

制造业可靠性系统工程标准

STANDARD OF RELIABILITY SYSTEMS ENGINEERING FOR MANUFACTURING ENTERPRISES

RSE-STD-199.1 2023

IGBT 性能一致性评价方法

Evaluation method of the performance consistency 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.....	II
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 性能一致性评价流程.....	2
4.2 IGBT 性能参数一致性评价.....	3
4.3 IGBT 性能函数一致性评价.....	3
4.4 IGBT 性能一致性综合评价.....	3
5 详细要求.....	3
5.1 IGBT 性能参数一致性评价.....	3
5.2 IGBT 性能函数一致性评价.....	5
5.3 IGBT 性能一致性综合评价.....	7
附录 A（资料性附录）期望及标准差计算方法.....	8
附录 B（资料性附录）基于最小二乘估计的回归分析方法.....	10
B.1 最小二乘估计方法.....	10
B.2 回归方程显著性检验.....	10
B.3 回归系数显著性检验.....	11
附录 C（资料性附录）使用场景未知时的性能一致性权重分配方法.....	13
附录 D（资料性附录）IGBT 性能一致性评价示例.....	14
D.1 评价对象.....	14
D.2 性能参数一致性评价.....	14
D.3 性能函数一致性评价.....	20
D.4 性能一致性综合评价.....	27

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 性能一致性评价方法

1 范围

本标准规定了 IGBT 模块的性能一致性评价的程序和方法，用于定量评价 IGBT 模块的性能一致性水平。

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

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)

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

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

3.1.1

IGBT 性能参数 performance parameter of IGBTs

表征 IGBT 固有性能水平的参数。如栅极-发射极阈值电压、集电极-发射极饱和电压。

3.1.2

IGBT 性能函数 performance function of IGBTs

IGBT 性能参数与外因变量之间的定量关系。如开通能量与集电极电流之间的函数。

3.1.3

IGBT 标称性能函数 typical performance function of IGBTs

IGBT 标称性能曲线对应的性能函数。

3.1.4

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。

3.1.5

IGBT 实测性能函数 measured performance function of IGBTs

根据受试 IGBT 单元的实际测试数据拟合得到的性能函数，包括单个 IGBT 受试 IGBT 单元的实测性能函数与全体受试 IGBT 单元的平均实测性能函数。

3.1.6

IGBT 性能一致性 performance consistency of IGBTs

IGBT 实测性能参数、函数与厂家标称性能参数、函数的偏离程度以及实测性能参数、函数的分散程度。

3.1.7

IGBT 性能偏离度 deviation index of IGBTs

用于量化表征 IGBT 实测性能与厂家标称性能的偏离程度的指标。

3.1.8

IGBT 性能分散度 dispersion index of IGBTs

用于量化表征 IGBT 实测性能分散程度的指标。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

I_C ——集电极电流

I_F ——二极管正向电流

I_{CRM} ——集电极重复峰值电流

V_{GE} ——栅极-发射极电压

V_{CE} ——集电极-发射极电压

V_F ——二极管正向电压

E_{on} ——开通能量

E_{off} ——关断能量

E_{rec} ——反向恢复能量

4 通用要求

4.1 IGBT 性能一致性评价流程

IGBT 性能一致性评价的基本流程如图 1 所示。包含三个步骤：IGBT 性能参数一致性评价、IGBT 性能函数一致性评价和 IGBT 性能一致性综合评价。

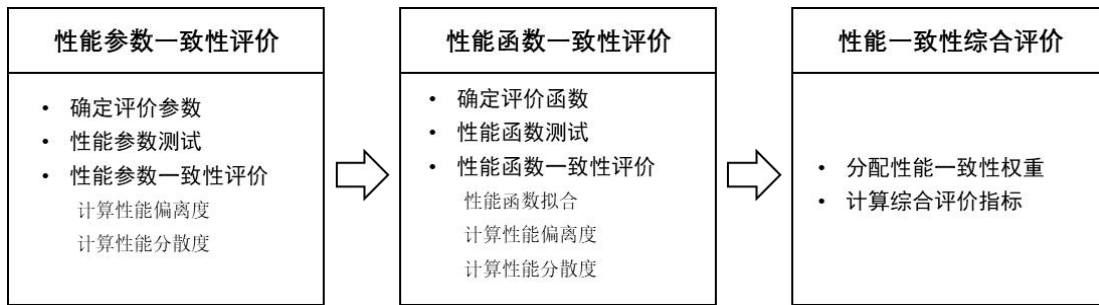


图 1 IGBT 性能一致性评价的基本流程

4.2 IGBT 性能参数一致性评价

根据 IGBT 实测性能参数以及标称性能参数，计算每一项性能参数的偏离度与分散度。

4.3 IGBT 性能函数一致性评价

根据 IGBT 实测性能函数以及标称性能曲线，计算每一项性能函数的偏离度与分散度。

4.4 IGBT 性能一致性综合评价

根据 IGBT 单项性能参数和单项性能函数一致性评价结果，加权综合计算 IGBT 性能偏离度与分散度。

5 详细要求

5.1 IGBT 性能参数一致性评价

5.1.1 确定评价参数

表 1 给出了 IGBT 性能参数一致性评价的参数范围。

表 1 IGBT 性能参数一致性评价的参数范围

序号	性能参数
1	栅极-发射极阈值电压
2	集电极-发射极饱和电压
3	二极管正向电压
4	开通能量
5	关断能量
6	反向恢复能量
7	开通延迟时间
8	上升时间
9	关断延迟时间
10	下降时间
11	栅极电荷
12	恢复电荷

5.1.2 性能参数测试

(1) 测试条件

各个性能参数的结温测试条件如表 2 所示。若有多个结温测试条件，则需要分别在各项结温条件下进行性能参数测试。最大工作结温以及其他测试条件参考厂家提供的信息确定。

表 2 IGBT 性能参数测试条件

序号	性能参数	结温条件
1	栅极-发射极阈值电压	25°C
2	集电极-发射极饱和电压	25°C, 最大工作结温
3	二极管正向电压	25°C, 最大工作结温
4	开通能量	25°C, 最大工作结温
5	关断能量	25°C, 最大工作结温
6	反向恢复能量	25°C, 最大工作结温
7	开通延迟时间	25°C, 最大工作结温
8	上升时间	25°C, 最大工作结温
9	关断延迟时间	25°C, 最大工作结温
10	下降时间	25°C, 最大工作结温
11	栅极电荷	25°C
12	恢复电荷	25°C, 最大工作结温

(2) 测试方法

根据 IEC 60747-2 2016 与 IEC 60747-9 2019 的测试方法，基于以上测试条件进行 IGBT 性能参数测试。

(3) 测试样本

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

5.1.3 评价步骤

按照下列步骤分别计算各项 IGBT 性能参数的偏离度与分散度。

(1) 计算期望与标准差

根据附录 A 所示方法分别计算第 i 项性能参数的期望和标准差。

(2) 计算性能偏离度

根据式 (1) 计算第 i 项性能参数的偏离度：

$$\alpha_i = 1 - e^{-\frac{|T_i - \mu_i|}{T_i}}, \quad (1)$$

式中， α_i —— 第 i 项性能参数的偏离度；

T_i —— 第 i 项性能参数的标称值；

μ_i —— 第 i 项性能参数的期望。

特殊地，若第 i 项性能参数的标称值在厂家提供的信息中缺失，则该项性能参数的偏

离度为 0。

(3) 计算性能分散度

根据式 (2) 计算第 i 项性能参数的分散度：

$$\beta_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \quad (2)$$

式中， β_i —— 第 i 项性能参数的分散度；

μ_i —— 第 i 项性能参数的期望；

σ_i —— 第 i 项性能参数的标准差。

5.2 IGBT 性能函数一致性评价

5.2.1 确定评价函数

表 3 给出了 IGBT 性能函数一致性评价的函数范围。

表 3 IGBT 性能函数一致性评价的函数范围

序号	性能函数	函数形式
1	输出性能函数	$V_{CE}(I_C)$
2	转移性能函数	$V_{GE}(I_C)$
3	二极管正向偏压性能函数	$V_F(I_F)$
4	开通能量性能函数	$E_{on}(I_C)$
5	关断能量性能函数	$E_{off}(I_C)$
6	反向恢复能量性能函数	$E_{rec}(I_C)$

5.2.2 性能函数测试

(1) 测试条件

针对表 3 中的各项 IGBT 性能函数，以 I_C 或 I_F 为自变量，在 0.1 倍 I_{CRM} 至 1 倍 I_{CRM} 之间以等电流间距选取若干测试点，测试点数量一般应不少于 10 个。各个性能函数的电流和结温测试条件如表 4 所示。若有多个结温测试条件，则需要分别在各项结温条件下进行性能函数测试。最大工作结温以及其他测试条件参考厂家提供的信息确定。

