

# 团 体 标 准

T/CASAS 041—2025

---

## 基于感性负载的 SiC 功率模块老化筛选试验方法

SiC Power Module Variable-frequency aging test specification based  
on reactive load

2025 – 12 – 01 发布

2025 – 12 – 01 实施

---

第三代半导体产业技术创新战略联盟 发布

目 次

前言..... III

引言..... IV

1 范围..... 5

2 规范性引用文件..... 5

3 术语和定义..... 5

4 试验装置..... 6

    4.1 装置硬件组成..... 6

    4.2 装置技术要求..... 7

5 试验方法..... 8

    5.1 目的..... 8

    5.2 试验条件..... 8

        5.2.1 概述..... 8

        5.2.2 逆变工况..... 9

            5.2.2.1 逆变工况试验条件..... 9

            5.2.2.2 逆变工况波形..... 9

        5.2.3 堵转工况..... 9

            5.2.3.1 堵转工况试验条件..... 9

            5.2.3.2 堵转工况波形..... 10

        5.2.4 典型试验条件举例..... 10

    5.3 测试流程..... 11

        5.3.1 测试流程图..... 11

        5.3.2 测试步骤..... 12

            5.3.2.1 选择被测样品..... 12

            5.3.2.2 初始值测量..... 12

            5.3.2.3 老化试验系统参数设置..... 12

            5.3.2.4 安装被测样品..... 12

            5.3.2.5 低压验证测试..... 12

            5.3.2.6 老化试验系统预热..... 12

            5.3.2.7 SVPWM 发波测试..... 13

            5.3.2.8 被测样品卸载..... 13

            5.3.2.9 终点测量..... 13

            5.3.2.10 数据记录与处理..... 13

    5.4 初始/终点测量..... 13

6 失效判定与数据处理..... 13

    6.1 失效判定..... 13

    6.2 数据处理..... 14

7 测试报告..... 14

附 录 A （规范性） SiC 功率模块无功老化筛选试验记录表 ..... 16

附 录 B （规范性） 模拟电机控制算法 ..... 17

    B.1 控制算法..... 17

    B.2 测试电路拓扑..... 17

附 录 C （规范性） 威布尔分布模型在早期失效中的应用..... 19

    C.1 威布尔分布模型..... 19

    C.2 形状参数  $\beta$ ..... 19

    C.3 尺度参数  $\eta$  ..... 19

    C.4 联合影响..... 19

    C.5 总结 ..... 19

参考文献 ..... 20

## 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》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由第三代半导体产业技术创新战略联盟（CASA）制定发布，版权归CASA所有，未经CASA许可不得随意复制；其他机构采用本文件的技术内容制定标准需经CASA允许；任何单位或个人引用本文件的内容需指明本文件的标准号。

本文件起草单位：智新半导体有限公司、株洲中车时代半导体有限公司、重庆大学、长川半导体（深圳）有限公司、山东阅芯电子科技有限公司、忱芯科技（上海）有限公司、华中科技大学、工业和信息化部电子第五研究所、智新科技股份有限公司、东风汽车集团有限公司研发总院、北京大学东莞光电研究院、岚图汽车科技有限公司、中国第一汽车集团有限公司研发总院、武汉大学、芯派科技股份有限公司、杭州三海电子科技股份有限公司、杭州长川科技股份有限公司、深圳市禾望电气股份公司、龙腾半导体股份有限公司、上海瞻芯电子科技股份有限公司、化合积电（厦门）半导体科技有限公司、杭州士兰微电子股份有限公司、湖北九峰山实验室、恩艾（中国）仪器有限公司、北京第三代半导体产业技术创新战略联盟。

本文件主要起草人：王民、焦双凤、余伟、李义、曾正、任春茂、钟锋浩、张文亮、余超群、毛赛君、陈材、陈媛、徐刚、王闻宇、张进、蔡丹丹、刘强、方程、李敏、巫世晶、陈志文、徐广文、谢峰、张孟杰、宋津生、黄海涛、张星、赵争力、袁俊、李东明、高伟。

## 引 言

碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管(SiC MOSFET)具有阻断电压高、工作频率高、耐高温能力强、通态电阻低和开关损耗小等特点,广泛应用于高频、高压功率系统中。自2017年特斯拉在其电动汽车逆变器中采用SiC MOSFET以来,SiC功率电子市场经历了显著的增长,预测至2029年,SiC器件市场总值将超过100亿美元,其中汽车和移动设备(Automotive & Mobility)市场占比为82%;2023年-2029年SiC功率器件市场年复合增长率为25%。预计电动汽车市场,包括插电式混合动力汽车(PHEV)和纯电动汽车(BEV),将占据SiC功率器件市场的主导地位。

在电驱驱动应用中,由于电机是感性负载,SiC功率器件作为开关器件进行变流输出,会出现额定、峰值、堵转等应用工况,感性负载的开关过程中,会产生反电动势,导致器件在关断时承受高电压应力。基于感性负载的SiC老化筛选试验通过模拟实际开关工况,在动态开关过程中器件产生电热应力,加速其潜在失效的暴露,筛选出浴盆曲线中早期失效的器件,保证出货产品的高可靠性。

早期失效筛选就是要诱发潜在缺陷提早失效,让器件提前进入稳定状态,最终让产品以规定的失效率水平,在规定的使用寿命内工作。在感性负载应用场景下,特别是电动汽车,传统的电驱动台架测试虽然可以模拟实际电机工况,但设备巨大,测试复杂;传统的双脉冲+短路+静态测试虽然能够完全表征器件的参数,但是无法模拟实际工况。在功率半导体测试领域,产业创新形成了基于无功负载的汽车功率模块变频测试,以三相电抗器替代电机,实现对功率模块实际运行工况的模拟和前期筛选,很大程度上提升了交付到新能源汽车客户手中的良率。

由于国际上尚未有人提出相关测试方法,而功率模块和电驱动产业在中国发展速度最快,应用最广,技术水平已经达到全球领先的程度,因此有必要针对SiC功率模块的老化筛选确定标准和方法。

