

制造业可靠性系统工程标准

STANDARD OF RELIABILITY SYSTEMS ENGINEERING FOR MANUFACTURING ENTERPRISES

RSE-STD-199.2 2023

IGBT 可靠域实验与评价方法

Experiment and evaluation method of the reliable region for IGBTs

(征求意见稿)



© 本标准属于深圳市为民可靠性系统工程研究院所有，享有著作权及其他法律规定的任何权益，受法律和国际条约保护。

2023-11-19 发布



深圳市为民可靠性系统工程研究院

目 次

前言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语、定义和符号.....	1
3.1 术语和定义.....	1
3.2 符号.....	2
4 通用要求.....	2
4.1 IGBT 可靠域实验与评价流程.....	2
4.2 关键性能参数测试.....	2
4.3 性能裕量建模.....	2
4.4 关键性能参数期望与标准差计算.....	2
4.5 可靠度计算.....	3
5 关键性能参数测试.....	3
5.1 关键性能参数测试项目.....	3
5.2 栅极-发射极阈值电压测试.....	3
5.3 集电极-发射极饱和电压测试.....	3
5.4 二极管正向电压电压测试.....	3
5.5 集电极截止电流测试.....	4
5.6 栅极漏电流测试.....	4
5.7 IGBT 芯片结-壳热阻测试.....	4
5.8 二极管芯片结-壳热阻测试测试.....	4
5.9 集电极-发射极击穿电压测试.....	4
5.10 栅极-发射极击穿电压测试.....	4
5.11 最大集电极峰值电流测试.....	5
5.12 最大反偏安全工作区测试.....	5
5.13 最大短路安全工作区测试.....	6
6 性能裕量建模.....	6
6.1 关键性能参数属性.....	6
6.2 规范阈值分析.....	7
6.3 裕量模型.....	7
7 关键性能参数期望与标准差计算.....	7
7.1 非步进应力测试的关键性能参数期望与标准差计算.....	7
7.2 步进应力测试的关键性能参数期望与标准差计算.....	8

RSE-STD-199.2 2023

8 可靠度计算.....	8
8.1 单项关键性能参数可靠度计算.....	8
8.2 IGBT 可靠度计算.....	9
附录 A （资料性附录）期望与标准差计算方法.....	10
附录 B （资料性附录）IGBT 可靠域实验与评价示例.....	12
B.1 应用对象.....	12
B.2 关键性能参数测试.....	12
B.3 性能裕量建模.....	17
B.4 关键性能参数期望与标准差计算.....	18
B.5 可靠度计算.....	19

前 言

本标准由深圳市为民可靠性系统工程研究院提出并发起编制。

本标准起草单位：北京航空航天大学、北京蓝威技术有限公司、山东芯赛思电子科技有限公司、山东阅芯电子科技有限公司、深圳市为民可靠性系统工程研究院、中国科学院电工研究所、西安爱科赛博电气股份有限公司、华为技术有限公司。

本标准主要起草人：陈玉冰，张栋，齐敏，顾瑞娟，张文亮，李文江，康锐，仇志杰，石全茂，苏铁军。

IGBT 可靠域实验与评价方法

1 范围

本标准规定了 IGBT 模块的可靠域实验与评价的要求和方法，用于确定 IGBT 模块的性能裕量以及可靠度指标。

本规范适用于深圳市为民可靠性系统工程研究院理事单位，也可供其他企业参照使用。

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。

RSE-STD-451 2022 确信可靠性术语与定义

RSE-STD-1391 2022 功能、性能及裕量分析

GB/T 29332 2012 半导体器件 分立器件 第 9 部分：绝缘栅双极晶体管(IGBT)

IEC 60747-2 2016 半导体器件 分立器件 第 2 部分：整流二极管(Semiconductor devices-Discrete devices-Part 2: Rectifier diodes)

IEC 60747-9 2019 半导体器件 分立器件 第 9 部分：绝缘栅双极晶体管(Semiconductor devices-Discrete devices-Part 9: Insulated-gate bipolar transistors)

JESD 51-14 2010 一维传热路径下半导体器件结壳热阻瞬态双界面测试(Transient dual interface test method for the measurement of the thermal resistance junction to case of semiconductor devices with heat flow through a single path)

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

RSE-STD-451 2022、RSE-STD-1391 2022、GB/T 29332 2012、IEC 60747-2 2016、IEC 60747-9 2019、JESD 51-14 2010 界定的术语与定义适用于本文件。

