第2部分：数据驱动的应用
-