本文件给出了基于感性负载的SiC功率模块老化筛选试验方法。

# 基于感性负载的 SiC 功率模块老化筛选试验方法

## 1 范围

本文件描述了包含SiC MOSFET的功率半导体模块（以下简称“模块”）的基于感性负载的变频输出的筛选试验方法，包括：试验装置、试验方法、失效判定与数据处理、测试报告。

本文件适用于SiC MOSFET等功率半导体模块的变频输出测试。

本文件适用于三相逆变拓扑电路应用的功率模块筛选（其他拓扑电路应用亦可参考使用）。

本文件也适用于分立器件的筛选测试。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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。

T/CASAS 006—2020 碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管通用技术规范

## 3 术语和定义

T/CASAS 006 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**感性负载老化** inductive load aging

以感性负载作为负载主体时，对功率器件/模块进行的电流持续输出测试，从而使缺陷在短时间内暴露的试验方法。

注：感性负载老化也称为无功老化。

### 3.2

**逆变工况** inverter condition

将直流电转换成交流电的过程。

### 3.3

**堵转工况** locked rotor condition

电机转速为0时，一定时间内母线端子上仍然有足够电压保证扭矩输出的一种工作情况。

### 3.4

**母线电压** bus voltage

$V_{dc}$

直流电源施加到母线电容两端提供给功率模块的电压。

### 3.5

**空间矢量脉宽调制** space vector pulse width modulation; SVPWM

基于空间矢量的脉宽调制方法。

注：多用于电机控制。

### 3.6

**开关频率** switching frequency

$F_{sw}$

将信号负载到一个固定频率的波上，这个过程称为加载，这样的一个频率被称为开关频率。

3.7

输出频率 output frequency

$F_{out}$

输出信号的频率。

3.8

输出电流 loading current

$I_L$

模块正常工作时，输出端子上的电流有效值。

3.9

峰值电流 peak current

$I_{peak}$

规定工况下，模块内部芯片能正常工作的最大电流。

3.10

总谐波畸变率 total harmonics distortion

$THD$

周期性交流量中的谐波含量的方均根值与其基波分量的方均根值之比。

注：用百分数%表示。

3.11

冷却液流量 cooling liquid flux

$\Delta V/\Delta t$

单位时间内流过冷却水道的流量。

3.12

冷却液温度 liquid flux temperature

$T_F$

冷却液的温度。

4 试验装置

4.1 装置硬件组成

感性负载老化筛选试验系统应能够为SiC功率模块提供合适的电热应力条件，其硬件电路示意图如图1所示。

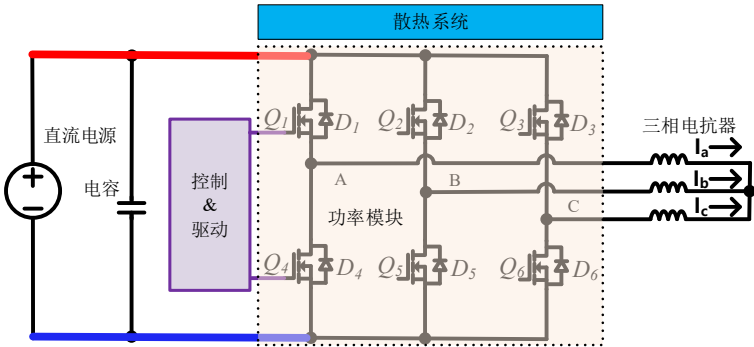


图1 感性负载老化筛选试验系统硬件电路示意图

基于感性负载的SiC功率模块老化测试样品和装置的构成，包括器件、封装、热沉以及夹具等都会对测试结果有显著的影响。测试的设置应尽可能反映产品的实际状态。

试验系统主要包括以下部分：

- a) 直流电源：直流电源应当为可调电源，能够覆盖功率模块老化所需的电压、电流的工况范围。
- b) 母线电容：母线电容的电压等级和容值应当满足测试要求；
- c) 功率模块装载子系统：为被测器件提供合适的老化物理试验条件，被测器件可以是全桥模块、半桥模块、分立器件或者其组合；
- d) 散热系统：包括水冷装置或其他冷却方式，制冷方式的选择取决于测试样品和测试要求；
- e) 控制&驱动系统：用于数据采集、输出控制、数字信号和驱动信号的转换等等；
- f) 三相电抗器：提供感性负载替代电机。
- g) 保护系统，包括硬件保护和软件保护。

基于感性负载的SiC功率模块老化测试样品和装置的构成，包括器件、封装、热沉以及夹具等都会对测试结果有显著的影响。测试的设置应尽可能反映产品的实际状态。

## 4.2 装置技术要求

测试装置应至少满足以下要求：

- a) 能够提供所需的散热环境和电压电流，能够覆盖SiC MOSFET模块的工作温度和电压电流范围；
- b) 具备可靠的温度控制和监测能力，确保试验过程中温度稳定性和可重复性；
- c) 配备精确的电参数测量系统，能够实时记录关键电气特性参数，如 $V_{GS}$ 、 $V_{DS}$ 、 $I_L$ 等；
- d) 具备完善的数据采集和分析功能，方便试验结束后续的失效分析。

所使用试验装置的关键部件技术要求如下：

- a) 直流电源：
  - 1) 具备基本的恒压输出模式，输出的电压和电流范围应该覆盖 SiC MOSFET 器件试验所需的额定值；
  - 2) 具备基本的保护功能，例如过压、过流、过温等，确保试验安全；
  - 3) 输出纹波和噪声应该控制在较低水平，以免影响器件的性能测试；
  - 4) 输出以及测量的分辨率、精度等应该保证在较高的水平（例如 2000 V 量程范围下，分辨率优于 10V，精度优于 $\pm 0.3\%+10V$ ），以确保试验结果的准确性。
- b) 散热系统：
  - 1) 应使用具有良好温度控制能力的水冷或者油冷设备，能在广泛的温度范围内（例如 0℃—85℃）提供恒定和均匀的冷却环境；
  - 2) 应具备快速升温 and 降温的能力，以缩短试验周期；
  - 3) 温度波动度应优于 3℃，温度容许偏差应优于 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，升温速率应优于 30℃/min，并能实时监测和记录环境温度数据；
  - 4) 具备基本的保护功能，确保试验安全。
- c) 测量设备或测量系统：
  - 1) 包括但不限于高分辨率及高精度的示波器、电流表、电压表、温度传感器、精密源测量单元等，能够准确记录相关的试验数据，包括温度、试验时间、电参数测试信息和结果；
  - 2) 测量设备应具有良好的抗干扰性，避免受试验环境干扰而产生测量误差；
  - 3) 测量设备应能实时记录、存储备份实验数据，避免意外情况导致长时间测试的数据保存问题。
- d) 驱动控制系统



