

# 制造业可靠性系统工程标准

STANDARD OF RELIABILITY SYSTEMS ENGINEERING FOR MANUFACTURING ENTERPRISES

RSE-STD-299.1 2022

---

## IGBT 失效率评估指南

IGBT Failure Rate Evaluation Guide

(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。

2022-11-16 发布

---





## 目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语、定义和缩略语.....	1
3.1 术语和定义.....	1
3.2 缩略语.....	1
4 IGBT 分立器件.....	1
4.1 IGBT 分立器件失效率模型.....	1
4.2 模型参数确定方法.....	2
5 IGBT 模块和 IPM.....	9
5.1 IGBT 模块和 IPM 失效率模型.....	9
5.2 模型参数确定方法.....	12
附录 A 寿命剖面建立方法.....	20
附录 B 企业可靠性综合能力评估系数模型及计算方法.....	22
附录 C 有源器件芯片基础失效率数据.....	24

## 前 言

本指南由深圳市为民可靠性系统工程研究院提出并发起编制。

本指南起草单位：北京蓝威技术有限公司、北京航空航天大学、深圳为民可靠性系统工程研究院、山东芯赛思电子科技有限公司、北京航空航天大学云南创新研究院、西安爱科赛博电气股份有限公司。

本指南主要起草人：张栋、夏雪琪、兰祝银、陈玉冰、李若彪、齐敏、王浩伟、李文哲、石全茂。

# IGBT 失效率评估指南

## 1 范围

本指南规定了 IGBT 分立器件、IGBT 模块、基于 IGBT 的智能功率模块的失效率评估方法。

本指南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 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。

GJB 451 可靠性维修性保障性术语

GB/T 3187 可靠性、维修性术语

FIDES Guide 2009 Edition A Reliability Methodology for Electronic Systems.

## 3 术语、定义和缩略语

### 3.1 术语和定义

#### 3.1.1 寿命剖面

**寿命剖面** Life Profile

产品从交付到寿命终结或退出使用这段时间内所经历的全部事件和环境的时序描述。它包括一个或几个任务剖面。

### 3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

IGBT——Insulated Gate Bipolar Transistor 绝缘栅双极型晶体管。

IPM——Intelligent Power Module 智能功率模块。

## 4 IGBT 分立器件

### 4.1 IGBT 分立器件失效率模型

IGBT 分立器件失效率模型如下：

$$\lambda_{IGBT} = \lambda_{physical} \times \Pi_{PM} \times \Pi_{Process} \times \Pi_{LF} \quad (4-1)$$

其中，

$\lambda_{IGBT}$ ——IGBT 分立器件失效率，单位 FIT (1FIT=10<sup>-9</sup>/h)；

$\lambda_{physical}$ ——物理贡献失效率，单位 FIT (1FIT=10<sup>-9</sup>/h)；

$\Pi_{PM}$ ——器件制造过程中的质量和技术控制因子，下角标 PM 代表 Part Manufacturing，简称“器件制造因子”；

$\Pi_{Process}$ ——器件集成在其中的设备或系统产品在开发、制造以及使用过程中的质量和技  
术控制因子，简称“系统厂商过程因子”；

$\Pi_{LF}$ ——无铅焊接工艺因子，下角标 LF 代表 Lead Free。如果器件焊接工艺是有铅的，  
 $\Pi_{LF} = 1$ 。

#### 4.2 模型参数确定方法

##### 4.2.1 物理贡献失效率

物理贡献失效率  $\lambda_{Physical}$  的计算公式如下：

$$\lambda_{Physical} = \sum_i^{Phases} \left( \frac{t_{annual}}{8760} \right)_i \times \left[ \begin{array}{l} \lambda_{0TH} \times \Pi_{Thermal} \\ + \lambda_{0TCyCase} \times \Pi_{TCyCase} \\ + \lambda_{0TCySolder\ joints} \times \Pi_{TCySolder\ joints} \\ + \lambda_{0RH} \times \Pi_{RH} \\ + \lambda_{0Mech} \times \Pi_{Mech} \end{array} \right] \times (\Pi_{induced})_i \quad (4-2)$$

其中，

Phases——寿命剖面中的各个阶段，关于寿命剖面的建立详见附录 A；

$i$ ——寿命剖面中的第  $i$  个阶段， $i=1, 2, 3, \dots$ ；

8760——一个日历年的总小时数；

$t_{annual}$ ——指寿命剖面中第  $i$  个阶段在一个日历年中所占的总小时数；

$\lambda_{0TH}$ ——热应力下的裸芯片基础失效率，IGBT 裸芯片的  $\lambda_{0TH-IGBT}=0.3021$  FIT，续流二极  
管裸芯片的  $\lambda_{0TH-Diode}=0.1574$  FIT，对于含有续流二极管的 IGBT 分立器件  $\lambda_{0TH} = \lambda_{0TH-IGBT} +$   
 $\lambda_{0TH-Diode} = 0.4595$  FIT；

$\Pi_{Thermal}$ —— $\lambda_{0TH}$  的加速因子，取值方法见表 4-2；

$\lambda_{0TCyCase}$ ——温度循环下的器件封装的基础失效率，取值查表 4-1；

$\Pi_{0TCyCase}$ —— $\lambda_{0TCyCase}$  的加速因子，取值方法见表 4-2；

$\lambda_{0TCySolder\ joints}$ ——温度循环下的焊点基础失效率，取值查表 4-1；

$\Pi_{TCySolder\ joints}$ —— $\lambda_{0TCySolder\ joints}$  的加速因子，取值方法见表 4-2；

$\lambda_{0RH}$ ——相对湿度下的器件封装的基础失效率，取值查表 4-1；

$\Pi_{0RH}$ —— $\lambda_{0RH}$  的加速因子，取值方法见表 4-2；

$\lambda_{0Mech}$ ——机械应力下的器件封装的基础失效率，取值查表 4-1；

$\Pi_{0Mech}$ —— $\lambda_{0Mech}$  的加速因子，取值方法见表 4-2；

$\Pi_{induced}$ ——诱导因子，也称过应力因子，所考虑的过应力的种类主要有三种：机械过应  
力（Mechanical Overstress（accidental overload），MOS）、电过应力（Electrical Overstress，  
EOS）以及热过应力（Thermal Overstress，TOS），具体计算公式见(4-3)。

表 4-1 IGBT 分立器件封装在不同应力下的基础失效率

封装	等效名称	描述	$\lambda_{0RH}$	$\lambda_{0TCy\_Case}$	$\lambda_{0TCy\_Solder\_Joint}$	$\lambda_{0Mechanical}$
TO218	ISOWATT218	通孔，功率，塑 料	0.0589	0.00303	0.01515	0.0003
TO220	TO220-5, ISOWATT220, TO220XX					
TO247	Max247, Super247, SOT429					
ISOWATT						

封装	等效名称	描述	$\lambda_{0RH}$	$\lambda_{0TCy\_Case}$	$\lambda_{0TCy\_Solder\_Joint}$	$\lambda_{0Mechanical}$
DO220						
IPACK	TO251AA					
SOT82	TO225					
DPAK	TO252AA, SC63, SOT428	SMD, 功率, 大散热器, L 引脚, 塑料	0.0335	0.00413	0.02065	0.00041
D2PAK	TO263, SC83A, SMD220					
D3PAK	TO268					
ISOTOP	SOT227, TO244, Half-Pak	SMD, 大功率, 螺钉, 塑料	0.99	0.03333	0.16665	0.0033

表 4-2 IGBT 分立器件在不同应力下加速因子计算方法

$\Pi_{Thermal}$	<p>工作阶段: <math>\Pi_{El} \times e^{11604 \times 0.7 \times \left[ \frac{1}{293} \frac{1}{(T_{J,component} + 273)} \right]}</math></p> <p>对 1A 以下信号二极管 (PIN、肖特基管、信号管、变容管):</p> <p>若 <math>\frac{V_{applied}}{V_{rated}} &gt; 0.3</math>, <math>\Pi_{El} = \left( \frac{V_{applied}}{V_{rated}} \right)^{2.4}</math></p> <p>若 <math>\frac{V_{applied}}{V_{rated}} \leq 0.3</math>, <math>\Pi_{El} = 0.056</math></p> <p>对其它器件: <math>\Pi_{El} = 1</math></p> <p>非工作阶段: <math>\Pi_{Thermal} = 0</math></p>
$\Pi_{TCy\_Case}$	$\left( \frac{12 \times N_{annual\_cy}}{t_{annual}} \right) \times \left( \frac{\Delta T_{cycling}}{20} \right)^4 \times e^{1414 \times \left[ \frac{1}{313} \frac{1}{(T_{max\_cycling} + 273)} \right]}$
$\Pi_{TCy\_Solder\_joints}$	$\left( \frac{12 \times N_{annual\_cy}}{t_{annual}} \right) \times \left( \frac{\min(\theta_{cy}, 2)}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{\Delta T_{cycling}}{20} \right)^{1.9} \times e^{1414 \times \left[ \frac{1}{313} \frac{1}{(T_{max\_cycling} + 273)} \right]}$
$\Pi_{Mech}$	$\left( \frac{G_{RMS}}{0.5} \right)^{1.5}$
$\Pi_{RH}$	<p><math>\left( \frac{RH_{ambient}}{70} \right)^{4.4} \times e^{11604 \times 0.9 \times \left[ \frac{1}{293} \frac{1}{(T_{board\_ambient} + 273)} \right]}</math></p> <p>工作阶段: <math>\Pi_{RH} = 0</math></p>