3.1.1

IGBT 单元 IGBT unit

IGBT 模块中的一个 IGBT 芯片以及与其反向并联的一个二极管芯片。

3.1.2

IGBT 性能工作极限 performance operating limit of IGBTs

用电压、电流等工作应力表征的 IGBT 性能有效的边界。如使 IGBT 到达电流饱和区的集电极电流。

3.1.3

IGBT 性能破坏极限 performance destroy limit of IGBTs

用电压、电流等工作应力表征的 IGBT 性能丧失的边界。如使 IGBT 发生栅极击穿的

栅极-发射极电压。

3.1.4

最大反偏安全工作电压 maximum reverse biased safe operating voltage

在负载电流为集电极重复峰值电流时，IGBT 能够无故障关断的最大集电极-发射极反偏电压。

3.1.5

最大短路安全工作电压 maximum short-circuit safe operating voltage

在规定短路条件下，IGBT 能够无故障开关的最大集电极-发射极电压。

3.1.6

IGBT 规范阈值 normative threshold of IGBTs

IGBT 厂家提供信息中规定的性能参数上限和/或下限。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

I_C ——集电极电流

I_{CRM} ——集电极重复峰值电流

V_{CES} ——栅极-发射极短路时的集电极-发射极电压

V_{GES} ——集电极-发射极短路时的栅极-发射极电压

$V_{CE RB}$ ——集电极电流为 I_{CRM} 时的额定反偏安全工作电压

$V_{CE SC}$ ——产品厂商所提供短路数据中的额定短路安全工作电压

4 通用要求

4.1 IGBT 可靠域实验与评价流程

IGBT 可靠域实验与评价的基本流程如图 1 所示。

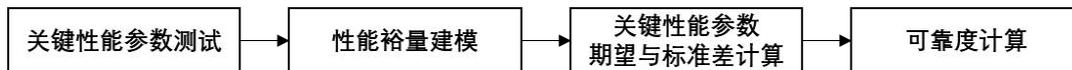


图 1 IGBT 可靠域实验与评价的基本流程

4.2 关键性能参数测试

确定 IGBT 关键性能参数项目，对各项关键性能参数进行测试，得到测试数据。

4.3 性能裕量建模

根据 IGBT 关键性能参数属性及其规范阈值，建立各项关键性能参数的裕量模型。

4.4 关键性能参数期望与标准差计算

基于 IGBT 关键性能参数测试数据，计算各项关键性能参数的期望与标准差。

4.5 可靠度计算

计算各项关键性能参数对应的可靠度以及 IGBT 可靠度。

5 关键性能参数测试

5.1 关键性能参数测试项目

IGBT 关键性能参数测试项目如表 1 所示。根据关键性能参数类型以及测试方法的不同，测试项目分为步进应力测试与非步进应力测试。采用非步进应力测试方式的受试样品可以重复用于其他测试项目，采用步进应力测试方式的受试样品不允许再用于其他测试项目。

表 1 IGBT 关键性能参数测试项目

序号	测试项目	关键性能参数	是否步进应力
1	栅极-发射极阈值电压测试	栅极-发射极阈值电压	否
2	集电极-发射极饱和电压测试	集电极-发射极饱和电压	否
3	二极管正向电压测试	二极管正向电压	否
4	集电极截止电流测试	集电极截止电流	否
5	栅极漏电流测试	栅极漏电流	否
6	IGBT 芯片结-壳热阻测试	IGBT 芯片结-壳热阻	否
7	二极管芯片结-壳热阻测试	二极管芯片结-壳热阻	否
8	集电极-发射极击穿电压测试	集电极-发射极击穿电压	是
9	栅极-发射极击穿电压测试	栅极-发射极击穿电压	是
10	最大集电极峰值电流测试	最大集电极峰值电流	是
11	最大反偏安全工作区测试	最大反偏安全工作电压	是
12	最大短路安全工作区测试	最大短路安全工作电压	是

5.2 栅极-发射极阈值电压测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.3.2 所示方法对 IGBT 栅极-发射极阈值电压进行测试，结温条件为 25℃，其他测试条件参考厂家提供的信息确定。

测试样本应不少于 3 个 IGBT 模块，且受试模块内的所有 IGBT 单元均应进行测试。

5.3 集电极-发射极饱和电压测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.3.1 所示方法对 IGBT 集电极-发射极饱和电压进行测试，结温条件为 25℃，其他测试条件参考厂家提供的信息确定。

测试样本应不少于 3 个 IGBT 模块，且受试模块内的所有 IGBT 单元均应进行测试。

5.4 二极管正向电压测试

根据 IEC 60747-2 2016 中 6.1.2 所示方法对 IGBT 模块内二极管正向电压进行测试，结温条件为 25℃，其他测试条件参考厂家提供的信息确定。

测试样本应不少于 3 个 IGBT 模块，且受试模块内的所有 IGBT 单元均应进行测试。

5.5 集电极截止电流测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.3.4 所示方法对 IGBT 集电极截止电流进行测试，结温条件为 25℃，其他测试条件参考厂家提供的信息确定。

测试样本应不少于 3 个 IGBT 模块，且受试模块内的所有 IGBT 单元均应进行测试。

5.6 栅极漏电流测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.3.5 所示方法对 IGBT 栅极漏电流进行测试，结温条件为 25℃，其他测试条件参考厂家提供的信息确定。

测试样本应不少于 3 个 IGBT 模块，且受试模块内的所有 IGBT 单元均应进行测试。

5.7 IGBT 芯片结-壳热阻测试

根据 JESD 51-14 2010 的测试方法对 IGBT 芯片结-壳热阻进行测试。

测试样本应不少于 3 个 IGBT 模块，且受试模块内的所有 IGBT 单元均应进行测试。

5.8 二极管芯片结-壳热阻测试

根据 JESD 51-14 2010 的测试方法对二极管芯片结-壳热阻进行测试。

测试样本应不少于 3 个 IGBT 模块，且受试模块内的所有 IGBT 单元均应进行测试。

5.9 集电极-发射极击穿电压测试

根据 IEC 60747-9 2019 中附录 A 所示方法对 IGBT 集电极-发射极击穿电压进行测试，以集电极-发射极电压为步进应力，测试条件如表 2 所示。其中，测试截止条件为集电极-发射极电压达到 2 倍 V_{CES} 。

测试样本应不少于 3 个 IGBT 模块，且受试模块内的所有 IGBT 单元均应进行测试。

表 2 集电极-发射极击穿电压测试条件

测试参数	测试条件
结温	25℃
栅极-发射极电压	0V
集电极-发射极电压	V_{CES} 起始，步进间隔为 0.05 倍 V_{CES} ，直至达到 IGBT 性能工作极限、IGBT 性能破坏极限或测试截止条件。

5.10 栅极-发射极击穿电压测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.3.5.2 所示电路图对 IGBT 栅极-发射极击穿电压进行测试，以栅极-发射极电压为步进应力，测试条件如表 3 所示。其中，测试截止条件为栅极-发射极电压达到 2 倍 V_{GES} 。