驱动控制系统具备将动力电池的直流电通过功率半导体器件转换为三相交流电，并基于传感器反馈的实时数据（电流、转速、温度等），采用矢量控制或直接转矩控制算法，精确调节三相电流的输出。

e) 三相电抗器

此感性负载为星形(Y)接法的三相电抗器负载，感量根据实际测试工况选择满足 SiC 功率模块测试工况。

为确保试验过程的标准化和可重复性，建议采用专门为 SiC MOSFET 老化筛选试验设计的标准化试验系统，该系统包含了上述各关键组成部分，具有良好的温度控制和关键电学参数（例如 $R_{DS(on)}$ 、 $V_{GS(th)}$ 、 $I_L$ 等）在线监测能力。SiC MOSFET 试验装置使用前应进行全面的校准，确保各项性能指标符合要求。在试验过程中，应定期检查和维护试验装置，及时发现并解决可能出现的问题，确保试验数据的准确性和可靠性。

## 5 试验方法

### 5.1 目的

传统量产测试筛选通过的器件在变频应用中仍有较高的失效率，这对于高品质要求的使用场景是无法接受的，例如电动汽车主驱逆变器。

为了进一步降低功率半导体器件的失效率，业界发现给功率半导体器件施加与逆变器工况类似的应力可以有效筛选具有早期缺陷的器件。为了能模拟逆变器应用工况的真实应力，理想的方式是将被测器件放置在逆变器中并令其驱动电机。但实现这种方式需要的硬件成本较高，不适合量产筛选测试。近年来，业界提出了一种简化的逆变器应力模拟系统，也就是基于感性负载的无功老化筛选方法。该方法是在逆变器的输出端接一个三相电抗器，用来模拟电机的定子。测试时功率器件工作在脉宽调制模式，因此可以近似模拟出逆变器应用工况。逆变应用感性负载老化测试装置硬件成本低，测试耗能少，适合于量产筛选测试。

感性负载的老化筛选试验可以近似地模拟出功率半导体器件在电机驱动中的应用工况，包括：逆变工况（额定工况和峰值工况）和堵转工况。

实现该方法所需要的测试系统成本低，非常适合量产测试。使用该方法对功率器件进行量产筛选测试，可以将缺陷器件筛选掉，从而提升器件的整体良率。

### 5.2 试验条件

#### 5.2.1 概述

模块感性负载老化筛选试验的条件通常由逆变额定工况、逆变峰值工况、堵转工况组成，如表1所示。

试验方案按照3种工况组合而成，如a秒逆变额定工况、b秒逆变峰值工况、c秒堵转工况，a、b、c不同试验时间可组成一个单循环；可设置循环数m，组合成一个完整的试验条件。

表1 感性负载老化筛选试验项目组成

| 序号 | 试验项目   | 说明                 | 试验条件                             |
|----|--------|--------------------|----------------------------------|
| 1  | 逆变额定工况 | 模拟电动汽车逆变器额定工况下工作状态 | 直流母线电压，开关频率，输出频率，额定电流有效值，水流量，水温等 |
| 2  | 逆变峰值工况 | 模拟电动汽车逆变器峰值工况下工作状态 | 直流母线电压，开关频率，输出频率，峰值电流有效值，水流量，水温等 |

| 序号 | 试验项目 | 说明       | 试验条件                            |
|----|------|----------|---------------------------------|
| 3  | 堵转工况 | 模拟电机堵转状态 | 直流母线电压，堵转开关频率，堵转角度，堵转电流，水流量，水温等 |

5.2.2 逆变工况

5.2.2.1 逆变工况试验条件

逆变工况试验条件如表2所示。

表2 感性负载老化筛选试验-逆变工况条件

| 试验条件参数                                                                   | 试验要求                             |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 试验时间 (t)                                                                 | $t \geq 1s$                      |
| 冷却液温度 ( $T_F$ )                                                          | $T_F \geq$ 客户指定温度                |
| 母线电压 ( $V_{DS}$ )                                                        | $V_{DS} \geq$ 客户指定电压             |
| 冷却液流量 $\Delta V/\Delta t$                                                | $\Delta V/\Delta t =$ 客户指定冷却液流量  |
| 开关频率 ( $F_{SW}$ )                                                        | $F_{SW} \geq$ 客户指定开关频率           |
| 输出电流 ( $I_L$ )                                                           | 三相输出电流有效值 $I_L \geq$ 客户指定输出电流有效值 |
| 输出频率 ( $F_{out}$ )                                                       | $F_{out} =$ 客户指定的输出频率            |
| 注1：最大电压过冲不大于 $V_{DS,max}$ 。<br>注2：建议试验过程实时监测SiC MOSFET模块温度的变化，可以是结温或者壳温。 |                                  |