注: 本表中主要参数和变量含义及单位如下

$t_{annual}$ ——每个阶段的时长, 单位 h;

$RH_{ambient}$ ——某阶段周边环境的相对湿度, 单位%;

$T_{board\_ambient}$ ——某阶段中电路板周边环境的平均温度, 单位°C;

$\Delta T_{cycling}$ ——某一温度循环阶段中温度变化幅度, 单位°C;

$T_{max\_cycling}$ ——某一温度循环阶段中的最高温度, 单位°C;

$N_{annual\_cy}$ ——一年内每个循环阶段的循环次数;

$\theta_{cy}$ ——循环时长，单位 h；

$T_{j\_component}$ ——工作阶段器件结温，单位 $^{\circ}C$ ， $T_{j\_component} = T_{ambient} + R_{JA} \cdot P_{dissipated}$ （式中  $T_{ambient}$  为周边环境温度）；

$R_{JA}$ ——器件结到环境的热阻，单位 $^{\circ}C/W$ ；

$P_{dissipated}$ ——此阶段中器件耗散功率，单位 W；

$V_{applied}$ ——此阶段中施加的反向电压，仅针对信号二极管，单位 V。

$V_{rated}$ ——额定反向电压，仅针对信号二极管，单位 V。

诱导因子  $\Pi_{induced}$  的计算公式如下：

$$\Pi_{induced-i} = (2.5 \times \Pi_{application-i} \times \Pi_{Ruggedising})^{0.511 \times \ln(5.20)} \quad (4-3)$$

其中，

$i$ ——寿命剖面中的第  $i$  个阶段， $i=1, 2, 3, \dots$ 。

$\Pi_{application-i}$ ——寿命剖面中第  $i$  个阶段的应用因子，指分立器件所在上一级产品的寿命剖面中的某个阶段的使用环境对可靠性的影响，计算公式见(4-4)。例如，集成在移动系统中的电子产品比集成在固定系统中电子产品更容易产生过机械应力。这些因子在寿命剖面的各个阶段内各不相同。

$\Pi_{Ruggedising}$ ——健壮因子，指分立器件在开发阶段考虑的过应力防护措施对于可靠性的影响，计算公式见(4-5)。

### 1) 应用因子 $\Pi_{application}$ 确定方法

应用因子  $\Pi_{application}$  通过评定一系列指标来确定。每个指标分为三个水平：有利或良性的、中等、不利或恶劣的，每个指标对过应力有特定的影响。 $\Pi_{application}$  的计算如下式：

$$\Pi_{application} = \frac{1}{66} \sum_k P_{OSk} \cdot P_{marks k} \quad (4-4)$$

其中：

$P_{OSk}$ ——各指标的权重，评分规则及权重见表 4-3；

$P_{marks k}$ ——各水平的权重，评分权重见表 4-4。

表 4-3  $P_{OSk}$  评分规则及权重表

k	指标	描述	水平	举例和说明	$P_{OSk}$
1	所考虑阶段的使用者类型	代表面对工作限制时遵守程序的能力	0: 有利或良性的 1: 中等 2: 不利或恶劣的	产品使用及遵守规则大体分为： 0: 质量限制（工业） 1: 产品成本（普通公众） 2: 完成任务和作业文件（军用） 质量、成本、任务限制在所有应用类型中都存在，只是优先级不同	20
2	所考虑阶段的使用者资质等级	代表使用者或操作人员遵照作业文件的控制水平	0: 有利或良性的 1: 中等 2: 不利或恶劣的	0: 高级资质 1: 有资质 2: 资质低，或缺乏经验 某些阶段中所考虑的人员是维修或服务的人员	10
3	系统移动性	代表系统被偶然移动的可能性	0: 有利或良性的 1: 中等 2: 不利或恶劣的	0: 低可能（固定或稳定环境） 1: 中等可能 2: 高可能，变化性大（汽车）	4
4	设备操作	代表误操作、冲击、坠落等等的发生概率	0: 有利或良性的 1: 中等	0: 无操作 1: 有操作，不含更换或拆解	15

k	指标	描述	水平	举例和说明	P <sub>os k</sub>
			2: 不利或恶劣的	2: 有操作, 含更换或拆解 如果所考虑的阶段中可能发生产品维修, 则应调整严苛水平	
5	系统电网类型	代表预期的电源、信号、电线上的干扰水平: 通电、开关切换、供电、连接/断开	0: 有利或良性的 1: 中等 2: 不利或恶劣的	0: 无干扰电网 (专用稳定电源) 1: 轻微干扰电网 2: 受干扰电网 (舱内电网) 电网类型是一个系统参数, 但可以分解并与特定产品相连接	4
6	设备暴露于人类活动	代表暴露于人类活动的偶然性, 如冲击、最终用户改变等等	0: 有利或良性的 1: 中等 2: 不利或恶劣的	0: 无人区 1: 产品区域可能有人类活动 2: 产品区域有一般人类活动 即便没有人为操作, 正常使用中也会暴露于人类活动	8
7	设备暴露于机械扰动	代表与操作机械、引擎、驱动器有关的偶然性, 如冲击、过热、电气干扰、污染物等等	0: 有利或良性的 1: 中等 2: 不利或恶劣的	0: 无 (电话) 1: 间接暴露 (隔间中的产品) 2: 严重或直接暴露 (产品在引擎区)	3
8	设备暴露于天气	代表对雨、雹、雾、沙尘暴、闪电、尘埃的暴露	0: 有利或良性的 1: 中等 2: 不利或恶劣的	0: 无 (家中) 1: 间接暴露 (隔间、车站大厅) 2: 户外 (汽车引擎)	2

表 4-4 P<sub>marks k</sub> 评分权重表

水平	P <sub>marks k</sub>
0: 有利或良性的	1
1: 中等	3.2
2: 不利或恶劣的	10

在上述应用因子 $\Pi_{\text{application}}$ 评分过程中, 应注意:

- 每个指标都应分别确定 P<sub>marks</sub> 和 P<sub>os</sub>;
- 每个阶段都应确定 $\Pi_{\text{application-i}}$ ;
- 应根据指标特点, 从产品不同层级考虑确定 P<sub>os</sub>, 有些指标要从设备级考虑, 有些指标则需要在系统级考虑。

## 2) 健壮因子 $\Pi_{\text{ruggedising}}$ 确定方法

健壮因子 $\Pi_{\text{ruggedising}}$ 的计算公式为:

$$\Pi_{\text{ruggedising}} = 2 - \delta_{\text{ECERCC}} \quad (4-5)$$

其中,  $\delta_{\text{ECERCC}}$ ——企业可靠性综合能力评估系数, 计算方法详见附录 B。

如果不开展企业可靠性综合能力评估系数  $\delta_{\text{ECERCC}}$  的详细计算,  $\Pi_{\text{ruggedising}}$  也可直接采取默认值 1.7。

### 4.2.2 元器件制造因子

IGBT 分立器件制造因子 $\Pi_{\text{PM}}$ 计算公式如下:

$$\Pi_{\text{PM}} = e^{1.39 \times (1 - \text{Part\_grade}) - 0.69} \quad (4-6)$$

其中,  $\text{Part\_grade}$ ——分立器件等级, 计算公式见(4-7)。

$$Part\_grade = \frac{\varepsilon(QA_{Manufacturer} + QA_{Component} + RA_{Component})}{36} \quad (4-7) \text{其中,}$$

$QA_{Manufacturer}$ ——元器件生产商质量体系因子;

$QA_{Component}$ ——元器件质量保证因子;

$RA_{Component}$ ——元器件可靠性保证因子;