表 4 IGBT 性能函数测试条件

序号	性能函数	电流条件	结温条件
1	输出性能函数	0.1 I_{CRM} ~ I_{CRM} 范围内选取若干测试点	25℃，最大工作结温
2	转移性能函数	0.1 I_{CRM} ~ I_{CRM} 范围内选取若干测试点	25℃，最大工作结温
3	二极管正向偏压性能函数	0.1 I_{CRM} ~ I_{CRM} 范围内选取若干测试点	25℃，最大工作结温
4	开通能量性能函数	0.1 I_{CRM} ~ I_{CRM} 范围内选取若干测试点	最大工作结温
5	关断能量性能函数	0.1 I_{CRM} ~ I_{CRM} 范围内选取若干测试点	最大工作结温
6	反向恢复能量性能函数	0.1 I_{CRM} ~ I_{CRM} 范围内选取若干测试点	最大工作结温

(2) 测试方法

根据 IEC 60747-9 2019 规定的测试方法，基于以上测试条件进行 IGBT 性能函数测试，

得到实际测试数据点。

(3) 测试样本

测试样本应不少于 3 个模块, 每个受试模块至少对 1 个 IGBT 单元进行性能函数测试。

5.2.3 评价步骤

按照下列步骤分别计算各项 IGBT 性能函数的偏离度与分散度。

(1) 标称性能曲线数据提取

对于第 i 项标称性能曲线, 利用图表数据提取工具, 在 0.1 倍 I_{CRM} 至 1 倍 I_{CRM} 范围之内提取不少于 20 个数据点。

(2) 标称性能函数拟合

利用附录 B 所示方法, 对提取得到的标称特性曲线数据进行回归分析, 拟合得到第 i 项标称性能函数。其中, 输出特性函数应采用线性函数形式进行拟合, 其他性能函数均采用三次多项式形式进行拟合。

(3) 实测性能函数拟合

根据附录 B 所示方法, 分别对各个受试 IGBT 单元的实际测试数据进行回归分析, 拟合得到第 j 个受试 IGBT 单元的第 i 项实测性能函数。其中, 输出特性函数应采用线性函数形式进行拟合, 其他性能函数均采用三次多项式形式进行拟合。

(4) 平均实测性能函数拟合

根据附录 B 所示方法, 对所有受试 IGBT 单元的实际测试数据进行回归分析, 拟合得到第 i 项平均实测性能函数。其中, 输出特性函数应采用线性函数形式进行拟合, 其他性能函数均采用三次多项式形式进行拟合。

(5) 性能函数坐标变换

对第 i 项标称性能函数进行线性坐标变换, 使其自变量和因变量均满足最小值为 0、最大值为 1.45, 得到经过规定坐标变换的第 i 项标称性能函数。将该自变量变换函数和因变量变换函数同样作用于第 i 项平均实测性能函数, 得到经过规定坐标变换的第 i 项平均实测性能函数。

(6) 计算性能偏离度

根据式 (3) 计算第 i 项性能函数的偏离度:

$$\alpha_i = 1 - e^{-H_i},$$

$$H_i = \int_0^{1.45} |\bar{\Phi}_i(\bar{I}) - \bar{\Gamma}_i(\bar{I})| d\bar{I}, \quad (3)$$

式中, α_i —— 第 i 项性能函数的偏离度;

\bar{I} —— 经过规定自变量坐标变换的电流应力;

$\bar{\Phi}_i(\bar{I})$ —— 经过规定坐标变换的第 i 项标称性能函数;

$\bar{\Gamma}_i(\bar{I})$ —— 经过规定坐标变换的第 i 项平均实测性能函数。

特殊地, 若第 i 项性能函数的标称曲线在厂家提供的信息中缺失, 则该项性能函数的偏离度为 0。

(7) 计算性能分散度

根据式 (4) 计算第 i 项性能函数的分散度:

$$\beta_i = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} \frac{\sigma_{i,k}}{\mu_{i,k}}, \quad (4)$$

式中, β_i —— 第 i 项性能函数的分散度;

$\mu_{i,k}$ —— 将所有受试 IGBT 单元的第 i 项实测性能函数在

$$I = \frac{k}{10} I_{CRM} \quad (k=1, 2, \dots, 10)$$

处的函数值集合作为输入, 根据附录 A 所示方

法计算得到的期望;

$\sigma_{i,k}$ —— 将所有受试 IGBT 单元的第 i 项实测性能函数在

$$I = \frac{k}{10} I_{CRM} \quad (k=1, 2, \dots, 10)$$

处的函数值集合作为输入, 根据附录 A 所示方

法计算得到的标准差。

5.3 IGBT 性能一致性综合评价

(1) 分配性能一致性权重

在 IGBT 使用场景已知的情况下, 根据使用场景确定 IGBT 各项性能参数与性能函数的性能一致性权重。

在 IGBT 使用场景未知的情况下, 应根据附录 C 所示方法确定 IGBT 各项性能参数与性能函数的性能一致性权重。

(2) 计算性能偏离度

根据式 (5) 计算 IGBT 综合性能偏离度

$$\alpha_{\text{综合}} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \alpha_i, \quad (5)$$

式中, $\alpha_{\text{综合}}$ —— IGBT 综合性能偏离度;

n —— 所考虑性能参数与性能函数的总数量;

α_i —— 第 i 项性能参数或性能函数的偏离度;

ω_i —— 第 i 项性能参数或性能函数的性能一致性权重。

(3) 计算性能分散度

根据式 (6) 计算 IGBT 综合性能分散度

$$\beta_{\text{综合}} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \beta_i, \quad (6)$$

式中, $\beta_{\text{综合}}$ —— IGBT 综合性能分散度;

n —— 所考虑性能参数与性能函数的总数量;

β_i —— 第 i 项性能参数或性能函数的分散度;

ω_i —— 第 i 项性能参数或性能函数的性能一致性权重。

附录 A
(资料性附录)
期望及标准差计算方法

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)

基于最小二乘估计的回归分析方法

B.1 最小二乘估计方法

在对回归系数进行估计时，基于残差平方和的最小二乘法最为常用。残差平方和也称剩余平方和，定义为所有真实值到估计值距离的平方和。最小二乘法得到的回归系数就是让残差平方和最小的一组取值。

在最小二乘估计中，首先构建观测矩阵

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix},$$

其中， n 是观测数据的数量，即实验点的数量； y_i 表示第 i 个实验点对应的观测数据。接下来构建回归系数矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & \dots & x_{1,r} \\ 1 & x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & \dots & x_{2,r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n,1} & x_{n,2} & x_{n,3} & \dots & x_{n,r} \end{pmatrix},$$

其中， r 是回归系数的总项数，在二次多项式中包括一次项、二次项和交叉项； $x_{i,j}$ 表示第 i 个观测数据对应的第 j 项回归系数取值。

回归参数的最小二乘估计为

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}.$$

其中，

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \begin{pmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_r \end{pmatrix},$$

$\hat{\beta}_0$ 为常数项， $\hat{\beta}_i$ 为第 i 个回归系数对应的回归参数。

B.2 回归方程显著性检验

回归方程显著性检验一般可利用 F 检验，是用服从 F 分布的检验统计量进行假设检验。回归方程 F 检验需要构建如下 F 统计量：

$$F = \frac{U/r}{Q/(n-r-1)}$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$Q = S_{yy} - U$$

其中， U 为回归平方和， Q 为剩余平方和， S_{yy} 为样本离差平方和， r 为回归系数数量， n 为观测数据数量， y_i 为观测数据， \bar{y} 为观测数据平均值， \hat{y}_i 为回归模型估计值。

若满足 $F > F_{1-\alpha}(r, n-r-1)$ ，则回归方程在 $1-\alpha$ 置信水平下显著，否则认为不显著。其中， α 一般取 0.05， $F_{1-\alpha}$ 的值可查 F 分布表得到。

B.3 回归系数显著性检验

回归系数显著性检验也可利用 F 检验。

首先建立矩阵

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} l_{1,1} & l_{1,2} & \cdots & l_{1,r} \\ l_{2,1} & l_{2,2} & \cdots & l_{2,r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{r,1} & l_{r,2} & \cdots & l_{r,r} \end{pmatrix},$$