测试样本应不少于 3 个 IGBT 模块，且受试模块内的所有 IGBT 单元均应进行测试。

表 3 栅极-发射极击穿电压测试条件

测试参数	测试条件
结温	25℃
集电极-发射极电压	0V
栅极-发射极电压	V_{GES} 起始, 步进间隔为 0.05 倍 V_{GES} , 直至达到 IGBT 性能工作极限、IGBT 性能破坏极限或测试截止条件。

5.11 最大集电极峰值电流测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.3.1.2 所示电路图对 IGBT 最大集电极峰值电流进行测试, 以集电极电流为步进应力, 测试条件如表 4 所示。其中, 测试截止条件为集电极电流达到 2 倍 I_{CRM} 。

测试样本应不少于 3 个 IGBT 模块, 且受试模块内的所有 IGBT 单元均应进行测试。

表 4 最大集电极峰值电流测试条件

测试参数	测试条件
结温	25℃
栅极-发射极电压	+15V
脉冲宽度	1ms
集电极电流	I_{CRM} 起始, 步进间隔为 0.05 倍 I_{CRM} , 直至达到 IGBT 性能工作极限、IGBT 性能破坏极限或测试截止条件。

5.12 最大反偏安全工作区测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.2.9 所示方法对 IGBT 最大反偏安全工作区进行测试, 以集电极-发射极电压为步进应力, 测试条件如表 5 所示。其中, 最大工作结温根据厂家提供的信息确定, 测试截止条件为集电极-发射极电压达到 2 倍 $V_{CE RB}$ 。

测试样本应不少于 3 个 IGBT 模块, 每个受试模块至少选择一个 IGBT 单元进行测试。

表 5 最大反偏安全工作区测试条件

测试参数	测试条件
结温	最大工作结温
集电极电流	I_{CRM}
栅极-发射极电压	$\pm 15V$
栅极电阻	根据厂家提供信息确定
集电极-发射极电压	$V_{CE RB}$ 起始, 步进间隔为 0.05 倍 $V_{CE RB}$, 直至达到 IGBT 性能工作极限、IGBT 性能破坏极限或测试截止条件。

5.13 最大短路安全工作区测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.2.10 所示方法对 IGBT 最大短路安全工作区进行测试，以集电极-发射极电压为步进应力，测试条件如表 6 所示。其中，最大工作结温根据厂家提供的信息确定，测试截止条件为集电极-发射极电压达到 2 倍 V_{CESC} 。

测试样本应不少于 3 个 IGBT 模块，每个受试模块至少选择一个 IGBT 单元进行测试。

表 6 最大短路安全工作区测试条件

测试参数	测试条件
结温	最大工作结温
栅极-发射极电压	$\pm 15V$
短路脉冲时间	10 μs
栅极电阻	在保证波形稳定有效的前提下，选取尽可能小的栅极电阻
集电极-发射极电压	V_{CESC} 起始，步进间隔为 0.05 倍 V_{CESC} ，直至达到 IGBT 性能工作极限、IGBT 性能破坏极限或测试截止条件。

6 性能裕量建模

6.1 关键性能参数属性

IGBT 关键性能参数的属性如表 7 所示。其中，望大性能参数值越大越有利于功能实现，望小性能参数值越小越有利于功能实现，望目性能参数值越接近某个特定目标值越有利于功能实现。

表 7 关键性能参数属性

序号	关键性能参数 p_i	参数属性
1	栅极-发射极阈值电压	望目
2	集电极-发射极饱和电压	望小
3	二极管正向电压	望小
4	集电极截止电流	望小
5	栅极漏电流	望小
6	IGBT 芯片结-壳热阻	望小
7	二极管芯片结-壳热阻	望小
8	集电极-发射极击穿电压	望大
9	栅极-发射极击穿电压	望大
10	最大集电极峰值电流	望大
11	最大反偏安全工作电压	望大
12	最大短路安全工作电压	望大

6.2 规范阈值分析

确定各个 IGBT 关键性能参数的属性及规范阈值。对于望大性能参数，应根据厂家提供信息确定下阈值。对于望小性能参数，应根据厂家提供信息确定上阈值。对于望目性能参数，应根据厂家提供信息确定上阈值与下阈值。

6.3 裕量模型

6.3.1 望大性能参数裕量模型

根据式（1）构建望大性能参数的裕量模型：

$$m_i = p_i - p_i^L, \quad (1)$$

式中， m_i —— p_i 对应的性能裕量；

p_i —— 第 i 项关键性能参数；

p_i^L —— p_i 的下阈值。

6.3.2 望小性能参数裕量模型

根据式（2）构建望小性能参数的裕量模型：

$$m_i = p_i^U - p_i, \quad (2)$$

式中， m_i —— p_i 对应的性能裕量；

p_i —— 第 i 项关键性能参数；

p_i^U —— p_i 的上阈值。

6.3.3 望目性能参数裕量模型

根据式（3）构建望目性能参数的裕量模型：

$$m_i = \min \{ p_i - p_i^L, p_i^U - p_i \}, \quad (3)$$

式中， m_i —— p_i 对应的性能裕量；

p_i —— 第 i 项关键性能参数；

p_i^L —— p_i 的下阈值；

p_i^U —— p_i 的上阈值；

min —— 取小函数。

7 关键性能参数期望与标准差计算

对于非步进型与步进型两类关键性能参数测试数据，分别按照下列步骤计算各个关键性能参数的期望与标准差。

7.1 非步进应力测试的关键性能参数期望与标准差计算

(1) 将第 i 项关键性能参数测试数据记为 $X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,a_i}$ ，其中 a_i 为受试单元总数量。

(2) 将 $X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,a_i}$ 作为输入数据，根据附录 A 所示方法分别计算第 i 项关键性能参数的期望和标准差。