$\varepsilon$ ——元器件供应商成熟度因子,表示采购元器件的系统研制厂商对于其元器件供应商的稳定性和成熟度评估系数。

以下 1)~4)为 IGBT 分立器件制造因子  $\Pi_{PM}$  中各个参数的详细确定方法。

### 1) $QA_{Manufacturer}$ 确定方法

表 4-5 元器件生产商质量保证水平

元器件生产商质量保证水平	相对目前技术水平	$QA_{Manufacturer}$
具备 IOS/TS16949 V2002 资质	高	3
具备下列资质之一: QS9000、TL9000、ISO/TS 29001、EN9100、AS9100、JISQ 9100、AQAP 2110、AQAP 2130、IRIS、IEC TS 62239、ESA/ECSS QPL、MIL-PRF-38535 QML、MIL-PRF-19500	相等	2
具备 ISO 9000 version 2000 资质	低	1
没有信息	很低	0

### 2) $QA_{Component}$ 确定方法

表 4-6 元器件质量保证水平

元器件质量保证水平	相对目前技术水平	$QA_{Component}$
具备下列资质之一: AEC Q101、MIL-PRF-19500 JANS、ESCC 5xxxx 水平 B、NASDA-QTS-xxxx I 级	高于平均水平	3
制造商资质包含符合标准 JESD22、EIAJ-ED-4701、MIL-STD-750, 并识别“前端工艺”和“后端工艺”制造厂; 具备下列资质之一: MIL-PRF-19500 JANTX 或 JANTXV、ESCC 5xxxx 水平 C、NASDA-QTS-xxxx II 级。	等效	2
具备 MIL-PRF-19500 JAN 资质或制造商内部资质程序, 未识别制造厂	低于平均水平	1
无信息	很低	0

### 3) $RA_{Component}$ 确定方法

表 4-7 元器件可靠性试验

加速老化试验	高温反向压置(HTRB)	高温反向门偏压(HTGB)	间歇运行寿命或功率温度循环 <sup>(2)</sup>	TC、THB 或 HAST 预老化	温度循环(TC)	高压锅试验(PCT)	高湿高温反向偏压(H <sup>3</sup> TRB)	
参考标准	EIA JESD - 22-A108 A 或等效	EIA JESD - 22-A108 A 或等效	MIL-STD-750 方法 1037 EIA JESD22 A-105	EIA JESD - 22-A113A 或等效	EIA JESD - 22-A104 或等效	EIA JESD - 22-A102 或等效	EIA JESD - 22-A101 或等效	
	测试结果							风险 $RA_{Component}$
很可靠水平 A	1000h 125°C 80%~100% 额定电压	1000h 150°C 80%~100% 额定电压	Ta=25°C 偏置部件获得 $\Delta$ T <sub>j</sub> ≥100°C (未达	完成	-55°C/+150°C 1000 循环或 -65°C/+150°C	85°C 、 85%RH 下 2000h 154/0	130°C 85%RH 168 小时 231/0	3

	231/0 <sup>(1)</sup> 1500/0*	231/0 <sup>(1)</sup> 1500/0*	最大绝对等级) 231/0 <sup>(1)</sup> 1500/0*		500 循环 231/0 或 -55°C/+125°C 1000 循环 385/0			
很可靠 水平 B	1000h 125°C 80%~100% 额定电压 154/0 <sup>(1)</sup> 900/0*	1000h 150°C 80%~100% 额定电压 154/0 <sup>(1)</sup> 900/0*	Ta=25°C 偏置部件获得 Δ T <sub>i</sub> ≥100°C (未达 最大绝对等级) 154/0 <sup>(1)</sup> 900/0*	完成	-55°C/+125°C 1000 循环 154/0	85°C 、 85%RH 下 2000h 154/0	121°C 100%RH 96 小时 154/0	2
可靠	1000h 150°C 80%~100% 额定电压 77/0 <sup>(1)</sup> 231/0*	1000h 150°C 80%~100% 额定电压 77/0 <sup>(1)</sup> 231/0*	Ta=25°C 偏置部件获得 Δ T <sub>i</sub> ≥100°C (未达 最大绝对等级) 77/0 <sup>(1)</sup> 231/0*	完成	-55°C/+125°C 500 循环 154/0	130°C 、 85%RH 下 1000h 154/0	121°C 100%RH 96 小时 77/0	1
不可靠	设计低于可靠水平			未完成	设计低于可靠水平			0

表中每一格包括测试条件和预期结果。结果用 XXX/Y 形式表示，XXX 指被测件数量，Y 指损坏件数量（实际 Y=0）。

(1): 对一特定封装适用于前端项目或流程。

(2): 测试条件见 AEC-Q101。

\*: 对一特定封装适用于全部前端流程。

如果各测试项水平不一，以最低项为准。

#### 4) ε 确定方法

表 4-8 元器件供应商成熟因子

采用这一制造商的相关风险描述	ε
验证的制造商：所考虑产品工艺成熟	4
验证的制造商—所考虑产品工艺流程未经分析或不成熟	3
未经验证（如未经评审或评审已过 6 年）的制造商或小型连续生产	2
曾被取消资质或产品运行反馈存在问题	1

如果不能按照 1) ~ 4) 的详细要求通过(4-6)评估计算  $\Pi_{PM}$ ，可以采用如下公式进行评估计算：

$$\Pi_{PM} = 2 - 1.5 \times \delta_{ECERCC} \quad (4-8)$$

其中，企业可靠性综合能力评估系数  $\delta_{ECERCC}$  的计算方法详见附录 B。

如果附录 B 数据也不能获取，即不能通过(4-8)计算，也可以直接采用  $\Pi_{PM}$  默认值 1.7。

#### 4.2.3 系统厂商过程因子

系统厂商过程因子  $\Pi_{Process}$  的计算公式如下：

$$\Pi_{Process} = 8 - 7 \times \delta_{EMERCC} \quad (4-9)$$

其中，企业可靠性综合能力评估系数  $\delta_{EMERCC}$  的计算方法详见附录 B。

如果附录 B 数据也不能获取，即不能通过(4-10)计算，也可以直接采取  $\Pi_{Process}$  默认值 4。

## 4.2.4 无铅焊接工艺因子

无铅焊接工艺因子  $\Pi_{LF}$  的计算公式如下：

$$\Pi_{LF} = 1 + (1 + 12 \times LF\_grade + C_Q \times Y)^{\frac{-1}{3.1 - 2 \times LF\_grade}} \quad (4-10)$$

其中，

Y——采用无铅工艺进行实际生产的年数，取整（因此第一年 Y = 0），单位：年。

LF\_grade——无铅工艺流程因子。

C<sub>Q</sub>——无铅工艺生产体量因子。

确定 LF\_grade 因子用如下公式(4-11)和表 4-9。

$$LF\_grade = \frac{\sum \text{满足的准则的权重}}{\sum \text{适用准则的权重}} \quad (4-11)$$

表 4-9 LF\_grade 因子评判准则及权重

No.	类别	评判准则	权重 (如果满足准则)
1	开发	元器件数据库中识别 LF 状态	8
2	开发	元器件数据库中识别元器件与铅锡工艺流程或无铅工艺流程的兼容性	8
3	开发	特定的设计文档定义了元器件端面与无铅或铅锡流程的兼容性	4
4	开发	设计过程中明确识别并考虑无铅状态	8
5	采购、后勤、贮存	追溯性：整个后勤供应链用适合的标识标明无铅或 ROHS 元器件	10
6	采购、后勤、贮存	生产数据库中明确识别含铅或无铅元器件	3
7	采购、后勤、贮存	订单明确识别含铅和无铅元器件的需求，并要求交货时有特殊标记	5
8	采购、后勤、贮存	验收时明确识别含铅或无铅元件	5
9	采购、后勤、贮存	无铅和含铅工序用元器件分开存放	5
10	采购、后勤、贮存	元器件贮存条件的定义中考虑了与无铅流程的兼容性（可焊性）	4
11	装配流程	产品线中无铅装配状态识别清晰	3
12	装配流程	无铅串接工序拥有正规资质（鉴定经串接和冶金分析的元器件和 PCB 的完整性）	20
13	装配流程	无铅修复工序拥有正规资质（鉴定经修复和冶金分析的元器件和 PCB 的完整性）	20
14	装配流程	一条生产线专用于含铅或无铅串接工序	8
15	装配流程	一条生产线专用于含铅或无铅修复工序	8
16	装配流程	板上明确标注无铅或含铅工艺	8
17	装配流程	操作者接受过无铅方面（新的流程、兼容性、焊点外观、绕线、检查、修理等）的适当培训	16
18	可靠性	设备生产商进行过有关无铅装配可靠性或寿命建模的内部或委托研究	8
19	可靠性	设备生产商就无铅板或设备的质量进行过内部或外部研究	8
20	可靠性	设备生产商进行过有关无铅板或设备老练的内部	6