其中，

$$l_{i,j} = \sum_{k=1}^n x_{k,i} x_{k,j} - n \bar{x}_i \bar{x}_j, \quad i, j = 1, 2, \dots, m$$

$$\bar{x}_p = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{k,p}$$

r 为回归系数数量， n 为观测数据数量， $x_{k,i}$ 表示第 k 个观测数据对应的第 i 项回归系数取值。

对矩阵 \mathbf{L} 求逆，得到

$$\mathbf{L}^{-1} = \begin{pmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & \cdots & C_{1,r} \\ C_{2,1} & C_{2,2} & \cdots & C_{2,r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{r,1} & C_{r,2} & \cdots & C_{r,r} \end{pmatrix}.$$

接下来计算第 i 个回归系数的偏回归平方和：

$$Q_i = \frac{\hat{\beta}_i^2}{C_{ii}}.$$

构建第 i 个回归系数的 F 统计量：

$$F_i = \frac{Q_i}{Q/n - r - 1},$$

其中， r 为回归系数数量， n 为观测数据数量， Q 为剩余平方和。

若满足 $F_i > F_{1-\alpha}(1, n-r-1)$ ，则第 i 个回归系数在 $1-\alpha$ 置信水平下显著，否则认为不显著。其中， α 一般取 0.05， $F_{1-\alpha}$ 的值可查 F 分布表得到。

附录 C
(资料性附录)

使用场景未知时的性能一致性权重分配方法

将各项 IGBT 的各项性能参数与性能函数分为输出性能、驱动性能、损耗性能、时间性能与其他性能 5 类，如表 C.1 所示。

表 C.1 IGBT 性能分类

性能分类	性能参数	性能函数
输出性能	集电极-发射极饱和电压	输出性能函数
驱动性能	栅极-发射极阈值电压, 栅极电荷	转移性能函数
损耗性能	开通能量, 关断能量, 反向恢复能量,	开通能量性能函数, 关断能量性能函数, 反向恢复能量性能函数
时间性能	开通延迟时间, 上升时间, 关断延迟时间, 下降时间	-
其他性能	二极管正向电压, 恢复电荷	二极管正向偏压性能函数

对每一类性能分类分配权重值 0.2, 再将每个性能分类的权重平均分配至其下属的各项性能参数或性能函数, 如图 C.1 所示。

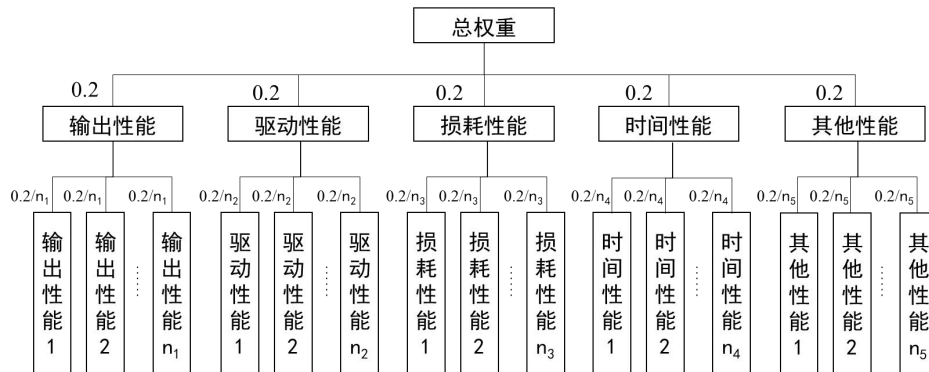


图 C.1 使用场景未知时的 IGBT 性能一致性权重分配示意图

附录 D
(资料性附录)
IGBT 性能一致性评价示例

D.1 评价对象

针对两款来自不同厂家的 IGBT 产品进行性能一致性评价,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。A 产品厂家提供了完整的标称信息,B 产品缺少常温开通损耗开通能量参数、常温关断能量参数、常温反向恢复能量参数以及常温恢复电荷参数的标称信息。

D.2 性能参数一致性评价

根据 IEC 60747-9 2019 的测试方法,取 A 产品与 B 产品各 25 个样品进行性能参数测试,测试数据如图 D.1 至图 D.22 所示。其中,横轴 1-25 对应上桥单元测试数据,横轴 26-50 对应下桥单元测试数据。