7.2 步进应力测试的关键性能参数期望与标准差计算

(1) 将第 i 项关键性能参数测试的各个步进应力水平记为 $Y_{i,1}, Y_{i,2}, \dots, Y_{i,b_i}$, 其中 b_i 为步进应力水平总数量。

(2) 若有 $c_{i,j}$ 个受试单元在第 j 个步进应力水平 $Y_{i,j}$ 下发生失效, 则记

$$X_{i,j,k} = Y_{i,j} - \frac{k \times s_i}{c_{i,j} + 1}, 1 \leq j \leq b_i, 1 \leq k \leq c_{i,j}, \quad (4)$$

式中, s_i —— 第 i 项关键性能参数测试的步进间隔;

b_i —— 第 i 项关键性能参数测试的步进应力水平总数量。

(3) 若有 d_i 个受试单元在达到测试截止条件 Y_{i,b_i} 后仍未失效, 则记

$$X_{i,b_i+1,k} = Y_{i,b_i}, 1 \leq k \leq d_i, \quad (5)$$

式中, b_i —— 第 i 项关键性能参数测试的步进应力水平总数量。

(4) 将 $X_{i,j,k}$ 与 $X_{i,b_i+1,k}$ 共同作为输入数据, 根据附录 A 所示方法分别计算第 i 项关键性能参数的期望和标准差。

特殊地, 若所有受试单元均在达到测试截止条件 Y_{i,b_i} 后仍未失效, 则第 i 项关键性能参数的期望为 Y_{i,b_i} 、标准差为 0, 即视为常数 Y_{i,b_i} 。

8 可靠度计算

8.1 单项关键性能参数可靠度计算

8.1.1 望大性能参数可靠度计算

根据式 (6) 计算望大性能参数对应的可靠度:

$$R_i = 1 - \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(\mu_i - p^L_i)}{\sqrt{3}\sigma_i}\right) \right)^{-1} \quad (6)$$

式中, R_i —— 第 i 项关键性能参数对应的可靠度;

p^L_i —— 第 i 项关键性能参数的下阈值;

μ_i —— 第 i 项关键性能参数的期望;

σ_i —— 第 i 项关键性能参数的标准差。

8.1.2 望小性能参数可靠度计算

根据式 (7) 计算望小性能参数对应的可靠度:

$$R_i = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(\mu_i - p^U_i)}{\sqrt{3}\sigma_i}\right) \right)^{-1}, \quad (7)$$

式中, R_i —— 第 i 项关键性能参数对应的可靠度;

p^U_i —— 第 i 项关键性能参数的上阈值;

μ_i —— 第 i 项关键性能参数的期望;

σ_i —— 第 i 项关键性能参数的标准差。

8.1.3 望目性能参数可靠度计算

根据式 (8) 计算望目性能参数对应的可靠度:

$$R_i = \min \left\{ 1 - \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(\mu_i - p_i^L)}{\sqrt{3}\sigma_i} \right) \right)^{-1}, \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(\mu_i - p_i^U)}{\sqrt{3}\sigma_i} \right) \right)^{-1} \right\}, \quad (8)$$

式中, R_i —— 第 i 项关键性能参数对应的可靠度;

p_i^L —— 第 i 项关键性能参数的下阈值;

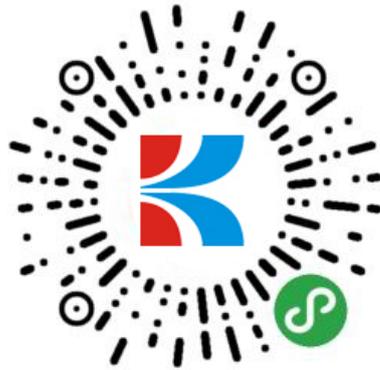
p_i^U —— 第 i 项关键性能参数的上阈值;

μ_i —— 第 i 项关键性能参数的期望;

σ_i —— 第 i 项关键性能参数的标准差。

8.2 IGBT 可靠度计算

对各项关键性能参数对应的可靠度取小, 结果即为 IGBT 可靠度。



附录 A
(资料性附录)
期望与标准差计算方法

输入：变量 ξ 的观测数据 x_1, x_2, \dots, x_n

输出：变量 ξ 的期望与标准差

第一部分：数据预处理

Step 1.1 计算观测数据的算数平均值 e_0 ：

$$e_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Step 1.2 计算观测数据的标准差 σ_0 ：

$$\sigma_0 = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - e_0)^2}.$$

Step 1.3 进行坐标系变换，经坐标系向左平移 e_0 ，并将新坐标系下的数据点记作

$x_i^0 (i=1, 2, \dots, n)$,

$$x_i^0 = x_i - e_0.$$

Step 1.4 计算数据点 x_i^0 对应的信度 α_i^0 ：

$$\alpha_i^0 = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(0 - x_i^0)}{\sqrt{3}\sigma_0}\right) \right)^{-1}.$$

第二部分：迭代过程

对于第 $(t+1)$ 轮迭代($t=0, 1, 2, \dots$)

Step 2.1 计算经验期望 e_{t+1} ：

$$e_{t+1} = \frac{\alpha_1^t + \alpha_2^t}{2} x_1^t + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\alpha_{i+1}^t - \alpha_{i-1}^t}{2} x_i^t + \left(1 - \frac{\alpha_{n-1}^t + \alpha_n^t}{2} \right) x_n^t.$$

Step 2.2 进行坐标系平移，向左移动距离为 e_{t+1} ，将新坐标系下的数据点记作 $x_i^{t+1} (i=1, 2, \dots, n)$ ，则有：

$$x_i^{t+1} = x_i^t - e_{t+1}.$$

Step 2.3 计算数据 x_i^{t+1} 的经验标准差 σ_{t+1} ：

$$\sigma_{t+1} = \sqrt{\alpha_1^t (x_1^{t+1})^2 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=0}^2 (\alpha_{i+1}^t - \alpha_i^t) (x_i^{t+1})^j (x_{i+1}^{t+1})^{2-j} + (1 - \alpha_n^t) (x_n^{t+1})^2}.$$