5.2.2.2 逆变工况波形

逆变工况波形如图2所示。

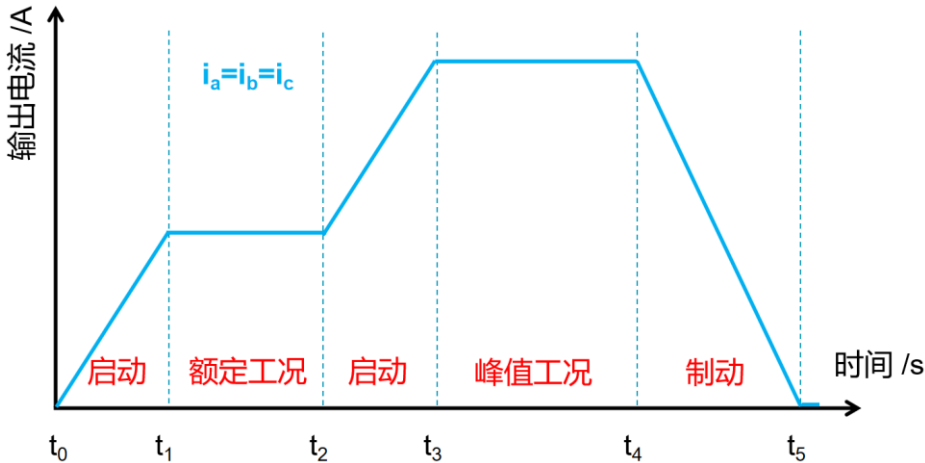


图2 逆变工况输出电流变化过程实例

5.2.3 堵转工况

5.2.3.1 堵转工况试验条件

堵转工况试验条件如表3所示。

表3 感性负载老化筛选试验-堵转工况条件

| 试验条件参数                                                                      | 试验要求                            |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 试验时间 (t)                                                                    | $t \geq 1\text{ s}$             |
| 冷却液温度 ( $T_F$ )                                                             | $T_F \geq$ 客户指定温度               |
| 母线电压 ( $V_{DS}$ )                                                           | $V_{DS} \geq$ 客户指定电压            |
| 冷却液流量 $\Delta V/\Delta t$                                                   | $\Delta V/\Delta t =$ 客户指定冷却液流量 |
| 开关频率 ( $F_{SW}$ )                                                           | $F_{SW} =$ 客户指定开关频率             |
| 堵转角度 $\theta$                                                               | 堵转角度 $\theta =$ 客户指定堵转角度        |
| 输出电流 ( $I_L$ )                                                              | 堵转输出电流 $I_L \geq$ 客户指定输出电流      |
| 输出频率 ( $F_{out}$ )                                                          | $F_{out} =$ 客户指定的输出频率           |
| 注1: 最大电压过冲不大于 $V_{DS,max}$ 。<br>注2: 建议试验过程实时监测SiC MOSFET模块温度的变化, 可以是结温或者壳温。 |                                 |

5.2.3.2 堵转工况波形

堵转工况波形如图3所示。

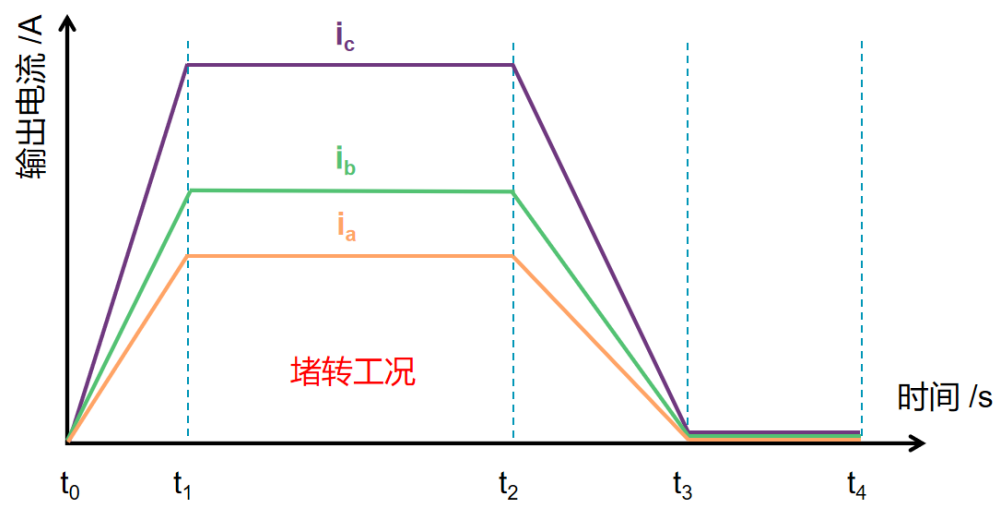


图3 堵转工况输出电流变化过程实例

5.2.4 典型试验条件举例

表4、表5显示了以器件型号ZM600FB12W3（东风汽车智新半导体6颗并联SiC方案）为例的逆变工况、堵转工况的一个典型试验条件。

表4 逆变工况的典型试验条件示例

| 试验条件参数            | 试验要求（模块类型：ZM600FB12W3） |
|-------------------|------------------------|
| 试验时间 (t)          | 30 s                   |
| 冷却液温度 ( $T_F$ )   | 65 ℃                   |
| 母线电压 ( $V_{DS}$ ) | 850 V                  |

| 试验条件参数                                                                   | 试验要求（模块类型：ZM600FB12W3） |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 冷却液流量 $\Delta V/\Delta t$                                                | 10 L/min               |
| 开关频率( $F_{SW}$ )                                                         | 3 kHz                  |
| 输出电流( $I_L$ )                                                            | 450 Arms               |
| 输出频率( $F_{out}$ )                                                        | 300 Hz                 |
| 注1：最大电压过冲不大于 $V_{DS,max}$ 。<br>注2：建议试验过程实时监测SiC MOSFET模块温度的变化，可以是结温或者壳温。 |                        |

表5 堵转工况的典型试验条件示例

| 试验条件参数                                                                   | 试验要求（模块类型：ZM600FB12W3） |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 试验时间（t）                                                                  | 15 s                   |
| 冷却液温度（ $T_F$ ）                                                           | 65 °C                  |
| 母线电压( $V_{DS}$ )                                                         | 850 V                  |
| 冷却液流量 $\Delta V/\Delta t$                                                | 10 L/min               |
| 开关频率( $F_{SW}$ )                                                         | 3 kHz                  |
| 输出电流( $I_L$ )                                                            | 450 Arms               |
| 堵转角度( $\theta$ )                                                         | 60°                    |
| 输出频率( $F_{out}$ )                                                        | 0 Hz                   |
| 注1：最大电压过冲不大于 $V_{DS,max}$ 。<br>注2：建议试验过程实时监测SiC MOSFET模块温度的变化，可以是结温或者壳温。 |                        |