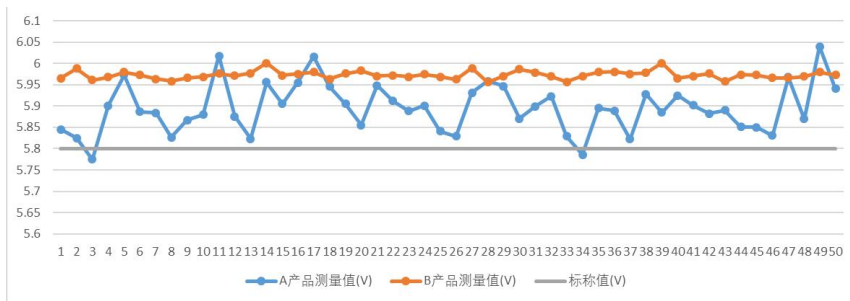


图 D.1 栅极-发射极阈值电压参数测量值

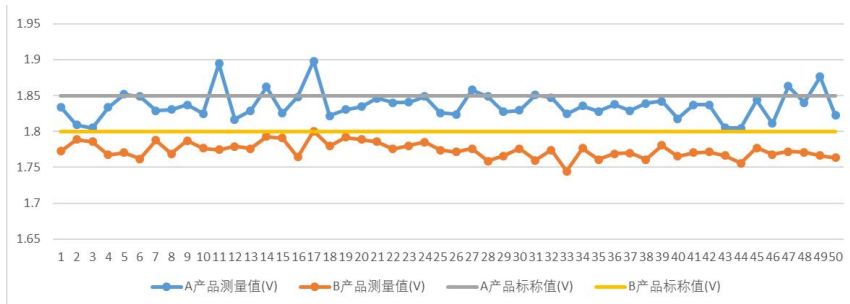


图 D.2 常温集电极-发射极饱和电压参数测量值

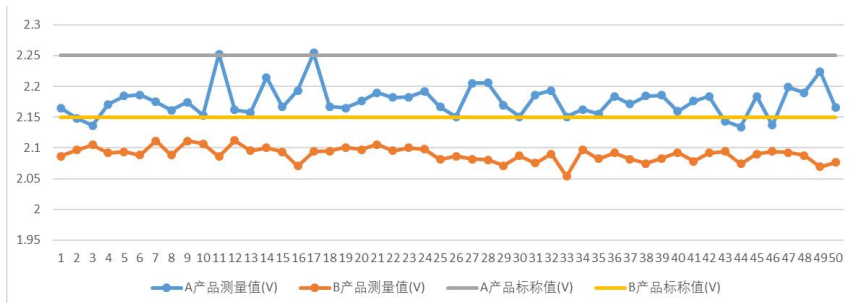


图 D.3 高温集电极-发射极饱和电压参数测量值

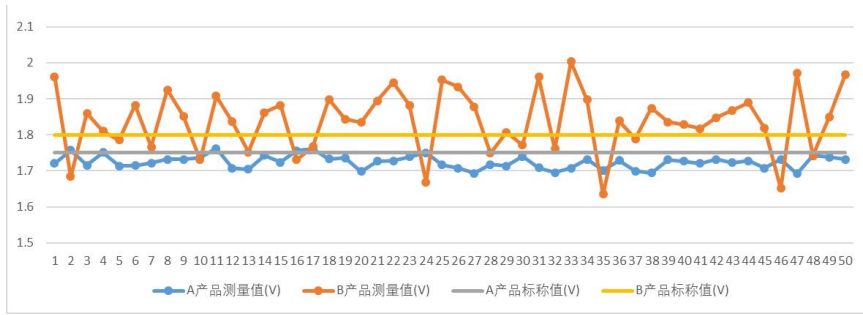


图 D.4 常温二极管正向电压参数测量值

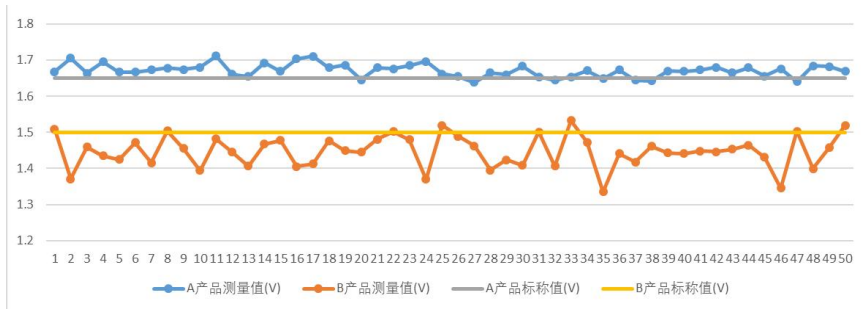


图 D.5 高温二极管正向电压参数测量值

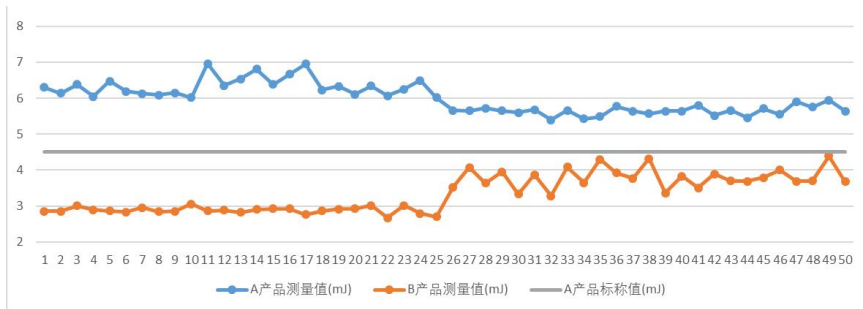


图 D.6 常温开通能量参数测量值

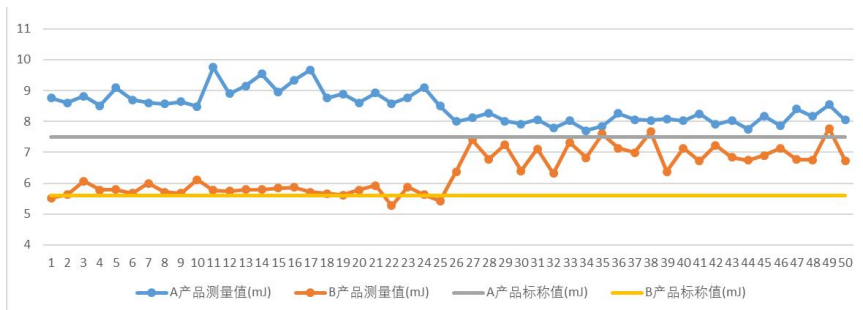


图 D.7 高温开通能量参数测量值

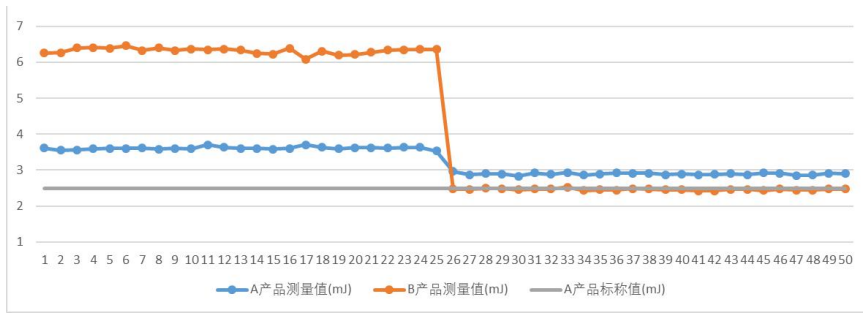


图 D.8 常温关断能量参数测量值

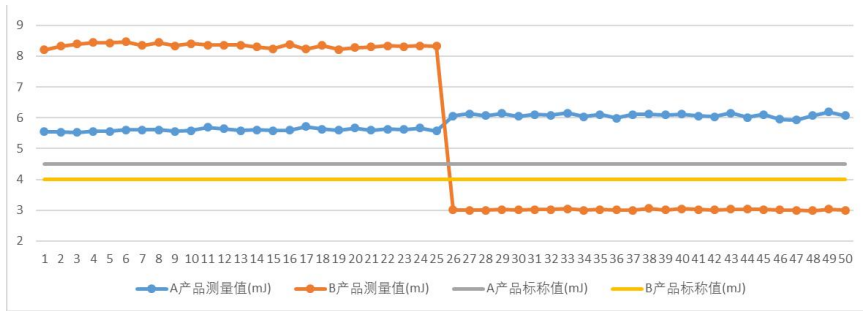


图 D.9 高温关断能量参数测量值

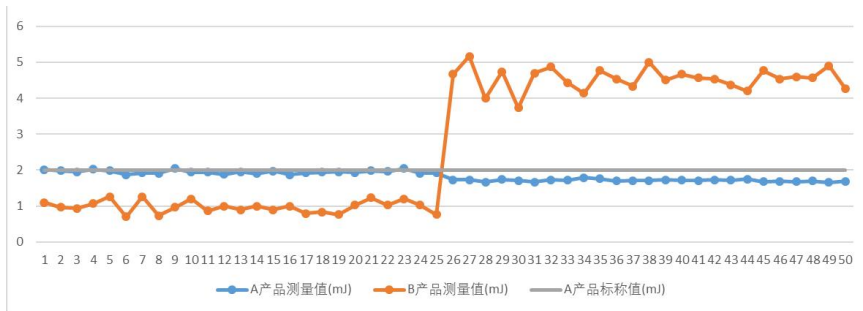


图 D.10 常温反向恢复能量参数测量值

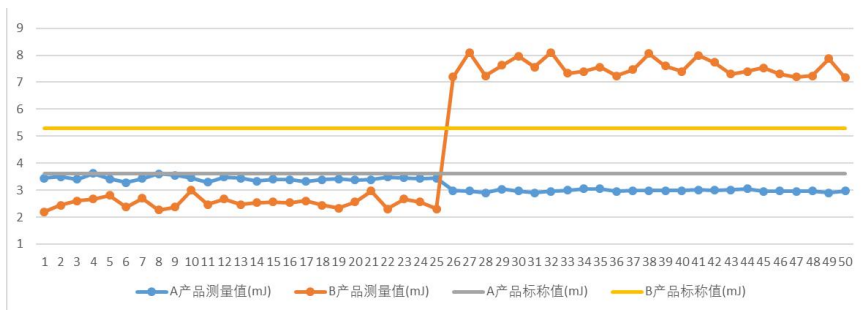


图 D.11 高温反向恢复能量参数测量值

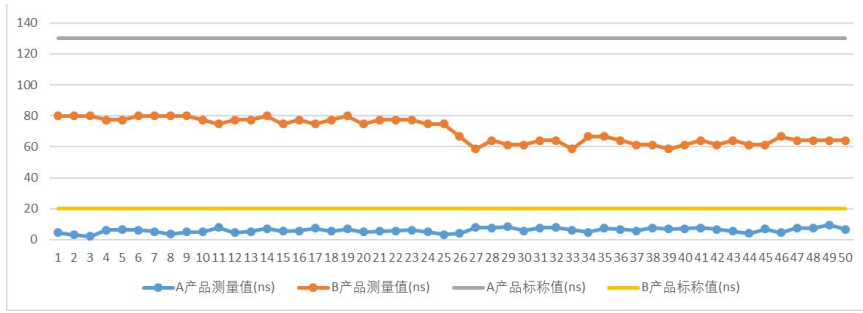


图 D.12 常温开通延迟时间参数测量值

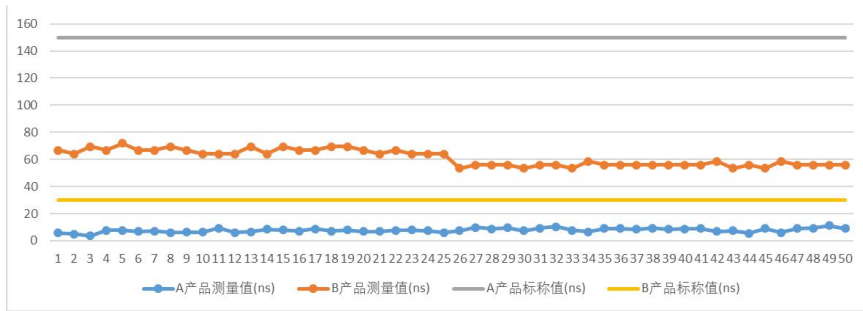


图 D.13 高温开通延迟时间参数测量值