No.	类别	评判准则	权重 (如果满足准则)
		或外部测试	
21	可靠性	必须按 JESD201A 或等效标准预防锡晶须	5

注：

- 通常情况下适用的准则之和为 166。
- 准则 2 包含了准则 3，每一次两者只有一个需要计分（所以准则 3 的权重未包括在适用的总分里）。
- 当一个元器件变为无铅，改变参照系是一个充分的鉴定（准则 7 和 8）。
- 若无铅工艺流程不与铅锡工艺共存，换言之没有铅锡生产线且所有采购的元器件均为无铅的，准则 1、2、3、4、5、6、7、8、9、14、15、16 可认为满足。
- 不可修复产品不适用准则 13 和 15，此时适用的准则的总和为 138。

确定  $C_Q$  因子采用如下表 4-10。

表 4-10  $C_Q$  因子取值

每周使用无铅工艺连接的元器件总数	串接类型	$C_Q$
周总量 < 100000	小型串接	4
100000 ≤ 周总量 < 500000	中等串接	12
500000 ≤ 周总量 < 2000000	大型串接	36
周总量 > 2000000	甚大型串接	108

如果不能按照(4-10)评估计算无铅焊接工艺因子  $\Pi_{LF}$ ，可以采用如下公式进行评估计算：

$$\Pi_{LF} = \begin{cases} 1 & , \text{当 } 0.9 < \delta_{ECERCC} \leq 1 \\ 2 - \delta_{EMERCC} & , \text{当 } \delta_{ECERCC} \leq 0.9 \end{cases} \quad (4-12)$$

其中，企业可靠性综合能力评估系数  $\delta_{ECERCC}$  的计算方法详见附录 B。

## 5 IGBT 模块和 IPM

### 5.1 IGBT 模块和 IPM 失效率模型

IGBT 模块和 IPM 的失效率模型如下：

$$\lambda_{IGBT\_M\&IPM} = \sum_{\mu\text{components}} (\lambda_{\mu\text{component}} \times \Pi_{PM\_mu\text{component}}) \times \Pi_{process\_M\&IPM} \times \Pi_{process} \times \Pi_{LF} + (\lambda_{wiring} + \lambda_{Case+Substrate} + \lambda_{External\_connections}) \times \Pi_{process\_M\&IPM} \times \Pi_{process} \times \Pi_{LF} \quad (5-1)$$

其中，

$\lambda_{IGBT\_M\&IPM}$ ——IGBT 模块和 IPM 失效率，单位 FIT；

$\mu\text{components}$ ——IGBT 模块和 IPM 内部集成的各种元器件，主要包括集成电路（多为裸芯片）、分立器件（多为裸芯片）、电阻、电容、电感；

$\lambda_{\mu\text{component}}$ ——IGBT 模块和 IPM 内部集成的各种元器件（主要包括集成电路、分立器件、电阻、电容、电感）的失效率，单位 FIT，其计算公式见(5-2)；

$\lambda_{wiring}$ ——IGBT 模块和 IPM 内部连线的失效率，单位 FIT，其计算公式见(5-2)；

$\lambda_{Case+Substrate}$ ——IGBT 模块和 IPM 封装和基板的失效率，单位 FIT，其计算公式见(5-2)；

$\lambda_{External\_connections}$ ——IGBT 模块和 IPM 外部连接的失效率，单位 FIT，其计算公式见(5-2)；

$\Pi_{PM\_component}$ ——IGBT 模块和 IPM 内部集成的各种元器件的制造因子，主要指被集成的内部集成电路、分立器件、电阻、电容、电感等各自所对应的制造过程中的质量和技术控制因子；

$\Pi_{process\_H\&M}$ ——IGBT 模块和 IPM 过程因子，即研制 IGBT 模块和 IPM 的厂商在其设计和制造过程中的质量和技术控制因子；

$\Pi_{Process}$ ——IGBT 模块和 IPM 集成在其中的设备或系统产品在开发、制造以及使用过程中的质量和技术控制因子，简称“系统厂商过程因子”；

$\Pi_{LF}$ ——无铅焊接工艺因子，下角标 LF 代表 Lead Free。如果器件或模块焊接工艺是有铅的， $\Pi_{LF} = 1$ 。

IGBT 模块和 IPM 中四类基本组成部件（包含内部集成的元器件、内部连线、封装-基板、外部连接等）的失效率（ $\lambda_{\mu component}$ 、 $\lambda_{wiring}$ 、 $\lambda_{Case+Substrate}$ 、 $\lambda_{External\_connections}$ ）按下式计算：

$$\lambda_{element} = \sum_i^{Phase} \left[ \left( \frac{t_{annual}}{8760} \right)_i \times (\sum_{stresses} (\lambda_{0\ stress} \times \Pi_{stress}))_i \times (\Pi_{induced})_i \right] \quad (5-2)$$

其中，

$\lambda_{element}$ ——IGBT 模块和 IPM 中四类基本组成部件（包含内部集成的元器件、内部连线、封装-基板、外部连接等）的失效率，单位 FIT；

Phases——寿命剖面中的各个阶段，关于寿命剖面的建立详见附录 A；

$i$ ——寿命剖面中的第  $i$  个阶段， $i=1, 2, 3, \dots$ ；

$t_{annual}$ ——指寿命剖面中第  $i$  个阶段在一个日历年中所占的总小时数；

$\lambda_{0\ stress}$ ——IGBT 模块和 IPM 中四类基本组成部件（包含内部集成的元器件、内部连线、封装-基板、外部连接等）在某种应力下的基础失效率，单位 FIT；

$\Pi_{stress}$ ——IGBT 模块和 IPM 在寿命剖面中某个阶段的某种应力的加速因子，主要的应力种类有七种：热（Thermal,  $\Pi_{Thermal}$ ）、电（Electrical,  $\Pi_{El}$ ）、热电（Thermo-Electrical,  $\Pi_{Thermo\_electrical}$  或  $\Pi_{TH\_EL}$ ）、温度循环（Temperature cycling,  $\Pi_{TCy}$ ）、机械（Mechanical,  $\Pi_{Mechanical}$  或  $\Pi_{ME}$ ）、相对湿度（Relative Humidity,  $\Pi_{RH}$ ）、化学（Chemical,  $\Pi_{Chemical}$ ），详细计算方法见表 5-1；

$\Pi_{induced}$ ——诱导因子，也称过应力因子，所考虑的过应力的种类主要有三种：机械过应力（Mechanical Overstress (accidental overload), MOS）、电过应力（Electrical Overstress, EOS）以及热过应力（Thermal Overstress, TOS），具体计算公式见(5-3)。

表 5-1 IGBT 模块和 IPM 的各种物理应力加速因子计算方法

$\Pi_{Thermal}$ 有源器件	工作阶段: $\Pi_{El} \times e^{11604 \times 0.7 \times \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{j-component} + 273)} \right]}$ 对 1A 以下信号二极管（PIN、肖特基管、信号管、变容管）： 若 $\frac{V_{applied}}{V_{rated}} > 0.3$ , $\Pi_{El} = \left( \frac{V_{applied}}{V_{rated}} \right)^{2.4}$ 若 $\frac{V_{applied}}{V_{rated}} \leq 0.3$ , $\Pi_{El} = 0.056$ 对其它器件: $\Pi_{El} = 1$
-------------------------	--

	非工作阶段: $\Pi_{\text{Thermal}} = 0$
$\Pi_{\text{Thermo\_electrical}}$ Ea = 0.1eV 除固体钽以外的电容	工作阶段: $e^{11604 \times 0.1 \times \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{M\&IPM} + 273)} \right]}$ 非工作阶段: $\Pi_{\text{Thermo\_electrical}} = 0$
$\Pi_{\text{Thermo\_electrical}}$ Ea = 0.15eV 固体钽电容、电感	工作阶段: $e^{11604 \times 0.15 \times \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{M\&IPM} + 273)} \right]}$ 非工作阶段: $\Pi_{\text{Thermo\_electrical}} = 0$
$\Pi_{\text{TCy\_solder\_joints}}$	$\left( \frac{12 \times N_{\text{annual-cy}}}{t_{\text{annual}}} \right) \times \left( \frac{\min(\theta_{cy}, 2)}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{\Delta T_{\text{cycling}}}{20} \right)^{1.9} \times e^{1414 \times \left[ \frac{1}{313} - \frac{1}{(T_{\text{max-cycling}} + 273)} \right]}$
$\Pi_{\text{TCy\_Case}}$	$\left( \frac{12 \times N_{\text{annual-cy}}}{t_{\text{annual}}} \right) \times \left( \frac{\Delta T_{\text{cycling}}}{20} \right)^4 \times e^{1414 \times \left[ \frac{1}{313} - \frac{1}{(T_{\text{max-cycling}} + 273)} \right]}$
$\Pi_{\text{Mechanical}}$	$\left( \frac{G_{\text{RMS}}}{0.5} \right)^{1.5}$
$\Pi_{\text{RH}}$	$\left( \frac{RH_{\text{ambient}}}{70} \right)^{4.4} \times e^{11604 \times 0.9 \times \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{\text{ambient}} + 273)} \right]}$ 工作阶段: $\Pi_{\text{RH}} = 0$
$\Pi_{\text{Chemical}}$	$\Pi_{\text{Sal}} \times \Pi_{\text{Envir}} \times \Pi_{\text{Zone}} \times \Pi_{\text{Prot}}$