5.3 测试流程

5.3.1 测试流程图

测试流程如图4所示。

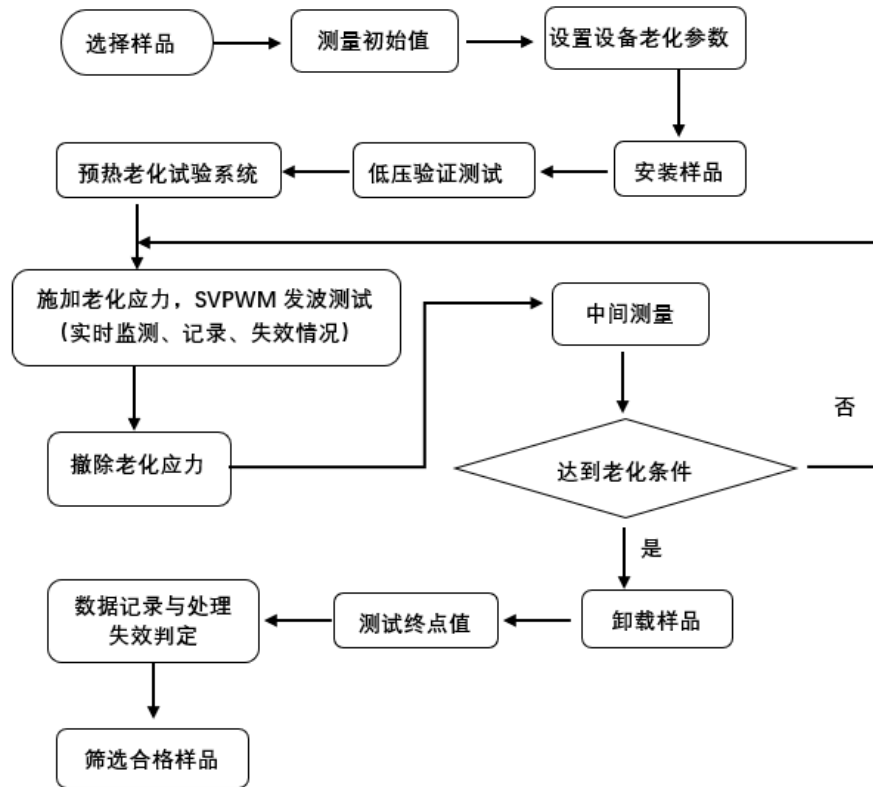


图4 老化筛选测试流程图

### 5.3.2 测试步骤

#### 5.3.2.1 选择被测样品

确认被测样品及数量后，清洗样品表面污染物，选择适当的夹具。

#### 5.3.2.2 初始值测量

对被测样品进行初始电特性测试，包括常温及高温（建议温度值需明确）条件下的动静态参数测试，优先执行高温测试以筛选不良。

#### 5.3.2.3 老化试验系统参数设置

确定三相电抗器（本文件中替代电机功能）的电流采集方案，采用两相直接采集、第三相间接计算的方式。

确定逆变额定工况、逆变峰值工况、堵转工况的老化条件，设置a、b、c、m等参数。

#### 5.3.2.4 安装被测样品

安装被测样品至老化筛选试验系统的夹具上。

需要保证夹具不会形成对被测样品的二次伤害。

#### 5.3.2.5 低压验证测试

设置低压验证测试的参数，验证被测样品功能正常性及设备电气连接可靠性。

#### 5.3.2.6 老化试验系统预热

建立并稳定冷却系统流量与温度（需补充具体参数，如流量范围、温度阈值）待参数稳定后，逐步建立母线电压（需补充电压范围及上升速率），在设备预热阶段，被测样品全程保持关断状态。

5.3.2.7 SVPWM 发波测试

按照设置的老化试验条件，开展SVPWM发波测试。测试中，记录相关试验数据，包括不限于总谐波畸变率等。

5.3.2.8 被测样品卸载

感性负载无功老化试验系统测试完成后，执行以下操作：

- a) 确认母线残压≤安全阈值（需补充具体数值）；
- b) 排空水冷板内残留液体；
- c) 断开样品与设备的连接，执行拆卸操作。

5.3.2.9 终点测量

电特性参数测试包括但不限于正偏压 $I_{GSS+}$ 、负偏压 $I_{GSS-}$ 、零栅压漏源漏电流 $I_{DSS}$ 、阈值电压 $V_{GS(th)}$ 、漏源极导通电阻 $R_{DS(on)}$ /导通电压 $V_{ds(on)}$ 、体二极管正向压降 $V_F$ 、击穿电压 $V_{BR}$ 等，根据测试结果筛选出不合格样品。

5.3.2.10 数据记录与处理

完整记录试验过程中的应力参数（如电压、电流、温度）、失效时间与失效量、监测数据及异常现象。

5.4 初始/终点测量

测量样品的静态电参数，包括但不限于栅源漏电流 $I_{GSS}$ 、漏源漏电流 $I_{DSS}$ 、阈值电压 $V_{GS(th)}$ 、漏源极导通电阻 $R_{DS(on)}$ 、体二极管正向压降 $V_F$ 、击穿电压 $V_{BR}$ 等，以客户规定的要求或者数据手册中规定的测试条件为准。

6 失效判定与数据处理

6.1 失效判定

器件完成感性负载无功老化试验和终点测量后，目视检查被测器件外观，若电学连接端子上出现压痕，或器件外壳出现脏污及变色，器件视为失效。

如果器件参数超过极限值，或按适用的采购文件和数据手册中规定的正常和极限环境中不能验证其功能时，器件视为失效。

如果产品失效是由于试验过程中试验人员操作不当、试验装置失效等非样品本身因素导致，则该失效不算做批次性失效，但必须详细记录失效情况并进行失效分析，在征得用户同意后，可重新选择样品进行该试验。