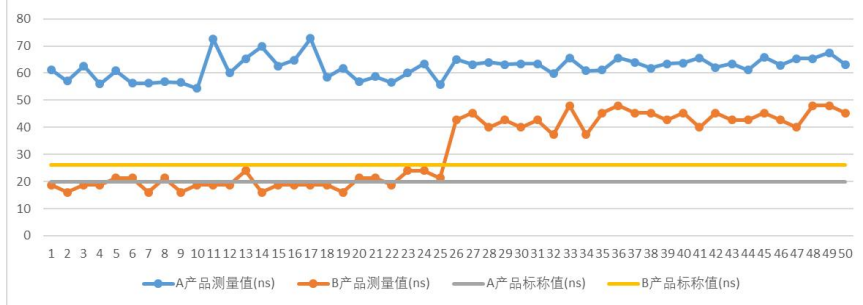


图 D.14 常温上升时间参数测量值

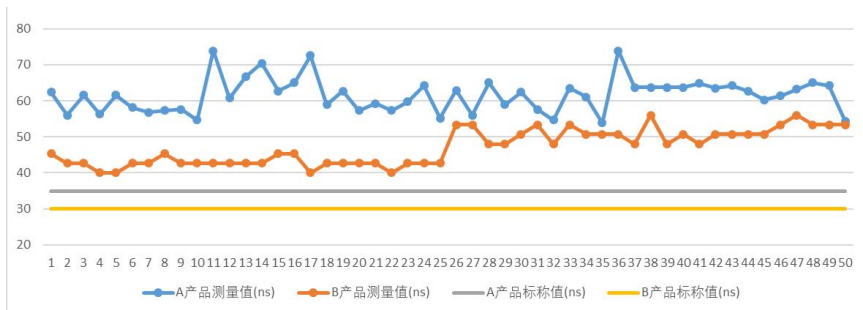


图 D.15 高温上升时间参数测量值

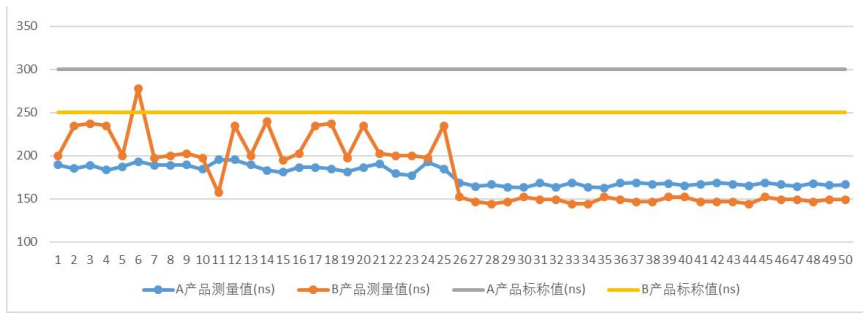


图 D.16 常温关断延迟时间参数测量值

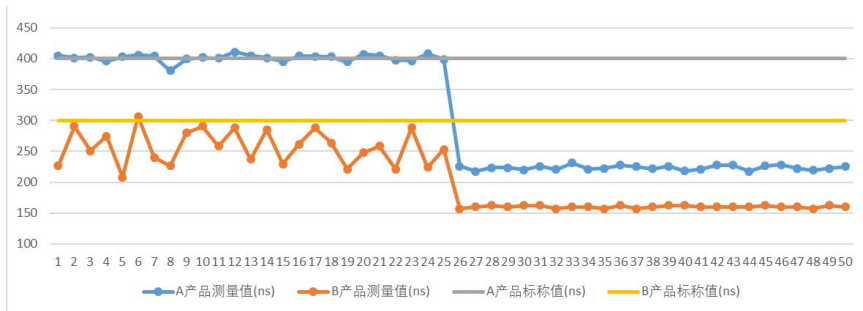


图 D.17 高温关断延迟时间参数测量值

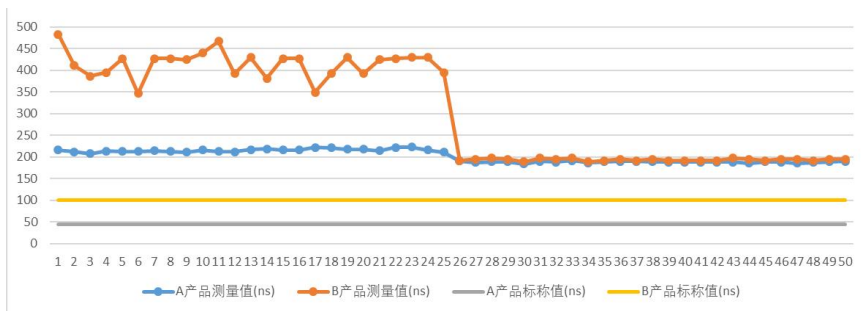


图 D.18 常温下降时间参数测量值

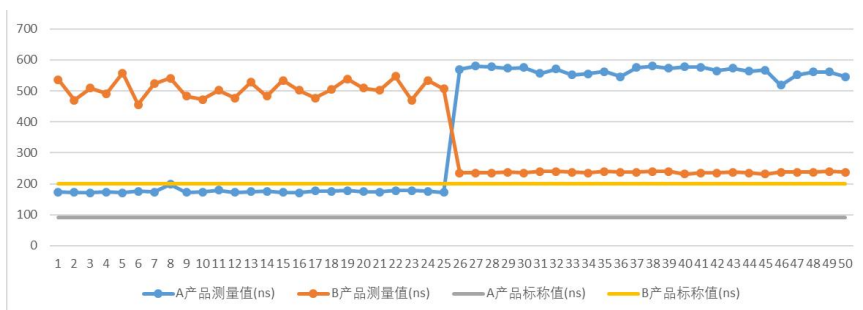


图 D.19 高温下降时间参数测量值

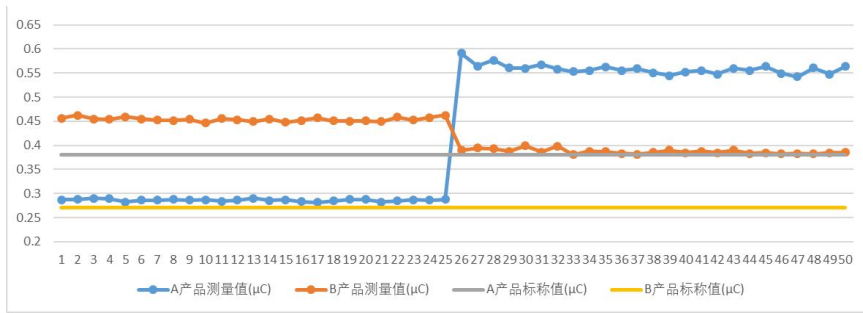


图 D.20 栅极电荷参数测量值

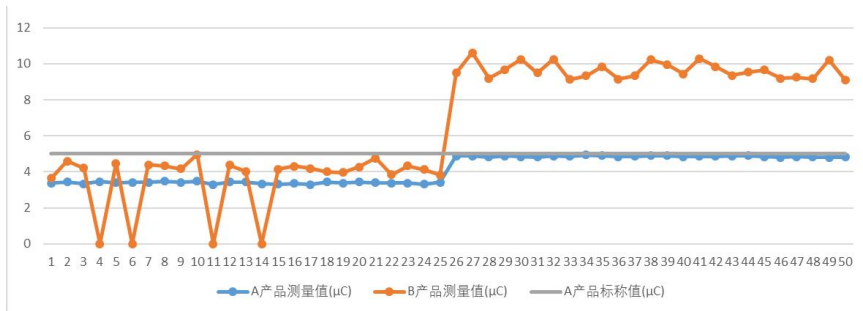


图 D.21 常温恢复电荷参数测量值

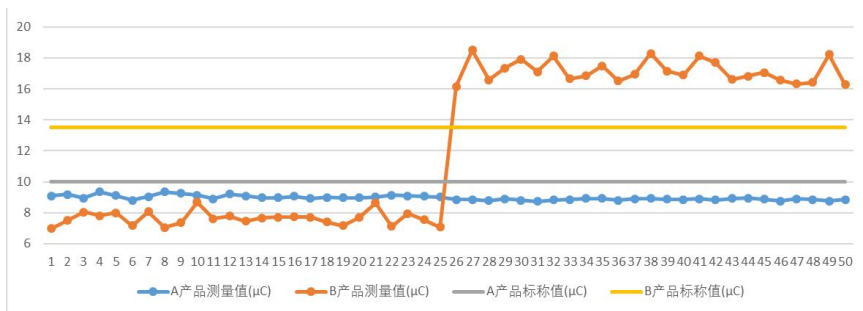


图 D.22 高温恢复电荷参数测量值

基于以上性能参数测试数据以及标称信息，分别计算各项性能参数的偏离度 α_i 以及分散度 β_i ，计算结果如表 D.1 所示。

表 D.1 性能参数一致性评价结果

性能参数	A 产品		B 产品	
	α_i	β_i	α_i	β_i
阈值电压	0.0319	0.0038	0.0323	0.0008
常温集电极-发射极饱和电压	0.0154	0.0064	0.0278	0.0024
高温集电极-发射极饱和电压	0.0058	0.0051	0.0417	0.0028
常温二极管正向电压	0.0022	0.0043	0.0529	0.0278
高温二极管正向电压	0.0262	0.0045	0.0862	0.0155