注: 本表中主要参数和变量含义及单位如下

$\Pi_{\text{Thermal}}$ ——热应力加速因子, 针对有源器件而言;

$\Pi_{\text{Thermo\_electrical}}$ ——热电应力加速因子;

$\Pi_{\text{TCy\_solder\_joints}}$ ——温度循环下的焊点的加速因子;

$\Pi_{\text{TCy\_Case}}$ ——温度循环下的封装的加速因子;

$\Pi_{\text{Mechanical}}$ ——机械应力下的加速因子;

$\Pi_{\text{RH}}$ ——相对湿度下的加速因子;

$\Pi_{\text{Et}}$ ——电应力下的加速因子;

$\Pi_{\text{Chemical}}$ ——化学应力加速因子, 计算方法详见表 5-2;

$t_{\text{annual}}$ ——寿命剖面中某个阶段在一个日历年中所占的总小时数;

$RH_{\text{ambient}}$ ——某阶段周边环境的相对湿度, 单位%;

$\Delta T_{\text{cycling}}$ ——某一温度循环阶段中温度变化幅度, 单位°C;

$T_{\text{max\_cycling}}$ ——某一温度循环阶段中的最高温度, 单位°C;

$N_{\text{annual\_cy}}$ ——一年内每个循环阶段的循环次数;

$\theta_{cy}$ ——循环时长, 单位 h;

$G_{\text{RMS}}$ ——每个随机振动阶段的振动幅度, 单位  $\text{m/s}^2$ 。

$T_{M\&IPM}$ ——某阶段中 IGBT 模块或 IPM 的平均温度, 单位°C;

$T_{J\_component}$ ——工作阶段器件结温, 单位°C,  $T_{J\_component} = T_{M\&IPM} + R_{JC} \cdot P_{\text{dissipated from the component}}$ ,

$T_{M\&IPM} = T_{\text{ambient}} + R_{CR} \cdot P_{\text{dissipated from the H\&M}}$  (式中  $T_{\text{ambient}}$  为周边环境温度,  $R_{JC}$  是混合电路或 MCM 模块结点与基板之间的热阻,  $R_{CR}$  是混合电路或 MCM 模块与环境间的热阻);

$R_{JA}$ ——器件结到环境的热阻, 单位°C/W;

$P_{\text{dissipated}}$ ——此阶段中器件耗散功率，单位 W；

$V_{\text{applied}}$ ——此阶段中施加的反向电压，仅针对信号二极管，单位 V。

$V_{\text{rated}}$ ——额定反向电压，仅针对信号二极管，单位 V。

表 5-2 污染类型等级与权重

<b>盐雾污染等级</b>	$\Pi_{\text{Sal}}$	<b>产品防护等级</b>	$\Pi_{\text{Prot}}$
低	1	密封	0
高	2	非密封	1
<b>应用污染等级</b>	$\Pi_{\text{Zone}}$	<b>环境污染等级</b>	$\Pi_{\text{Envir}}$
低	1	低	1
中	2	中	1.5
高	4	高	2

## 5.2 模型参数确定方法

### 5.2.1 诱导因子

诱导因子  $\Pi_{\text{induced}}$  的计算公式如下：

$$\Pi_{\text{induced}-i} = (1.8 \times \Pi_{\text{application}-i} \times \Pi_{\text{Ruggedising}})^{0.511 \times \ln(5.5)} \quad (5-3)$$

其中，

$i$ ——寿命剖面中的第  $i$  个阶段， $i=1, 2, 3, \dots$ ；

$\Pi_{\text{application}-i}$ ——寿命剖面中第  $i$  个阶段的应用因子，指 IGBT 模块和 IPM 集成在其中的设备或系统产品的寿命剖面中的某个阶段的使用环境对可靠性的影响，计算公式见(4-4)。例如，集成在移动系统中的电子产品比集成在固定系统中电子产品更容易产生过机械应力。这些因子在寿命剖面的各个阶段内各不相同。

$\Pi_{\text{ruggedising}}$ ——健壮因子，指分立器件在开发阶段考虑的过应力防护措施对于可靠性的影响，计算公式见(5-4)。

#### 1) $\Pi_{\text{application}}$ 确定方法

IGBT 模块和 IPM 的应用因子  $\Pi_{\text{application}}$  计算方法与第 4.2.1 节中 IGBT 分立器件的  $\Pi_{\text{application}}$  相同。

#### 2) $\Pi_{\text{ruggedising}}$ 确定方法

IGBT 模块和 IPM 的健壮因子  $\Pi_{\text{ruggedising}}$  计算公式为：

$$\Pi_{\text{ruggedising}} = 2 - \delta_{\text{ECERCC}} \quad (5-4)$$

其中， $\delta_{\text{ECERCC}}$ ——企业可靠性综合能力评估系数，计算方法详见附录 B。

如果不开展企业可靠性综合能力评估系数  $\delta_{\text{ECERCC}}$  的详细计算， $\Pi_{\text{ruggedising}}$  也可直接采取默认值 1.7。

### 5.2.2 内部集成元器件的失效率

#### 1) 裸芯片（集成电路、晶体管、二极管）的失效率

裸芯片的失效率计算公式如下：

$$\lambda_{\text{chip}} = (\lambda_{0\text{TH}} \times \Pi_{\text{Thermal}}) + (C_{\text{moulding}} \times C_{\text{chip\_area}} \times \lambda_{0\text{chip\_TCy}} \times \Pi_{\text{TCy\_case}}) \quad (5-5)$$

其中，

$\lambda_{\text{chip}}$ ——裸芯片（集成电路、晶体管、二极管）的综合失效率，单位 FIT；

$\lambda_{0\text{TH}}$ ——裸芯片（集成电路、晶体管、二极管）的基础失效率，单位 FIT，具体分类数据详见附录 C；

$\Pi_{\text{Thermal}}$ —— $\lambda_{0\text{TH}}$  的加速因子，取值方法见表 5-1；

$C_{\text{moulding}}$ ——外封装工艺形式，取值方法见表 5-3；

$C_{\text{chip\_area}}$ ——裸芯片面积因子，计算方法见式(5-6)；

$\lambda_{0\text{chip\_TCy}}$ ——温度循环应力下的裸芯片（集成电路、晶体管、二极管）基础失效率，单位 FIT， $\lambda_{0\text{chip\_TCy}} = 0.011 \text{ FIT}$ ；

$\Pi_{\text{TCy\_case}}$ ——温度循环应力下的裸芯片（集成电路、晶体管、二极管）封装的加速因子，计算方法见表 5-1。

表 5-3 芯片封装类型及评分

封装类型	$C_{\text{moulding}}$
密封非灌封电路	1
硅型嵌入灌封电路	1.4
聚亚安酯型嵌入灌封电路	1.6
环氧型嵌入灌封电路	2

$$C_{\text{chip\_area}} = (1+S^d) \quad (5-6)$$

其中，S 指每个独立芯片的表面积，单位  $\text{mm}^2$ ，参数 d 的取值见下表所示。

表 5-4 芯片面积公式中的参数 d 取值

芯片类型	d
数字硅集成电路（MOS、双极和 BiCMOS）	0.35
模拟硅集成电路（MOS、双极和 BiCMOS）	0.2
分立电路	0.1

若芯片表面积未知，使用下表中默认值。

表 5-5 芯片面积未知时的默认参数

	Chip area( $\text{mm}^2$ )
逻辑的	75
模拟的	4
分立小信号	0.8
分立电源	3

## 2) 无源器件（电阻、电容、电感）失效率

片式电阻的失效率计算公式如下：

$$\lambda_{\text{resistor}} = \lambda_{0\text{resistor}} \times C_{\text{moulding}} \times \Pi_{\text{TCy}} \quad (5-7)$$

其中，

$\lambda_{\text{resistor}}$ ——片式电阻综合失效率，单位 FIT；

$\lambda_{0\text{resistor}}$ ——片式电阻基础失效率，单位 FIT， $\lambda_{0\text{resistor}} = 0.01$ ；

$C_{\text{moulding}}$ ——外封装工艺形式，取值方法见表 5-7；

$\Pi_{\text{TCy}}$ ——片式电阻在温度循环应力下的加速因子，计算方法见表 5-6 和表 5-1。

表 5-6 无源器件连接类型及对应模式

连接类型	Π <sub>TCy</sub> 模式
胶粘（导电胶）	Π <sub>TCy_case</sub>
焊接（铜焊）	Π <sub>TCy_solder_joints</sub>