失效判据应包括但不限于表6 所示的参数，以客户要求和产品数据手册为基准。

表6 感性负载老化筛选试验的失效判据

| 参数       | 符号           | 失效判据（相对于初始值的变化率）                 |
|----------|--------------|----------------------------------|
| 漏-源极导通电压 | $V_{ds(on)}$ | 5 %或数据手册规定范围                     |
| 体二极管正向压降 | $V_F$        | 5 %或数据手册规定范围                     |
| 阈值电压     | $V_{GS(th)}$ | 5 %或数据手册规定范围                     |
| 零栅压漏源漏电流 | $I_{dss}$    | 500 %；若初始值 < 10 nA，则测试后不超过 50 nA |
| 栅源漏电流    | $I_{gss}$    | 500 %；若初始值 < 10 nA，则测试后不超过 50 nA |

| 参数     | 符号  | 失效判据（相对于初始值的变化率） |
|--------|-----|------------------|
| 总谐波畸变率 | THD | 不超过3%            |

6.2 数据处理

记录测试批量N，失效时间 $t_0, t_1, \dots$ 等各个失效时间段内对应的失效数量 $f_0, f_1, \dots$ 。

计算失效概率密度函数：

$$f(t) = f/N \dots\dots\dots (1)$$

计算失效累积分布函数：

$$F(t) = \Sigma f(t) \dots\dots\dots (2)$$

计算纵轴威布尔坐标：

$$y = \ln\{-\ln[1 - F(t)]\} \dots\dots\dots (3)$$

计算对数尺度下的失效时间 $\ln t$ ，即为横轴坐标。

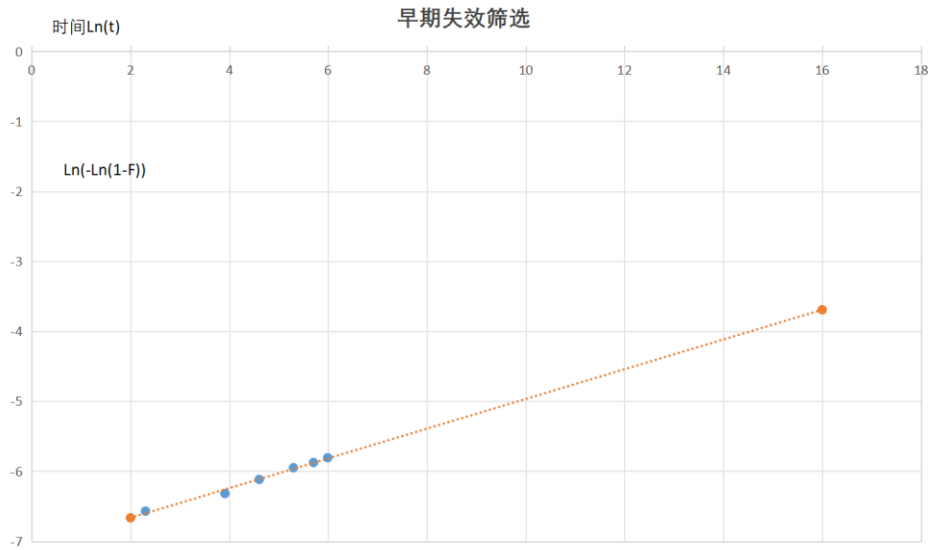


图5 感性负载老化筛选试验可靠性拟合示意图

拟合方程：

$$\ln\{-\ln[1 - F(t)]\} = \beta \ln t + \beta \ln \eta \dots\dots\dots (4)$$

设置筛选率为 $F(t)$ ，达到此筛选率的目标筛选时间为：

$$t = \eta(-\ln(1 - F(t)))^{1/\beta} \dots\dots\dots (5)$$

7 测试报告

测试结束应提供测试报告，其中记录的数据应当包括：

- a) 样品名称及数量；
- b) 试验老化条件；

- c) 试验时间；
- d) 试验前、后的参数，包括 $R_{DS(on)}$ 、 $V_{GS(th)}$ 、 $V_F$ 、 $V_{BR}$ 、THD 等
- e) 失效时间分布；
- f) 可靠性筛选拟合相关参数（可选）；
- g) 其他必要的项目。



附 录 A

(规范性)

SiC 功率模块无功老化筛选试验记录表

SiC功率模块无功老化筛选试验记录表示例如图A. 1。

表A. 1 SiC 功率模块无功老化筛选试验记录表示例

|               |  |                 |                          |                    |                   |                     |                 |               |                          |
|---------------|--|-----------------|--------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-----------------|---------------|--------------------------|
| 产品名称<br>型号规格  |  |                 |                          |                    | 批次号               |                     |                 |               |                          |
| 检测项目          |  | 逆变额定&峰值&堵转      |                          |                    | 环境条件              |                     | 室温              |               |                          |
| 测试仪器<br>仪表    |  | 型号：             |                          |                    | 计量有效期             |                     |                 |               |                          |
|               |  | 编号：             |                          |                    |                   |                     |                 |               |                          |
| 检测依据<br>标准条款  |  |                 |                          |                    | 批次数量              |                     | 100             |               |                          |
| 试验条件<br>及技术要求 |  | 试验持续时间：360s（示例） |                          |                    |                   |                     |                 |               |                          |
|               |  | 试验温度：           |                          |                    |                   |                     |                 |               |                          |
|               |  | 母线电压 $V_{DS}$ ： |                          |                    |                   | 最大输出电流 $I_L$ ：      |                 |               |                          |
|               |  | 其余补充说明：         |                          |                    |                   |                     |                 |               |                          |
|               |  | 1.<br>2.<br>... |                          |                    |                   |                     |                 |               |                          |
| 数据采集          |  | 样品<br>编号        | 漏-源极导通电<br>压 $V_{ds,on}$ | 体二极管正向<br>压降 $V_F$ | 阈值电压 $V_{GS(th)}$ | 零栅压漏电流<br>$I_{dss}$ | 栅源漏电流 $I_{gss}$ | 总谐波畸变率<br>THD | 失效判<br>定                 |
| 初始数据          |  | 1               |                          |                    |                   |                     |                 |               | <input type="checkbox"/> |
|               |  | .....           |                          |                    |                   |                     |                 |               | <input type="checkbox"/> |
| 采集监测<br>点X    |  |                 |                          |                    |                   |                     |                 |               | <input type="checkbox"/> |
|               |  |                 |                          |                    |                   |                     |                 |               | <input type="checkbox"/> |
| .....         |  |                 |                          |                    |                   |                     |                 |               | <input type="checkbox"/> |
|               |  |                 |                          |                    |                   |                     |                 |               | <input type="checkbox"/> |