常温开通能量	0.2760	0.0234	1	0.0651
高温开通能量	0.1739	0.0238	0.1411	0.0551
常温关断能量	0.2059	0.0662	1	0.2742
高温关断能量	0.2031	0.0188	0.0718	0.2742
常温反向恢复能量	0.0898	0.0299	1	0.3867
高温反向恢复能量	0.1275	0.0356	0.0404	0.2981
常温开通延迟时间	1-8.51E-7	0.0842	0.5115	0.0600
高温开通延迟时间	1-7.23E-15	0.1189	0.4011	0.0601
常温上升时间	0.5084	0.0318	0.1432	0.2055
高温上升时间	0.3869	0.0364	0.3176	0.0694
常温关断延迟时间	0.5189	0.0259	0.1517	0.1509
高温关断延迟时间	0.2623	0.1706	0.4541	0.0985
常温下降时间	0.5393	0.0368	0.4717	0.2061
高温下降时间	0.5277	0.3104	0.3511	0.2217
栅极电荷	0.0889	0.2061	0.3032	0.0441
常温恢复电荷	0.1881	0.1100	1	0.0307
高温恢复电荷	0.0786	0.0065	0.0807	0.2260

D.3 性能函数一致性评价

根据 IEC 60747-9 2019 的测试方法,取 A 产品与 B 产品各 3 个样品进行性能函数测试,测试数据如图 D.23 至图 D.40 所示。其中, A1-A3 为 A 产品样品的上桥单元, A4-A6 为 A 产品样品的下桥单元, B1-B3 为 B 产品样品的上桥单元, B4-B6 为 B 产品样品的下桥单元。