Step 2.4 计算数据点对应的信度 α_i^{t+1} ：

$$\alpha_i^{t+1} = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(0 - x_i^{t+1})}{\sqrt{3}\sigma_{t+1}}\right) \right)^{-1}.$$

Step 2.5 计算第 t 轮信度 α_i^t 与第 $(t+1)$ 轮信度 α_i^{t+1} 之间的距离 $\delta_i (i=1, 2, \dots, n)$,

$$\delta_i = |\alpha_i^{t+1} - \alpha_i^t|.$$

第三部分：迭代过程终止条件

IF $\max \{\delta_i\} > 10^{-6}$

THEN 进行第 $(t+2)$ 轮迭代

ELSE

输出 $\alpha_i^{t+1} (i=1, 2, \dots, n)$, 并计算 ξ 的期望 μ 与标准差 σ :

$$\mu = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} x_1 + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1}}{2} x_i + \left(1 - \frac{\alpha_{n-1} + \alpha_n}{2}\right) x_n,$$

$$\sigma = \sqrt{\alpha_1 (x_1 - e)^2 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=0}^2 (\alpha_{i+1} - \alpha_i) (x_i - e)^j (x_{i+1} - e)^{2-j} + (1 - \alpha_n) (x_n - e)^2}.$$

附录 B

(资料性附录)

IGBT 可靠域实验与评价示例

B.1 应用对象

针对两款来自不同厂家的 IGBT 产品进行可靠域实验与评价,分别记作 A 产品与 B 产品。两款 IGBT 均为 34mm 封装的半桥拓扑模块,额定电压均为 1200V,额定电流均为 50A。

B.2 关键性能参数测试

根据实际测试条件,确定开展的关键性能参数测试项目及投入的样本量如表 B.1 所示。

表 B.1 IGBT 关键性能参数测试项目

序号	测试项目	关键性能参数	是否步进应力	样本量
1	栅极-发射极阈值电压测试	栅极-发射极阈值电压	否	25
2	集电极-发射极饱和电压测试	集电极-发射极饱和电压	否	25
3	二极管正向电压测试	二极管正向电压	否	25
4	集电极截止电流测试	集电极截止电流	否	25
5	栅极漏电流测试	栅极漏电流	否	25
6	IGBT 芯片结-壳热阻测试	IGBT 芯片结-壳热阻	否	4
7	二极管芯片结-壳热阻测试	二极管芯片结-壳热阻	否	4
8	集电极-发射极击穿电压测试	集电极-发射极击穿电压	是	3
9	栅极-发射极击穿电压测试	栅极-发射极击穿电压	是	3
10	最大集电极峰值电流测试	最大集电极峰值电流	是	3

B.2.1 栅极-发射极阈值电压测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.3.2 所示方法对受试样品进行栅极-发射极阈值电压测试,测试结果如表 B.2 所示

表 B.2 栅极-发射极阈值电压测试结果

样品编号	上桥单元 (V)	下桥单元 (V)	样品编号	上桥单元 (V)	下桥单元 (V)
A-1	5.845	5.829	B-1	5.969	5.963
A-2	5.825	5.932	B-2	5.993	5.989
A-3	5.775	5.959	B-3	5.971	5.956
A-4	5.901	5.947	B-4	5.966	5.970
A-5	5.973	5.870	B-5	5.969	5.987
A-6	5.886	5.899	B-6	5.965	5.979
A-7	5.884	5.923	B-7	5.955	5.970
A-8	5.827	5.829	B-8	5.965	5.957
A-9	5.868	5.786	B-9	5.960	5.970
A-10	5.880	5.895	B-10	5.951	5.980
A-11	6.018	5.889	B-11	5.972	5.981

A-12	5.876	5.822	B-12	5.964	5.979
A-13	5.823	5.928	B-13	5.977	5.978
A-14	5.956	5.885	B-14	6.001	6.001
A-15	5.906	5.925	B-15	5.986	5.965
A-16	5.955	5.902	B-16	5.987	5.970
A-17	6.016	5.883	B-17	5.989	5.977
A-18	5.946	5.890	B-18	5.981	5.958
A-19	5.906	5.851	B-19	5.984	5.974
A-20	5.856	5.850	B-20	6.006	5.973
A-21	5.948	5.831	B-21	5.984	5.966
A-22	5.912	5.968	B-22	5.988	5.966
A-23	5.888	5.870	B-23	5.970	5.969
A-24	5.901	6.040	B-24	5.965	5.980
A-25	5.841	5.941	B-25	5.961	5.973

B.2.2 集电极-发射极饱和电压测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.3.1 所示方法对受试样品进行集电极-发射极饱和电压测试，测试结果如表 B.3 所示

表 B.3 集电极-发射极饱和电压测试结果

样品编号	上桥 (V)	下桥 (V)	样品编号	上桥 (V)	下桥 (V)
A-1	1.834	1.824	B-1	1.772	1.771
A-2	1.809	1.858	B-2	1.789	1.776
A-3	1.805	1.849	B-3	1.786	1.759
A-4	1.833	1.827	B-4	1.767	1.766
A-5	1.852	1.829	B-5	1.770	1.776
A-6	1.849	1.851	B-6	1.762	1.760
A-7	1.829	1.847	B-7	1.788	1.774
A-8	1.831	1.824	B-8	1.769	1.745
A-9	1.837	1.835	B-9	1.787	1.777
A-10	1.825	1.828	B-10	1.777	1.761
A-11	1.894	1.838	B-11	1.775	1.769
A-12	1.817	1.829	B-12	1.779	1.770
A-13	1.829	1.839	B-13	1.776	1.761
A-14	1.862	1.842	B-14	1.793	1.781
A-15	1.825	1.818	B-15	1.791	1.766
A-16	1.848	1.837	B-16	1.765	1.770
A-17	1.898	1.837	B-17	1.801	1.772
A-18	1.822	1.805	B-18	1.780	1.767
A-19	1.830	1.804	B-19	1.792	1.756