附录 B  
(规范性)  
模拟电机控制算法

B.1 控制算法

基于无功负载的车规级功率模块无功测试，模拟实际电机应用控制原理，采用矢量控制技术和空间电压脉宽调制技术，并输出6路PWM波，在电抗器上生成三相相位互差120度的交流电流，如图1所示为功率半导体驱动输出的硬件电路图，总共需要6个桥臂，每两个桥臂组成一相，总共有三相。电抗器跟电机相比，因为没有转动轴，所以没有产生转动的机械功率，因此称为无功。

B.2 测试电路拓扑

模拟电机控制算法拓扑如图B.1所示，首先采集电机（本标准为三相电抗器）三相电流（实际只需采集两相，第三相电流可由采集的两相计算得到），然后分别进行Clarke变换和Park变换得到两相旋转坐标轴反馈电流，再与目标电流（通过CAN通信从PC上位机获取）进行PI调节得到两相旋转坐标轴目标电压，再将此电压进行Park逆变换得到两相静止坐标轴目标电压，最后再通过SVPWM算法计算得到6路输出PWM占空比，并输出到图1中的硬件电路中，从而获得所需的三相输出电流。

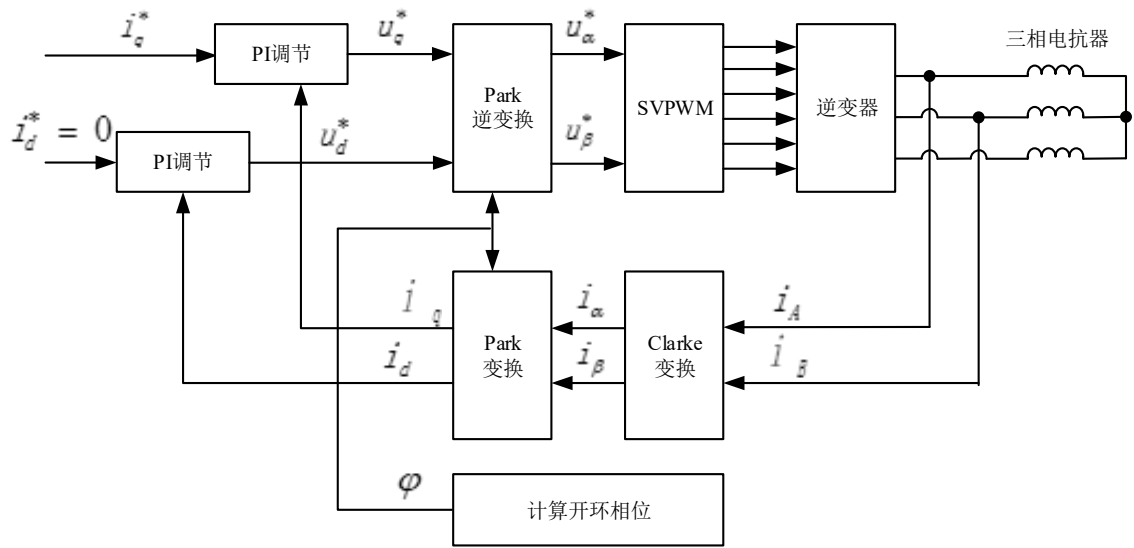


图 B.1 感性负载老化筛选试验控制算法拓扑

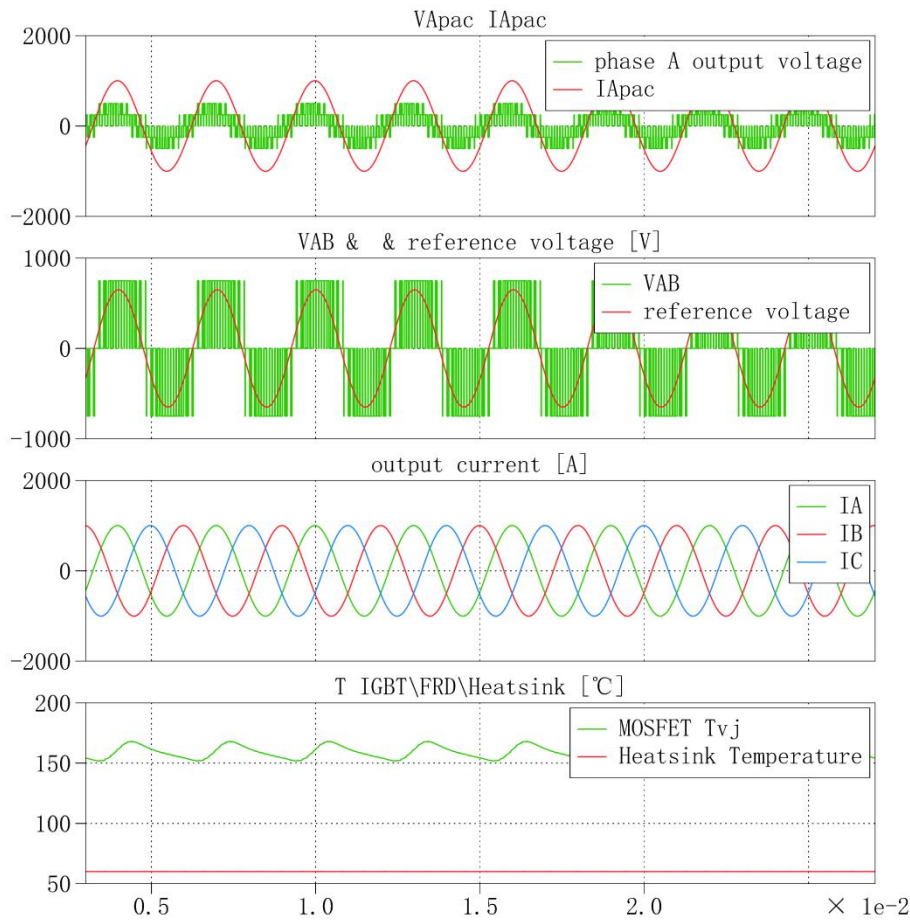


图 B.2 感性负载老化筛选试验输出典型波形

堵转模拟同样基于图B.1的硬件电路，通过控制6路IGBT/MOSFET的开通/关断来实现每个管（包括6个续流二极管）轮流工作在堵转电流下（直流电流）并持续工作一定的时间，以达到测试的目的。图B.2是软件堵转控制流程图，图B.3是软件堵转控制拓扑图。

首先采集三相输出电流，接着分别计算三相输出电流的有效值，然后取三相电流有效值中的最大者作为堵转反馈电流，再将此反馈电流与平滑过的目标堵转电流(为了避免因电流突变损坏器件，需对目标电流作平滑处理)做电流闭环PI调节，此步骤的目的是让堵转实际电流和目标电流保持一致。

电流闭环PI调节的输出就是占空比值(0%~100%)，得到占空比后，再根据所要堵转测试的模块的功率管计算出对应的功率管的比较值，然后设置到控制系统相对应的PWM比较寄存器里。

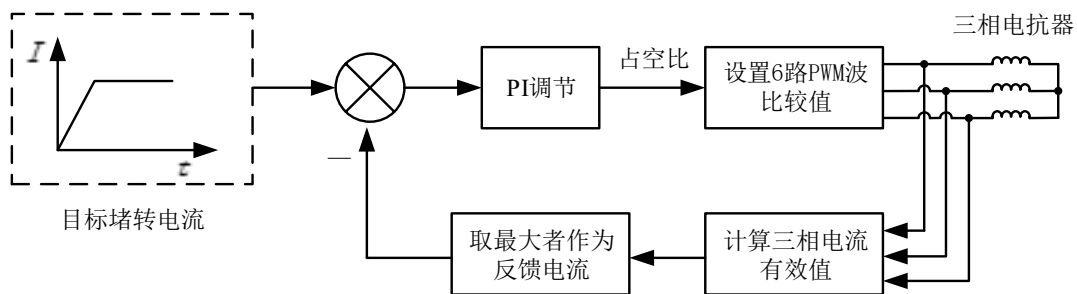


图 B.3 软件堵转控制

## 附录 C

### (规范性)

#### 威布尔分布模型在早期失效中的应用

##### C.1 威布尔分布模型

威布尔分布通过形状参数  $\beta$  清晰区分半导体器件的早期失效阶段，结合加速试验和统计分析，可精准定位工艺缺陷、优化筛选策略，并为可靠性寿命预测提供量化依据。

在2参数威布尔分布中， $\beta$ （形状参数）和  $\eta$ （尺度参数）是描述分布形态和位置的核心参数，具体特性如下：

##### C.2 形状参数 $\beta$

作用：决定分布的形态，包括对称性、偏斜程度及失效模式。

取值影响：

$\beta > 1$ ：分布右偏，失效概率随时间递增（如磨损导致的耗损失效）。

$\beta = 1$ ：退化为指数分布，失效概率恒定（偶然失效）。

$\beta < 1$ ：分布左偏，失效概率随时间递减（如早期缺陷导致的早期失效）。

其他特性：

$\beta$  越大，分布越集中（寿命分散程度低）； $\beta$  越小，分布越分散。

当  $\beta$  接近3.313时，分布近似正态分布。

##### C.3 尺度参数 $\eta$

作用：决定分布的中心位置（特征寿命）和范围，即平均寿命或典型失效时间。