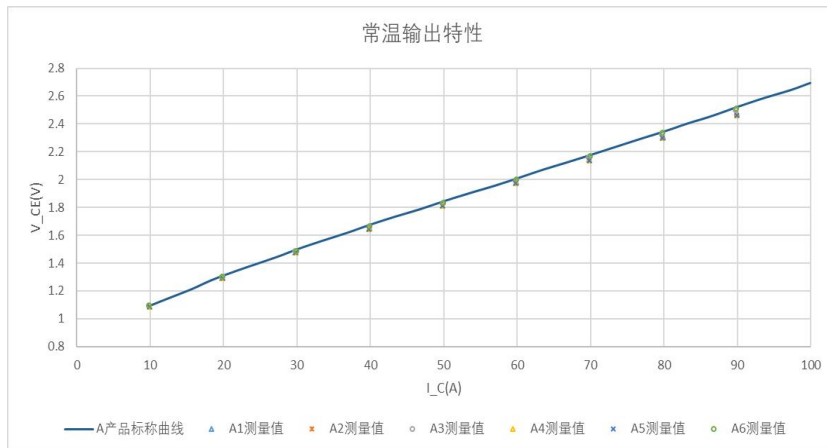


图 D.23 A 产品常温输出性能函数测量值

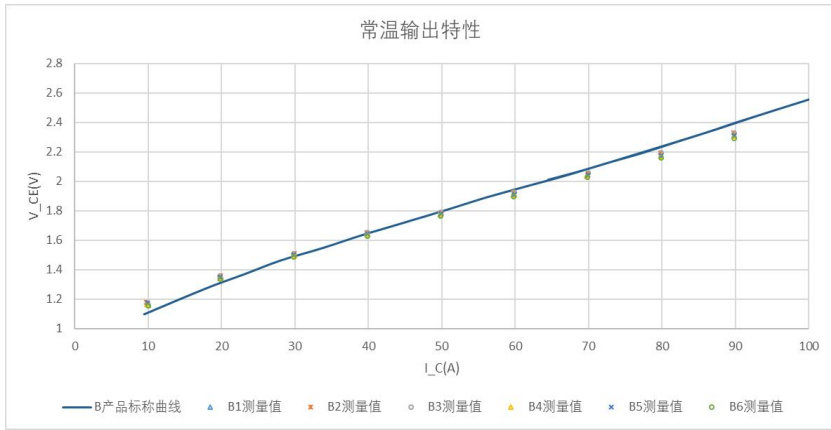


图 D.24 B 产品常温输出性能函数测量值

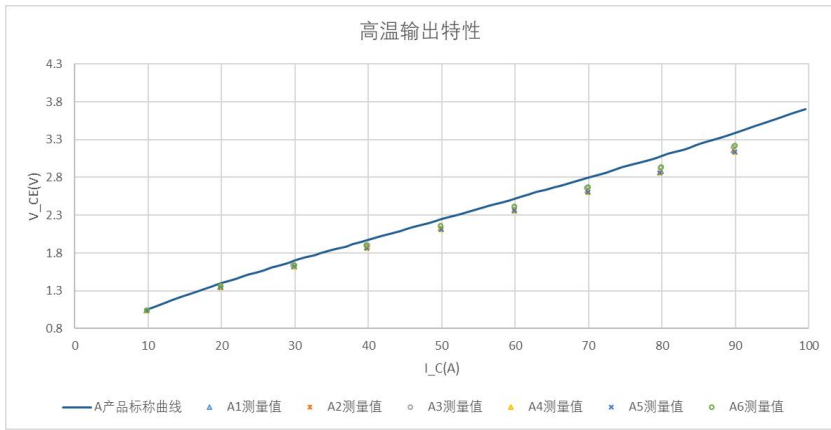


图 D.25 A 产品高温输出性能函数测量值

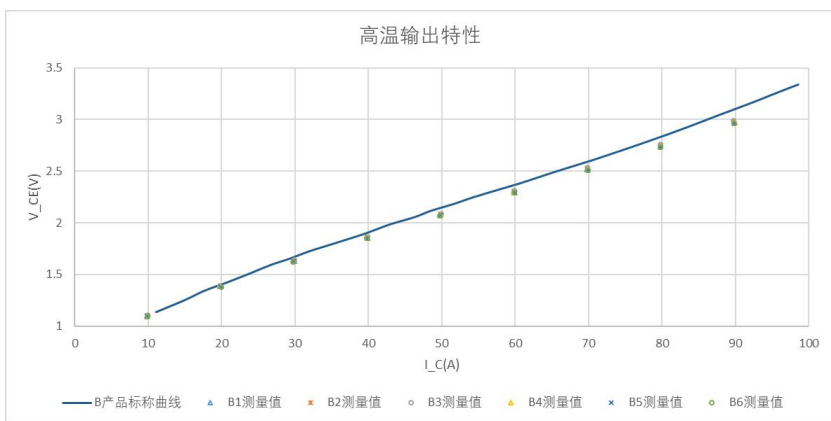


图 D.26 B 产品高温输出性能函数测量值

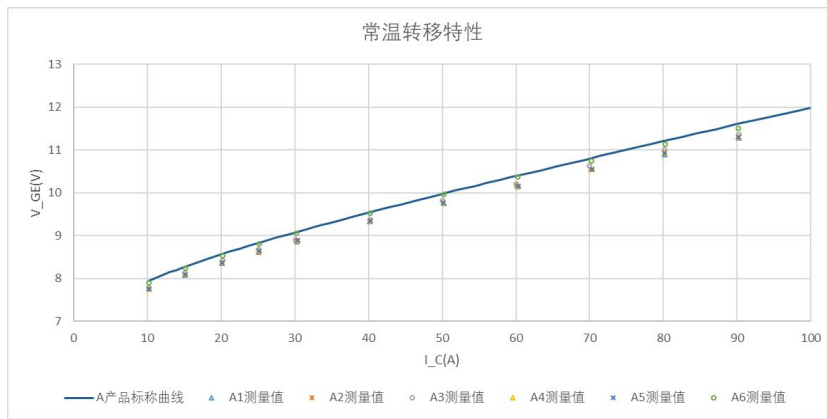


图 D.27 A 产品常温转移性能函数测量值

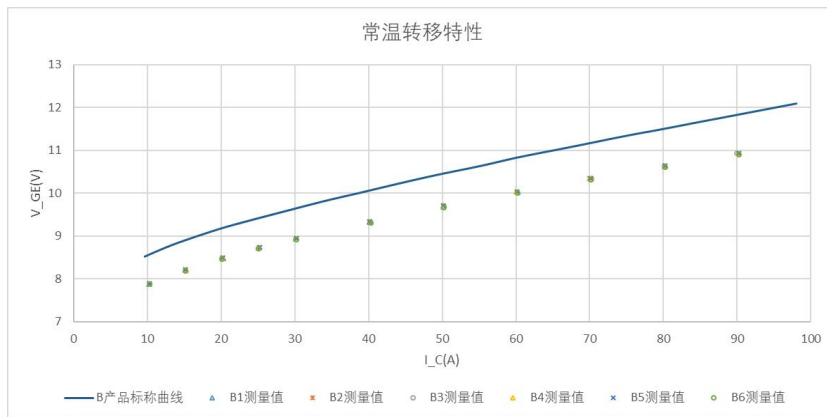


图 D.28 B 产品常温转移性能函数测量值

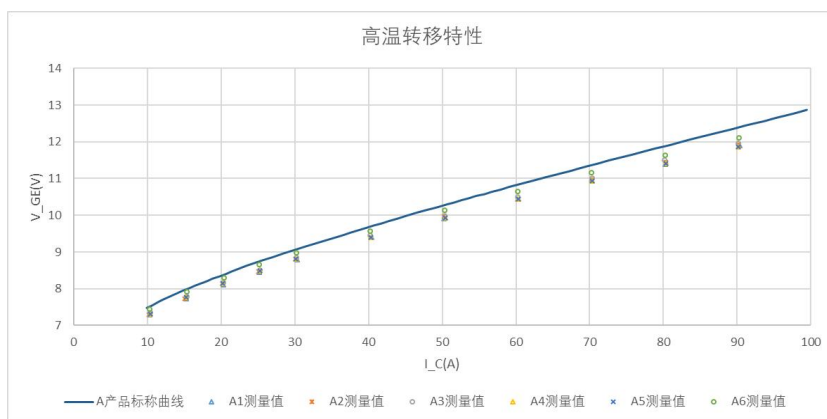


图 D.29 A 产品高温转移性能函数测量值

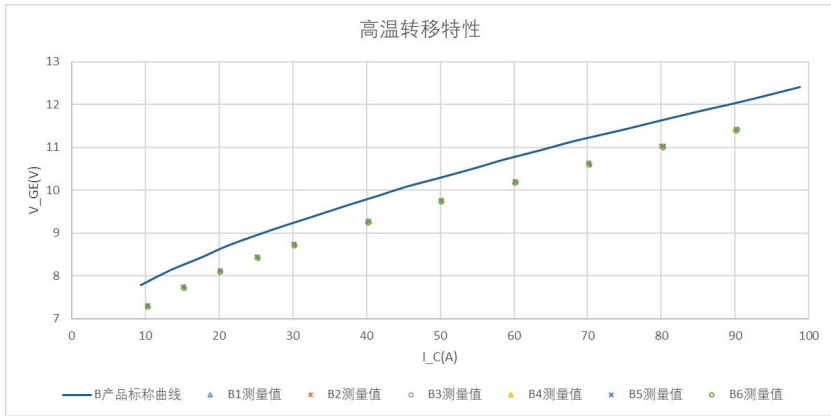


图 D.30 B 产品高温转移性能函数测量值

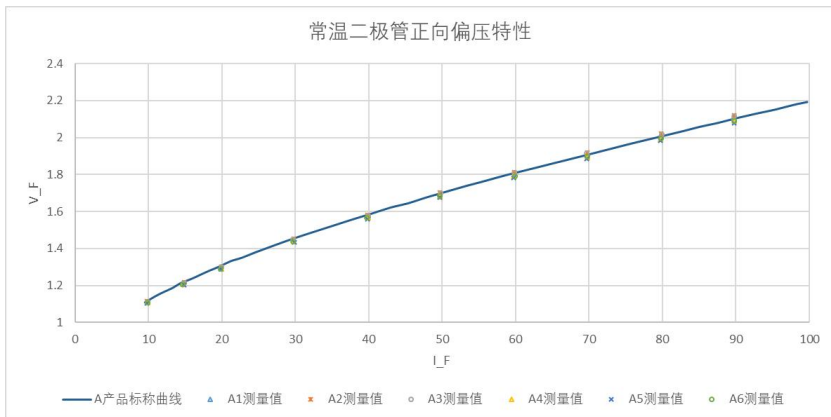


图 D.31 A 产品常温二极管正向偏压性能函数测量值

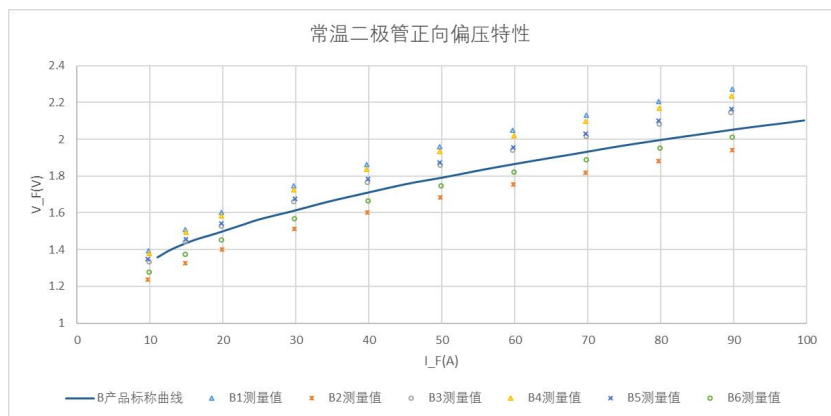


图 D.32 B 产品常温二极管正向偏压性能函数测量值

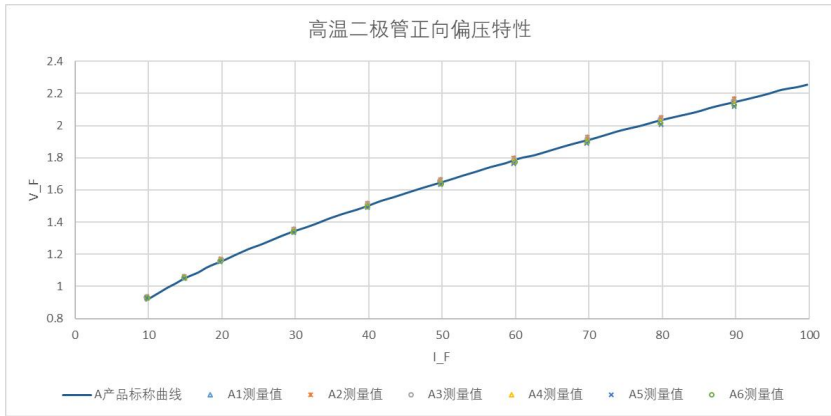


图 D.33 A 产品高温二极管正向偏压性能函数测量值

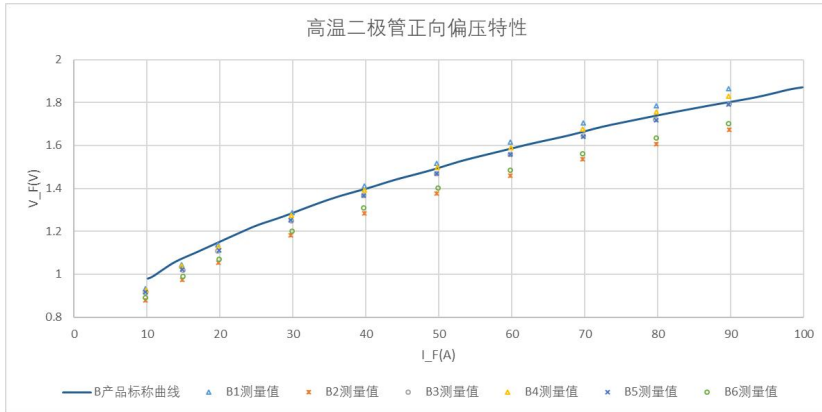


图 D.34 B 产品高温二极管正向偏压性能函数测量值

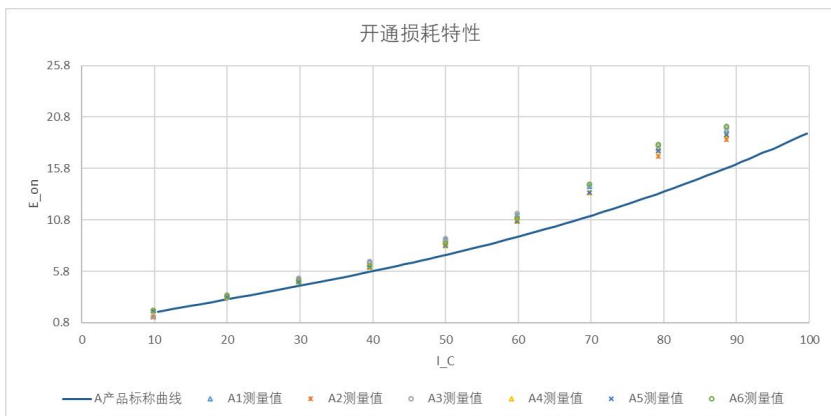


图 D.35 A 产品开通能量性能函数测量值

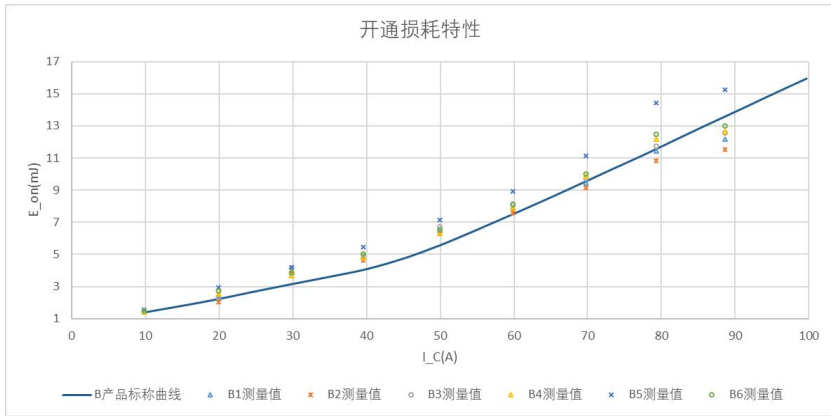


图 D.36 B 产品开通能量性能函数测量值

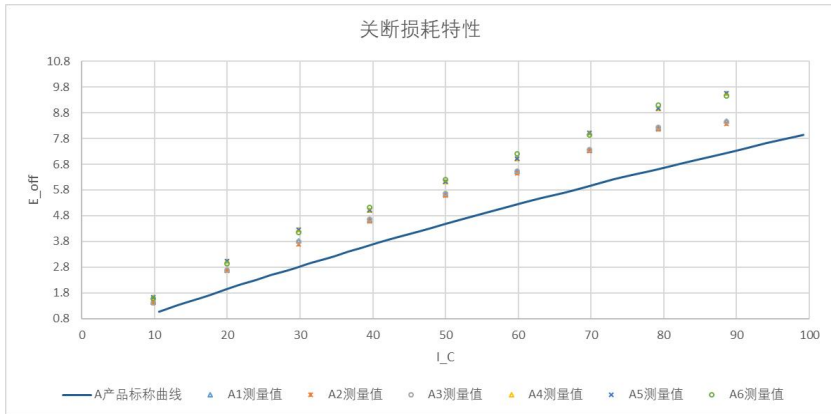


图 D.37 A 产品关断能量性能函数测量值

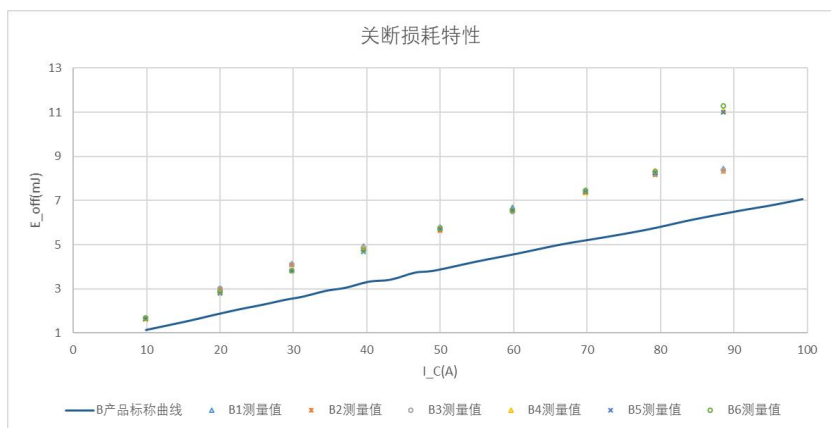


图 D.38 B 产品关断能量性能函数测量值

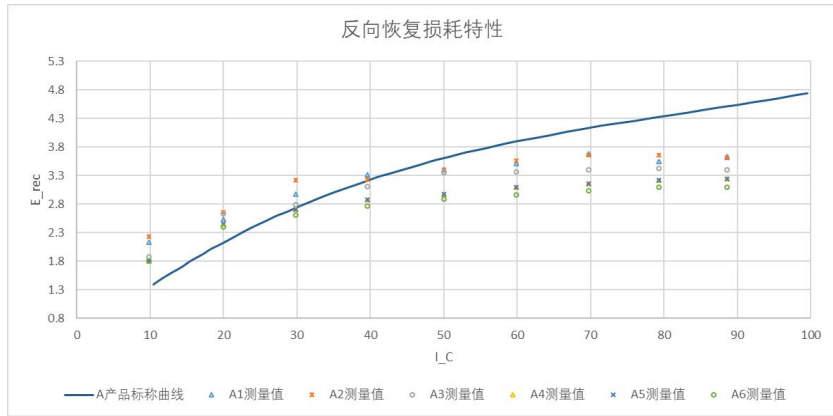


图 D.39 A 产品反向恢复能量性能函数测量值

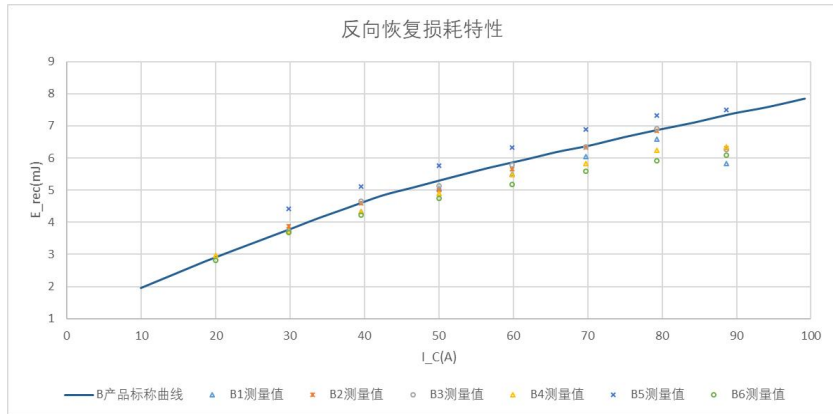


图 D.40 B 产品反向恢复能量性能函数测量值

基于以上性能函数测试数据以及标称信息，分别计算各项性能函数的偏离度 α_i 以及分散度 β_i ，计算结果如表 D.2 所示。

表 D.2 性能函数一致性评价结果

性能函数	A 产品		B 产品	
	α_i	β_i	α_i	β_i
常温输出性能函数	0.0302	0.0034	0.0546	0.0038
高温输出性能函数	0.0931	0.0046	0.0607	0.0023