A-20	1.834	1.844	B-20	1.789	1.777
A-21	1.846	1.811	B-21	1.786	1.768
A-22	1.840	1.863	B-22	1.776	1.772
A-23	1.841	1.840	B-23	1.780	1.771
A-24	1.849	1.876	B-24	1.785	1.766
A-25	1.826	1.822	B-25	1.774	1.763

B. 2. 3 二极管正向电压测试

根据 IEC 60747-2 2016 中 6.1.2 所示方法对受试样品进行二极管正向电压测试, 测试结果如表 B.4 所示

表 B.4 二极管正向电压测试结果

样品编号	上桥单元 (V)	下桥单元 (V)	样品编号	上桥单元 (V)	下桥单元 (V)
A-1	1.720	1.708	B-1	1.961	1.933
A-2	1.758	1.693	B-2	1.685	1.878
A-3	1.716	1.718	B-3	1.860	1.749
A-4	1.752	1.714	B-4	1.810	1.807
A-5	1.714	1.740	B-5	1.786	1.772
A-6	1.715	1.709	B-6	1.882	1.961
A-7	1.721	1.696	B-7	1.766	1.762
A-8	1.732	1.708	B-8	1.925	2.003
A-9	1.732	1.732	B-9	1.851	1.898
A-10	1.736	1.701	B-10	1.731	1.635
A-11	1.763	1.729	B-11	1.908	1.839
A-12	1.708	1.700	B-12	1.837	1.789
A-13	1.705	1.695	B-13	1.752	1.874
A-14	1.743	1.731	B-14	1.862	1.836
A-15	1.724	1.727	B-15	1.882	1.829
A-16	1.756	1.721	B-16	1.731	1.817
A-17	1.761	1.732	B-17	1.768	1.848
A-18	1.733	1.722	B-18	1.899	1.868
A-19	1.736	1.728	B-19	1.844	1.889
A-20	1.698	1.708	B-20	1.834	1.819
A-21	1.727	1.732	B-21	1.895	1.652
A-22	1.728	1.692	B-22	1.945	1.971
A-23	1.739	1.742	B-23	1.882	1.742
A-24	1.750	1.738	B-24	1.669	1.849
A-25	1.716	1.732	B-25	1.952	1.967

B. 2. 4 集电极截止电流测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.3.4 所示方法对受试样品进行集电极截止电流测试, 测试结果如表 B.5 所示

表 B.5 集电极截止电流测试结果

样品编号	上桥单元 (μA)	下桥单元 (μA)	样品编号	上桥单元 (μA)	下桥单元 (μA)
A-1	0.31070	0.38925	B-1	0.45719	0.45005
A-2	0.32289	0.38020	B-2	0.36014	0.46079
A-3	0.35380	0.32583	B-3	0.44142	0.43220
A-4	0.28743	0.31143	B-4	0.41290	0.49583
A-5	0.27807	0.41163	B-5	0.63254	0.53698
A-6	0.32321	0.33027	B-6	0.37205	0.60362
A-7	0.31783	0.27931	B-7	0.37924	0.51302
A-8	0.26697	0.42447	B-8	0.40624	0.53680
A-9	0.29652	0.32492	B-9	0.34931	0.46112
A-10	0.26803	0.42872	B-10	0.35907	0.50961
A-11	0.30892	0.33987	B-11	0.33561	0.41602
A-12	0.25018	0.31659	B-12	0.41328	0.54969
A-13	0.29433	0.37777	B-13	0.39091	0.65942
A-14	0.29747	0.38385	B-14	0.37737	0.56152
A-15	0.32325	0.41347	B-15	0.34879	0.48556
A-16	0.28649	0.36682	B-16	0.38423	0.42077
A-17	0.31877	0.40604	B-17	0.38830	0.44352
A-18	0.27588	0.42097	B-18	0.43814	0.45357
A-19	0.35108	0.38512	B-19	0.42049	0.62490
A-20	0.25892	0.39555	B-20	0.37456	0.40484
A-21	0.30905	0.28962	B-21	0.43007	0.44500
A-22	0.25295	0.44121	B-22	0.39300	0.47812
A-23	0.32249	0.39293	B-23	0.40696	0.50397
A-24	0.33577	0.40686	B-24	0.39592	0.48092
A-25	0.28733	0.38096	B-25	0.39584	0.41470

B. 2. 5 栅极漏电流测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.3.5 所示方法对受试样品进行栅极漏电流测试, 测试结果如表 B.6 所示

表 B.6 栅极漏电流测试结果

样品编号	上桥单元 (nA)	下桥单元 (nA)	样品编号	上桥单元 (nA)	下桥单元 (nA)
A-1	40.25	49.72	B-1	50.64	54.67
A-2	45.63	48.51	B-2	50.31	56.51
A-3	45.70	47.14	B-3	50.14	53.20
A-4	45.62	50.20	B-4	52.40	54.78