取值影响：

$\eta$  越大，分布向右平移，平均寿命越长。

$\eta$  越小，分布向左平移，平均寿命越短。

与其他参数的关系： $\eta$  与  $\beta$  共同定义分布的“特征寿命”，即失效概率为63.2%时的时间。

##### C.4 联合影响

典型示例：若拟合得到  $\beta=2$ 、 $\eta=1000$ 小时，则表示失效时间呈右偏分布，平均寿命约1000小时，且失效概率随时间递增（如疲劳失效）。

##### C.5 总结

$\beta$  和  $\eta$  分别从形态和位置两个维度刻画威布尔分布，其组合可灵活适配不同失效场景（如早期失效、偶然失效、耗损失效）。

### 参 考 文 献

- [1] GB/T 18488.1—2024 电动汽车用驱动电机系统 第1部分：技术条件
  - [2] GB/T 18488.2—2024 电动汽车用驱动电机系统 第2部分：测试方法
  - [3] AEC-Q101 Stress test qualification for discrete semiconductors
  - [4] AQG 324 Qualification of Power Modules for Use in Power Electronics Converter Units in Motor Vehicles
  - [5] IEC 60747-26 Semiconductor devices - Part 2: Discrete devices - Rectifier diodes
  - [6] IEC 60747-8 Semiconductor devices - Discrete devices - Part 8: Field-effect transistors
  - [7] IEC 60747-9 Semiconductor devices - Part 9: Discrete devices - Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs)
  - [8] IEC 60749-5 Semiconductor devices - Mechanical and climatic test methods - Part 5: Steady-state temperature humidity bias life test
  - [9] IEC 60749-23 Semiconductor devices - Mechanical and climatic test methods - Part 23: High temperature operating life
  - [10] JESD 22-A108G Temperature, Bias, and Operating Life
  - [11] JEP 183A SiC MOSFET Guidelines for measuring the threshold voltage (VT) of SiC MOSFETs
  - [12] Gate Oxide Failure Mechanisms of SiC MOSFET Related to Electro-Thermomechanical Stress Under HTRB and HTGB Test, 2024 36th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)
-