常温转移性能函数	0.0977	0.0050	0.3567	0.0008
高温转移性能函数	0.1099	0.0051	0.2189	0.0008
常温二极管正向偏压性能函数	0.0254	0.0034	0.1522	0.0334
高温二极管正向偏压性能函数	0.0160	0.0041	0.0795	0.0209
开通能量性能函数	0.1969	0.0298	0.0821	0.0617
关断能量性能函数	0.3494	0.0328	0.5163	0.036

恢复损耗性能函数	0.3108	0.0370	0.1685	0.1474
----------	--------	--------	--------	--------

D.4 性能一致性综合评价

利用 5.3 节所示方法分配性能一致性权重，分配结果如表 D.3 所示。

表 D.3 性能一致性权重分配

性能分类	性能参数/性能函数	性能一致性权重 ω_i
输出性能	常温饱和压降	0.05
	高温饱和压降	0.05
	常温输出性能函数	0.05
	高温输出性能函数	0.05
驱动性能	栅极-发射极阈值电压	0.05
	栅极电荷	0.05
	常温转移性能函数	0.05
	高温转移性能函数	0.05
损耗性能	常温开通能量	0.0222
	高温开通能量	0.0222
	常温关断能量	0.0222
	高温关断能量	0.0222
	常温反向恢复能量	0.0222
	高温反向恢复能量	0.0222
	开通能量性能函数	0.0222
	关断能量性能函数	0.0222
	反向恢复能量性能函数	0.0222
时间性能	常温开通延迟时间	0.025
	高温开通延迟时间	0.025
	常温上升时间	0.025
	高温上升时间	0.025
	常温关断延迟时间	0.025
	高温关断延迟时间	0.025
	常温下降时间	0.025
	高温下降时间	0.025
其他性能	常温二极管正向电压	0.0333
	高温二极管正向电压	0.0333
	常温恢复电荷	0.0333
	高温恢复电荷	0.0333
	常温二极管正向偏压性能函数	0.0333
	高温二极管正向偏压性能函数	0.0333

根据各项性能参数和性能函数的性能一致性权重，分别计算 A 产品综合性能的偏离度

和分散度以及 B 产品综合性能的偏离度和分散度:

$$\alpha_{\text{综合},A} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \alpha_i = 0.1964$$

$$\beta_{\text{综合},A} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \beta_i = 0.0434$$

$$\alpha_{\text{综合},B} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \alpha_i = 0.2626$$

$$\beta_{\text{综合},B} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \beta_i = 0.0770.$$

根据计算结果可知, A 产品的性能偏离度与性能分散度均低于 B 产品, 因此 A 产品的性能一致性优于 B 产品的性能一致性。