表 5-7 无源器件外封装类型及评分

外封装类型	C <sub>moulding</sub>
密封非灌封电路	1
硅型嵌入灌封电路	1.4
聚亚安酯型嵌入灌封电路	1.6
环氧型嵌入灌封电路	2

电容的失效率计算公式如下：

$$\lambda_{capacitor} = \lambda_{0\_capacitor} \times (C_{moulding} \times \gamma_{TCy} \times \Pi_{TCy} + \gamma_{TH\_EL} \times \Pi_{voltage} \times \Pi_{TH\_EL}) \quad (5-8)$$

其中，

$\lambda_{capacitor}$ ——电容综合失效率，单位 FIT；

$\lambda_{0\_capacitor}$ ——电容基础失效率，单位 FIT，取值见表 5-8；

$C_{moulding}$ ——外封装工艺形式，取值方法见表 5-7；

$\Pi_{TCy}$ ——电容在温度循环应力下的加速因子，计算方法见表 5-6 和表 5-1；

$\gamma_{TCy}$ ——电容在温度循环应力下的修正因子，取值见表 5-8；

$\gamma_{TH\_EL}$ ——电容在电热应力下的修正因子，取值见表 5-8；

$\Pi_{voltage}$ ——电容的电压加速因子，计算方法见(5-9)；

$\Pi_{TH\_EL}$ ——电容的电热应力下的加速因子，计算方法见表 5-1。

表 5-8 不同类型陶瓷电容失效率相关参数及取值

器件描述	$\lambda_{0\_capacitor}$	激活能 (eV)	S <sub>reference</sub>	$\gamma_{TH\_EL}$	$\gamma_{TCy}$
定义了温度系数的低 CV 陶瓷电容 (I类)	0.03	0.1	0.3	0.70	0.28
定义了温度系数的中 CV 陶瓷电容 (I类)	0.05	0.1	0.3	0.70	0.28
定义了温度系数的高 CV 陶瓷电容 (I类)	0.40	0.1	0.3	0.69	0.26
未定义温度系数的低 CV 陶瓷电容 (II类)	0.08	0.1	0.3	0.70	0.28
未定义温度系数的中 CV 陶瓷电容 (II类)	0.15	0.1	0.3	0.70	0.28
未定义温度系数的高 CV 陶瓷电容 (II类)	1.20	0.1	0.3	0.44	0.51
未定义温度系数的低 CV 聚合物终端陶瓷电容 (II类)	0.08	0.1	0.3	0.70	0.28
未定义温度系数的中或高 CV 聚合物终端陶瓷电容 (II类)	0.15	0.1	0.3	0.70	0.28
固体钽电容 (SMD 封装)	0.54	0.15	0.4	0.85	0.15
沉积电容	0.1	0.1	0.3	0.71	0.29

电容的电压加速因子  $\Pi_{voltage}$  计算公式如下：

$$\Pi_{voltage} = \left( \frac{1}{S_{reference}} \times \frac{V_{applied}}{V_{rated}} \right)_i^3 \quad (5-9)$$

其中，

$i$ ——寿命剖面中的第  $i$  个阶段， $\Pi_{voltage}$  因子要逐阶段计算；

$S_{reference}$ ——参考系数；

$V_{applied}$ ——使用时施加于电容的电压，单位 V；

$V_{rated}$ ——电容的额定电压，单位 V。

多层电感的失效率计算公式如下：

$$\lambda_{inductor} = \lambda_{0\_inductor} \times (C_{moulding} \times \gamma_{TCy} \times \Pi_{TCy} + \gamma_{TH\_EL} \times \Pi_{TH\_EL}) \quad (5-10)$$

其中：

$\lambda_{inductor}$ ——电感综合失效率，单位 FIT；

$\lambda_{0\_inductor}$ ——电感基础失效率，单位 FIT，取值见表 5-9；

$C_{moulding}$ ——外封装工艺形式，取值方法见表 5-7；

$\Pi_{TCy}$ ——电感在温度循环应力下的加速因子，计算方法见表 5-6 和表 5-1；

$\gamma_{TCy}$ ——电感在温度循环应力下的修正因子，取值见表 5-9；

$\gamma_{TH\_EL}$ ——电感在电热应力下的修正因子，取值见表 5-9；

$\Pi_{TH\_EL}$ ——电感的电热应力下的加速因子，计算方法见表 5-1。

表 5-9 电感失效率相关参数及取值

	Ea (eV)	$\lambda_{0\_inductor}$	$\gamma_{TH\_EL}$	$\gamma_{TCy}$
电感	0.15	0.05	0.71	0.29

### 5.2.3 内部连线、封装和衬底、外部连接的失效率

#### 1) 内部连线的失效率：通过线（键合）、凸点（倒装芯片）、带连接的内部连线

$$\lambda_{wiring} = \lambda_{0\_wiring} \times (C_{moulding} \times \gamma_{TCy} \times \Pi_{TCy} + C_{particle} \times \gamma_{ME} \times \Pi_{ME}) + \lambda_{0\_RH} \times C_{hermeticity} \times \Pi_{RH} \quad (5-11)$$

其中，

$\lambda_{wiring}$ ——内部连线综合失效率，单位 FIT；

$\lambda_{0\_wiring}$ ——内部连线基础失效率，单位 FIT，计算公式见(5-12)；

$C_{moulding}$ ——外封装工艺形式，取值方法见表 5-11；

$\Pi_{TCy}$ ——内部连线在温度循环应力下的加速因子，计算方法见

表 5-10 和表 5-1；

$\gamma_{TCy}$ ——内部连线在温度循环应力下的修正因子，取值  $\gamma_{TCy}=0.65$ ；

$C_{particle}$ ——粒子系数，取值方法见表 5-12；

$\Pi_{ME}$ ——内部连线在机械应力下的加速因子，计算方法见表 5-1；

$\gamma_{ME}$ ——内部连线在机械应力下的修正因子，取值  $\gamma_{ME}=0.35$ ；

$\lambda_{0\_RH}$ ——内部连线在相对湿度下的基础失效率，单位 FIT，计算公式见(5-14)；

$C_{hermeticity}$ ——密封性系数，取值方法见表 5-13；

$\Pi_{RH}$ ——内部连线在相对湿度应力下的加速因子，计算方法见表 5-1。

$$\lambda_{0\_wiring} = 1.04 \times 10^{-4} \times Nb_{wires}^{0.93} \quad (5-12)$$

其中， $Nb_{wires}$ ——IGBT 模块或 IPM 内部的线、块或带的总数。若  $Nb_{wires}$  值未知，默认通过 IGBT 模块或 IPM 输入/输出的 I/O 数量  $Nb_{I/O}$  估算，估算的公式为：

$$Nb_{wires} = 2.9 \times Nb_{I/O} \quad (5-13)$$

表 5-10 内部连线连接类型及对应模式

连线类型	$\Pi_{TCy}$ 模式
线或条带（铝和金）	$\Pi_{TCy\_case}$
块	$\Pi_{TCy\_solder\_joints}$

表 5-11 外封装类型及评分

封装类型	$C_{moulding}$
密封非灌封电路	1
硅型嵌入灌封电路	1.4
聚亚安酯型嵌入灌封电路	1.6
环氧型嵌入灌封电路	2

表 5-12  $C_{particle}$  取值

工艺类型	$C_{particle}$
灌封电路或倒装法芯片互连，有底部填充	0
采用分子粘附键合和金线*的非灌封密封电路	0.5
采用分子粘附键合和铝线的非灌封密封电路，或倒装法芯片互连，无底部填充	0.3
不采用分子粘附键合和金线*的非灌封密封电路	1.5
不采用分子粘附键合和铝线的非灌封密封电路	1

(\*): 线或带

$$\lambda_{0\_RH} = 7.01 \times 10^{-7} \times Nb_{wires}^{2.41} \quad (5-14)$$

其中， $Nb_{wires}$ ——IGBT 模块或 IPM 内部的线、块或带的总数，计算方法同式(5-13)。

表 5-13  $C_{hermeticity}$  取值

封装形式	$C_{hermeticity}$
密封电路（内部嵌入或非嵌入）	0.05
封闭空腔电路（非密封）	0.5
灌封电路	1

## 2) 封装和衬底的失效率

$$\lambda_{BS} = \lambda_{0\_BS} \times (\gamma_{TCy} \times \Pi_{TCy\_case} + C_{ME} \times \gamma_{ME} \times \Pi_{ME} + \gamma_{RH} \times \Pi_{RH} + \gamma_{chemical} \times \Pi_{chemical}) \quad (5-15)$$