A-5	43.36	48.73	B-5	50.98	50.69
A-6	44.25	47.58	B-6	47.07	52.90
A-7	45.45	50.41	B-7	51.45	56.69
A-8	42.69	50.41	B-8	48.77	52.78
A-9	44.45	46.92	B-9	49.49	53.66
A-10	46.76	52.38	B-10	49.15	53.50
A-11	46.45	48.40	B-11	51.44	53.97
A-12	45.59	48.44	B-12	50.73	56.95
A-13	45.56	49.07	B-13	49.81	54.69
A-14	47.60	49.90	B-14	50.09	57.69
A-15	45.20	46.46	B-15	48.61	53.11
A-16	47.17	48.80	B-16	46.66	56.67
A-17	45.87	53.93	B-17	45.90	55.27
A-18	43.93	49.67	B-18	48.52	58.70
A-19	44.88	47.76	B-19	50.75	53.07
A-20	44.35	50.82	B-20	52.51	55.46
A-21	47.93	51.48	B-21	50.49	53.30
A-22	42.99	49.49	B-22	48.11	58.48
A-23	42.85	50.76	B-23	47.96	55.98
A-24	43.33	49.08	B-24	51.02	57.81
A-25	44.01	49.76	B-25	49.35	57.57

B. 2. 6 IGBT 芯片结-壳热阻测试

根据 JESD 51-14 2010 的测试方法对受试样品进行 IGBT 芯片结-壳热阻测试，测试结果如表 B.7 所示。

表 B.7 IGBT 芯片结-壳热阻测试结果

样品编号	上桥单元 (K/W)	下桥单元 (K/W)	样品编号	上桥单元 (K/W)	下桥单元 (K/W)
A-1	0.3783	0.3855	B-1	0.3983	0.4062
A-2	0.3831	0.3912	B-2	0.4085	0.4143
A-3	0.3832	0.3996	B-3	0.4033	0.4076
A-4	0.3837	0.4058	B-4	0.4034	0.4095

B. 2. 7 二极管芯片结-壳热阻测试

根据 JESD 51-14 2010 的测试方法对受试样品进行二极管芯片结-壳热阻测试，测试结果如表 B.8 所示。

表 B.8 二极管芯片结-壳热阻测试结果

样品编号	上桥单元 (K/W)	下桥单元 (K/W)	样品编号	上桥单元 (K/W)	下桥单元 (K/W)
A-1	0.6228	0.6058	B-1	0.7656	0.7640
A-2	0.6202	0.6346	B-2	0.7302	0.7546

A-3	0.6120	0.6012	B-3	0.7369	0.7390
A-4	0.6043	0.5928	B-4	0.7543	0.7525

B.2.8 集电极-发射极击穿电压测试

根据 IEC 60747-9 2019 中附录 A 所示方法对受试样品进行集电极-发射极击穿电压测试， V_{CES} 为 1200V，测试截止条件为集电极电流达到 2400V 或达到测试设备极限，测试结果如表 B.9 所示。

表 B.9 集电极-发射极击穿电压测试结果

样品编号	上桥单元	下桥单元	样品编号	上桥单元	下桥单元
A-1	1440V	1440 V	B-1	1500 V	1500 V
A-2	1440 V	1440 V	B-2	1500 V	1500 V
A-3	1500 V	1500 V	B-3	1500 V	1500 V

B.2.9 栅极-发射极击穿电压测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.3.5.2 所示电路图对受试样品进行栅极-发射极击穿电压测试， V_{CES} 为 20V，测试截止条件为集电极电流达到 40V 或达到测试设备极限，测试结果如表 B.10 所示。

表 B.10 栅极-发射极击穿电压测试结果

样品编号	上桥单元	下桥单元	样品编号	上桥单元	下桥单元
A-1	40V 未失效	40V 未失效	B-1	40V 未失效	40V 未失效
A-2	40V 未失效	40V 未失效	B-2	40V 未失效	40V 未失效
A-3	40V 未失效	40V 未失效	B-3	40V 未失效	40V 未失效

B.2.10 最大集电极峰值电流测试

根据 IEC 60747-9 2019 中 6.3.1.2 所示电路图对受试样品进行最大集电极峰值电流测试， I_{CRM} 为 100A，测试截止条件为集电极电流达到 200A 或达到测试设备极限，步进应力间隔为 5A，测试结果如表 B.11 所示。

表 B.11 最大集电极峰值电流测试结果

样品编号	上桥单元	下桥单元	样品编号	上桥单元	下桥单元
A-1	180A	185A	B-1	200A 未失效	200A 未失效
A-2	180A	180A	B-2	200A 未失效	200A 未失效
A-3	175A	180A	B-3	200A 未失效	200A 未失效

B.3 性能裕量建模

根据 A 产品和 B 产品的厂家提供信息，确定各个 IGBT 关键性能参数的规范阈值如表 B.12 所示。

表 B.12 关键性能参数规范阈值

序号 i	关键性能参数 p_i	A 产品规范阈值		B 产品规范阈值	
		p_i^L	p_i^U	p_i^L	p_i^U
1	栅极-发射极阈值电压(V)	5.2	6.4	5.0	6.5
2	集电极-发射极饱和电压(V)	-	2.15	-	2.25
3	二极管正向电压(V)	-	2.2	-	2.3
4	集电极截止电流(μ A)	-	1000	-	1000
5	栅极漏电流(nA)	-	100	-	400
6	IGBT 芯片结-壳热阻(K/W)	-	0.53	-	0.54
7	二极管芯片结-壳热阻(K/W)	-	0.84	-	0.81
8	集电极-发射极击穿电压(V)	1200	-	1200	-
9	栅极-发射极击穿电压(V)	20	-	20	-
10	最大集电极峰值电流(A)	100	-	100	-

根据各个 IGBT 关键性能参数的属性及规范阈值，按照如下形式构建裕量方程：

$$m_i = \begin{cases} \min\{p_i - p_i^L, p_i^U - p_i\}, & i = 1 \\ p_i^U - p_i, & i = 2, 3, \dots, 7 \\ p_i - p_i^L, & i = 8, 9, 10 \end{cases}$$

B.4 关键性能参数期望与标准差计算

根据附录 A 所示方法计算非步进应力测试的关键性能参数期望与标准差，计算结果如表 B.13 所示。

表 B.13 非步进应力测试的关键性能参数期望与标准差

序号 i	关键性能参数	A 产品		B 产品	
		期望 μ_i	标准差 σ_i	期望 μ_i	标准差 σ_i
1	栅极-发射极阈值电压(V)	5.994	0.02301	5.997	0.004951
2	集电极-发射极饱和电压(V)	1.879	0.01195	1.751	0.004164
3	二极管正向电压(V)	1.746	0.00749	1.707	0.03044
4	集电极截止电流(μ A)	0.3496	0.02570	0.5800	0.03424
5	栅极漏电流(nA)	41.55	0.9122	52.21	1.7484
6	IGBT 芯片结-壳热阻(K/W)	0.3946	0.005961	0.4013	0.002280
7	二极管芯片结-壳热阻(K/W)	0.6246	0.007385	0.7838	0.075059

根据 7.2 所示方法对步进应力测试数据进行线性插值，处理结果如表 B.14 所示。

表 B.14 步进型测试数据线性插值处理结果

集电极-发射极击穿电压(V)	A 产品	1392	1404	1416	1428	1476	1488
	B 产品	1448.57	1457.14	1465.71	1474.29	1482.86	1491.43
栅极-发射极击穿电压(V)	A 产品	40	40	40	40	40	40

	B 产品	40	40	40	40	40	40
最大集电极峰值电流(A)	A 产品	172.5	176	177	178	179	182.5
	B 产品	200	200	200	200	200	200

将表 B.14 的数据输入到附录 A 所示算法，计算步进应力测试的关键性能参数期望与标准差，计算结果如表 B.15 所示。

表 B.15 步进应力测试的关键性能参数期望与标准差

序号 i	关键性能参数	A 产品		B 产品	
		期望 μ_i	标准差 σ_i	期望 μ_i	标准差 σ_i
8	集电极-发射极击穿电压(V)	1450.99	20.3224	1470.00	9.6459
9	栅极-发射极击穿电压(V)	40	0	40	0
10	最大集电极峰值电流(A)	177.5	2.7503	200	0

B.5 可靠度计算

根据 A 产品的各项关键性能参数裕量模型以及期望与标准差信息，分别计算各项关键性能参数对应的可靠度：

$$R_{A1} = \min \left\{ 1 - \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(5.994 - 5.2)}{\sqrt{3} \times 0.02301} \right) \right)^{-1}, \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(5.994 - 6.4)}{\sqrt{3} \times 0.02301} \right) \right)^{-1} \right\}$$

$$= 0.9999999999999873$$

$$R_{A2} = \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(1.879 - 2.15)}{\sqrt{3} \times 0.01195} \right) \right)^{-1} = 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

$$R_{A3} = \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(1.746 - 2.2)}{\sqrt{3} \times 0.00749} \right) \right)^{-1} = 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

$$R_{A4} = \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(0.3496 - 1000)}{\sqrt{3} \times 0.02570} \right) \right)^{-1} = 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

$$R_{A5} = \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(41.55 - 100)}{\sqrt{3} \times 0.9122} \right) \right)^{-1} = 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

$$R_{A6} = \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(0.3946 - 0.53)}{\sqrt{3} \times 0.005961} \right) \right)^{-1} = 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

$$R_{A7} = \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(0.6246 - 0.84)}{\sqrt{3} \times 0.007385} \right) \right)^{-1} = 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

$$R_{A8} = 1 - \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(1450.99 - 1200)}{\sqrt{3} \times 20.3224} \right) \right)^{-1} = 0.999999999813235$$

$$R_{A9} = 1$$

$$R_{A10} = 1 - \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(177.5 - 100)}{\sqrt{3} \times 2.7503}\right) \right)^{-1} = 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

根据 B 产品的各项关键性能参数裕量模型以及期望与标准差信息，分别计算各项关键性能参数对应的可靠度：

$$R_{B1} = \min \left\{ 1 - \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(5.997 - 5)}{\sqrt{3} \times 0.004951}\right) \right)^{-1}, \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(5.997 - 6.5)}{\sqrt{3} \times 0.004951}\right) \right)^{-1} \right\}$$

$$= 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

$$R_{B2} = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(1.751 - 2.25)}{\sqrt{3} \times 0.004164}\right) \right)^{-1} = 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

$$R_{B3} = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(1.707 - 2.3)}{\sqrt{3} \times 0.03044}\right) \right)^{-1} = 0.9999999999999996$$

$$R_{B4} = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(0.58 - 1000)}{\sqrt{3} \times 0.03424}\right) \right)^{-1} = 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

$$R_{B5} = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(52.21 - 400)}{\sqrt{3} \times 1.7484}\right) \right)^{-1} = 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

$$R_{B6} = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(0.4013 - 0.54)}{\sqrt{3} \times 0.00228}\right) \right)^{-1} = 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

$$R_{B7} = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(0.7838 - 0.81)}{\sqrt{3} \times 0.075059}\right) \right)^{-1} = 0.653197$$

$$R_{B8} = 1 - \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(1470 - 1200)}{\sqrt{3} \times 9.6459}\right) \right)^{-1} = 1 - \epsilon, \epsilon < 10^{-15}$$

$$R_{B9} = 1$$

$$R_{B10} = 1$$

根据以上结果，计算 A 产品和 B 产品的可靠度：

$$R_A = \min \{R_{Ai}\} = 0.99999999813235$$

$$R_B = \min \{R_{Bi}\} = 0.653197$$

据此可判断，A 产品可靠域评价结果优于 B 产品。