其中，

$\lambda_{BS}$ ——封装和衬底综合失效率，单位 FIT；

$\lambda_{0\_BS}$ ——封装和衬底基础失效率，单位 FIT，计算公式见(5-16)；

$\gamma_{TCy}$ ——封装和衬底在温度循环应力下的修正因子，取值见表 5-16；

$\Pi_{TCy\_case}$ ——封装在温度循环应力下的加速因子，计算方法见表 5-1；

$C_{ME}$ ——机械应力系数，取值方法见表 5-16；

$\gamma_{ME}$ ——封装和衬底在机械应力下的修正因子，取值见表 5-16；

$\Pi_{ME}$ ——封装和衬底在机械应力下的加速因子，计算方法见表 5-1；

$\gamma_{RH}$ ——封装和衬底在相对湿度应力下的修正因子，取值见表 5-16；

$\Pi_{RH}$ ——封装和衬底在相对湿度应力下的加速因子，计算方法见表 5-1；

$\gamma_{chemical}$ ——封装和衬底在化学应力下的修正因子，取值见表 5-16；

$\Pi_{chemical}$ ——封装和衬底在化学应力下的加速因子，计算方法见表 5-1。

$$\lambda_{0\_BS} = \lambda_{0\_substrate} \times (N_{layers})^{\frac{1}{2}} \times \left( \frac{N_{tracks}^b}{2} \right) \times \Pi_{Class} \times \Pi_{Techno-substrate} \quad (5-16)$$

其中，

$\lambda_{0\_substrate}$ ——衬底基础失效率，单位 FIT，取值见表 5-16；

$N_{tracks}$ ——衬底通道数，默认值  $N_{tracks} = (N_{bwires} / 2)$ ， $N_{bwires}$  取值见(5-13)；

$N_{layers}$ ——衬底层数；

$\Pi_{Class}$ ——类的加速因子，取值见表 5-14；

$\Pi_{Techno\_substrate}$ ——衬底技术的加速因子，取值见表 5-15。

表 5-14  $\Pi_{Class}$  取值

导线最小宽度 ( $\mu\text{m}$ ) / 导线或焊盘间最小间距 ( $\mu\text{m}$ )	$\Pi_{Class}$ 值
800/800	1
500/500	1
310/310	2
210/210	3
150/150	4
125/125	5
100/100	6

表 5-15  $\Pi_{Techno\_substrate}$  取值

衬底类型	工艺	$\Pi_{Techno\_substrate}$ 值
陶瓷		0.25
玻璃-环氧	通孔	0.25
	盲孔	0.5
	微贯孔工艺	1
	贯孔衬垫工艺	2.5

表 5-16 封装和衬底失效率相关参数及取值

种类	$\lambda_{0\_substrate}$	<b>b</b>	$\gamma_{TCy}$	$\gamma_{ME}$	$\gamma_{RH}$	$\gamma_{chemical}$	$C_{ME}$
密封陶瓷封装（共烧 MCM 封装、.....）	$2.08 \times 10^{-4}$	0.93	0.32	0.66	0.01	0.01	$1 + 0.1\sqrt{S_{case}}$
密封金属封装内氧化铝基板	$2.08 \times 10^{-4}$	0.93	0.32	0.66	0.01	0.01	$1 + 0.1\sqrt{S_{case}}$
氧化铝基板，灌封	$2.08 \times 10^{-4}$	0.93	0.6	0.35	0.04	0.01	$1 + 0.1\sqrt{S_{case}}$
氧化铝基板，无外壳或灌封	$2.08 \times 10^{-4}$	0.93	0.3	0.58	0.1	0.02	$1 + 0.1\sqrt{S_{case}}$
有机物基板（玻璃-环氧），密封金属封装	$5 \times 10^{-4}$	1	0.48	0.5	0.01	0.01	$1 + 0.1\sqrt{S_{case}}$
有机物基板（玻璃-环氧），灌封	$5 \times 10^{-4}$	1	0.72	0.18	0.09	0.01	1
玻璃-环氧基板，无外壳或灌封	$5 \times 10^{-4}$	1	0.6	0.2	0.18	0.02	1

注：表中  $S_{case}$  为封装表面积，单位  $\text{cm}^2$ 。

如果封装包含不同配置的部分（如一侧密封另一侧无保护的模块），必须考虑各部分（每一侧或每个空腔）失效率的加权平均值， $S_{case}$  参数对应所考虑部分的表面积。模型变为：

$$\lambda_{BS} = \sum_{Cavities} \frac{\lambda_{0\_BS} \times S_{cavity}}{S_{total}} \times (\gamma_{TCy} \times \Pi_{TCy\_case} + C_{ME} \times \gamma_{ME} \times \Pi_{ME} + \gamma_{RH} \times \Pi_{RH} + \gamma_{chemical} \times \Pi_{chemical}) \quad (5-17)$$

$$C_{ME} = 1 + 0.1\sqrt{S_{cavity}} \quad (5-18)$$

其中，

$S_{cavity}$ ——每个空腔（部分、侧面）的表面积，单位  $\text{cm}^2$ ；

$S_{total}$ ——各个空腔表面积之和，单位  $\text{cm}^2$ 。

3) 外部连接的失效率

$$\lambda_{connections} = \lambda_{0TCy} \times \Pi_{TCy\_solder\_joints} + \lambda_{0ME} \times \Pi_{ME} \quad (5-19)$$

其中,

- $\lambda_{connections}$ ——外部连接的综合失效率, 单位 FIT;
- $\lambda_{0TCy}$ ——外部连接在温度循环应力下的基础失效率, 单位 FIT, 计算公式见(5-20);
- $\Pi_{TCy\_solder\_joints}$ ——外部连接焊点在温度循环应力下的加速因子, 计算方法见表 5-1;
- $\lambda_{0ME}$ ——外部连接在机械应力下的基础失效率, 单位 FIT, 计算公式见(5-21);
- $\Pi_{ME}$ ——外部连接在机械应力下的加速因子, 计算方法见表 5-1。

$$\lambda_{0\_TCy} = 20.5 \times 10^3 \times (K \times (D \times \Delta CTE)^2)^{1.1} \quad (5-20)$$

其中,

- K——连接刚度参数, 计算方法见表 5-17;
- D——模块最远连接距离, 通常接近封装的对角线, 单位 mm, 位置示例见图 5-1;
- $\Delta CTE$ ——封装和 PCB 的热膨胀系数之差, 取值见表 5-18。

表 5-17 系数 K 取值

装配类型	K
带焊脚的 SMD 元件 铜或铜合金引脚	$\min(5000 \times (S_{pin}/L_{pin} - 0.01), 200)$ 若为负值则取 K=0 (非刚性连接)
带焊脚的 SMD 元件 铁-镍合金引脚 (柯瓦合金 42 等)	$\min(6150 \times (S_{pin}/L_{pin} - 0.01), 200)$ 若为负值则取 K=0 (非刚性连接)
带焊脚的元器件 铜或铜合金引脚	$\min(30 \times (S_{pin}/0.196)^{1.1}, 100)$
带焊脚的元器件 铁-镍合金引脚 (柯瓦合金 42 等)	$\min(37 \times (S_{pin}/0.196)^{1.1}, 100)$
不带焊脚的 SMD 元件	500
无引脚元器件, 接触式安装	5

注:  $S_{pin}$  指引脚截面积, 单位  $mm^2$ ;  $L_{pin}$  为引脚长度, 单位 mm。

表 5-18 封装与 PCB 热膨胀系数之差

封装性质	PCB	
	印制电路 (FR4、聚酰亚胺) 不含 Cu/In/Cu*	印制电路 (FR4、聚酰亚胺) 含 Cu/In/Cu*
金属 (柯瓦)	$\Delta CTE = 9 \times 10^{-6} / ^\circ C$	$\Delta CTE = 7 \times 10^{-6} / ^\circ C$
陶瓷 (氧化铝或共烧结)	$\Delta CTE = 8 \times 10^{-6} / ^\circ C$	$\Delta CTE = 6 \times 10^{-6} / ^\circ C$
模铸 (有机或陶瓷基板)	$\Delta CTE = 2 \times 10^{-6} / ^\circ C$	$\Delta CTE = 4 \times 10^{-6} / ^\circ C$

(\*) Cu/In/Cu (铜/因瓦 Invar/铜) 层沉积于印制电路外层上, 用来减小表面的热膨胀系数。

$$\lambda_{0ME} = \frac{1}{a} \times \left( 7 \times 10^{-4} \times \frac{M^{1.6}}{S_{pin} \times N_{bpin}^{0.5}} + 1 \times 10^{-6} \times \frac{D^2}{S_{pin}} \right) \quad (5-21)$$

其中:

- a——修正系数, 取值见表 5-19;
- $S_{pin}$ ——引脚截面积,  $mm^2$ ;
- $N_{bpin}$ ——IGBT 模块或 IPM 的引脚数, 针对 IGBT 模块而言  $N_{bpin}$  是指除去螺接端子外的引脚, 如果 IGBT 模块为全螺接 (即  $N_{bpin}=0$ ) 时  $\lambda_{0ME} = 1$ ;
- D——模块最远连接距离, 通常接近封装的对角线, 单位 mm, 位置示例见图 5-1;
- M——封装质量, 单位 g。

表 5-19 修正系数 a 的取值

固定模式	举例	a
无（允许元器件和印制电路之间的相对位移）	简单连接	1
柔性连接（允许元器件在支座上发生有限位移）	粘接	2
刚性连接（不允许或只允许元器件与印制电路之间小的相对位移）	夹持 螺丝固定	4

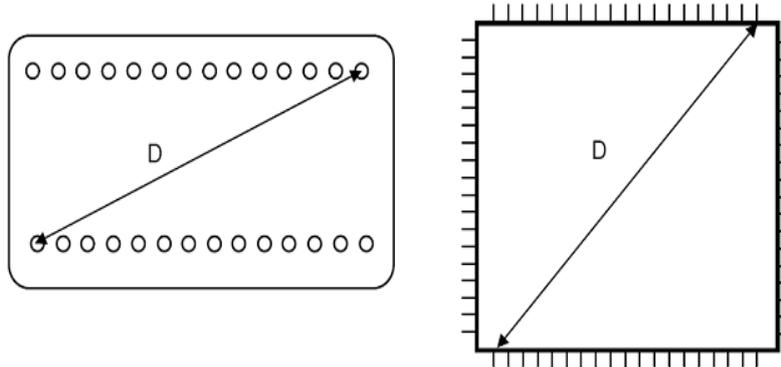


图 5-1 平台式封装（左）与扁平四面封装的最远连接距离 D 示例

5.2.4 IGBT 模块和 IPM 内集成元器件的制造因子

IGBT 模块和 IPM 内部集成的各种元器件的制造因子  $\Pi_{PM\_component}$  的取值为：有源器件取 1.7，其它元器件取 1.6。

5.2.5 IGBT 模块和 IPM 厂商过程因子

IGBT 模块和 IPM 厂商过程因子  $\Pi_{Process\_M\&IPM}$  考虑 IGBT 模块或 IPM 的设计和制造过程对其可靠性的影响，计算公式如下：

$$\Pi_{Process\_H\&M} = e^{1.39 \times (1 - M\&IPM\_process\_grade)} \tag{5-22}$$

其中，M&IPM\_process\_grade 为 IGBT 模块或 IPM 的过程等级，由下面公式计算：

$$M\&IPM\_process\_grade = \frac{\sum \text{values in the following table}}{140} \tag{5-23}$$

表 5-20 M&IPM 过程等级评价项目

评价项目	若真	若假
设计中用形式化方法 <sup>注1</sup> 考虑 IGBT 模块和 IPM 的制造方法	15	0
用形式化方法 <sup>注1</sup> 考虑 IGBT 模块和 IPM 连接到板上的能力	15	0
有混合和多芯片模块开发经验并获得良好的使用反馈	10	0
用于之前开发的内部互连工艺 (ies)	3	0
用于之前开发的封装和基板工艺 (ies)	3	0
用于之前开发的外部互连工艺 (ies)	4	0
工艺线具备航天 (ESA/CNES) 资质——(MIL-PRF 38534F 等级 K 类或 JESD93 I 类) 或等效	30 <sup>注2</sup>	0
工艺线具备军用资质——(MIL-PRF 38534F 等级 H 类或 JESD93 II 类) 或等效	20 <sup>注2</sup>	0
MIL-PRF 38534F 等级 G、E 或 D 类，或 JESD93 II 类以下，或制造商内部资质程序	10 <sup>注2</sup>	0
应用三种方法改进可靠性：1. 老化，2. 逐批 DPA，3. 三温度下功能测试	30	0
应用三种方法之二改进可靠性：1. 老化，2. 逐批 DPA，3. 三温度下功能测试	20	0

评价项目	若真	若假
应用三种方法之一改进可靠性：1. 老化，2. 逐批 DPA，3. 三温度下功能测试	10	0

注 1：形式化方法是指通过使用考虑到技术制造能力的指南或规范来开展工作的方式。

注 2：三种情况互斥。

如果不能按照上述详细要求通过(5-22)评估计算 $\Pi_{\text{Process\_M\&IPM}}$ ，可以采用如下公式进行评估计算：

$$\Pi_{\text{Process\_M\&IPM}} = 4.015 - 2.668 \times \delta_{\text{ECERCC}} \quad (5-24)$$

其中，企业可靠性综合能力评估系数  $\delta_{\text{ECERCC}}$  的计算方法详见附录 B。

如果附录 B 数据也不能获取，即不能通过(5-24)计算，也可以直接采用 $\Pi_{\text{Process\_M\&IPM}}$ 默认值 2.5。

### 5.2.6 系统厂商过程因子

IGBT 模块和 IPM 的系统厂商过程因子  $\Pi_{\text{Process}}$  确定方法同第 4.2.3 节。

### 5.2.7 无铅焊接工艺因子

IGBT 模块和 IPM 的无铅焊接工艺因子  $\Pi_{\text{LF}}$  确定方法同第 4.2.4 节。

## 附录 A 寿命剖面建立方法

## A.1 寿命剖面的构建原则

建立寿命剖面总时长应以 1 年，即 8760 小时为准。本指南失效率评估的是小时失效率，表示每个日历小时，并且是基于年度寿命剖面开展评估计算。

寿命剖面的构建分为系统级和设备级，设备级寿命剖面是通过系统级寿命剖面分解而来，设备级寿命剖面必须考虑设备内部条件，如由于设备本身的温度升高，振动幅度的缩减或放大，采取的任何干燥措施等。

寿命剖面应该按照一年来进行不同阶段的划分和必要的合并，划分时主要考虑系统、设备、元器件的使用阶段、工作模式、结构组成及接口关系、地域、气候、人因等方面的因素。

寿命剖面中各阶段考虑的广义应力主要有五种：温度（含电热效应）、温度循环、相对湿度、机械振动、化学应力。其中，前四种应力比较容易量化，第五种化学应力是采用四个因素的定性方法评估，具体分类评估等级及实例如下表 A-1 至表 A-4 所示。

表 A-1 盐雾污染等级及实例

盐雾污染等级	实例
弱	大陆地区
强	沿海地区

表 A-2 环境污染等级及实例

环境污染等级	实例
弱	农村区域
中等	城市区域
强	城市和工业区域

表 A-3 应用污染等级及实例

应用污染等级	实例
弱	居住区域或维护区
中等	无人居住或无维护区
强	动力区

表 A-4 产品防护等级及实例

产品防护等级	实例
密封	密封保护
非密封	其它保护

## A.2 寿命剖面示例

本寿命剖面是以某桌面式电子设备为对象建立的。

此寿命剖面对应于在办公室或实验室使用条件下，每天使用 10 小时，每年 365 天（即每年使用 3650 小时）的产品。该产品在未使用时关闭（即一天 14 小时，每年关闭 5110 小时）。

在关机阶段，该产品的平均温度为 20°C，并且假定该产品放置在一个没有空调的办公室，昼夜温度循环的最大温差范围为 5°C。湿度假定为 70%RH。不存在机械振动。

在开机阶段，该产品与耗散功率相关的温度上升为 20°C。因此，其周边环境温度固定在 40°C，温度循环的最大温差范围为 20°C。循环次数 365。注意：工作时间叠加在昼夜循环持

续时间内。湿度假定为 22%RH。存在轻微机械振动，量级 0.5Grms。

该产品的污染水平较低，结构上不密封。

基于上述信息，建立该桌面式电子设备的寿命剖面如表 A-5 所示。

表 A-5 寿命剖面示例

某桌面式电子设备寿命剖面														
阶段名称	日历时间	温度和湿度			温度循环				机械	化学				诱导因子
		开/关	环境温度(°C)	相对湿度(%)	$\Delta T$ (°C)	循环次数(年)	循环时长(小时)	循环过程最高温度(°C)	随机振动(Grms)	盐度污染 环境污染	环境污染	应用污染	保护水平	$\Pi_{\text{application}}$ 应用因子(1)
停止	5110	关	20	70	5	365	14	23	0	弱	弱	弱	不密封	1
开始	3650	开	40	22	20	365	10	40	0.5	弱	弱	弱	不密封	1.9

注(1)：应用因子  $\Pi_{\text{application}}$  的计算参见本指南第 4.2.1 节方法。

## 附录 B 企业可靠性综合能力评估系数模型及计算方法

鉴于开展元器件失效率评估的不同用户经常无法同时获取元器件厂商和系统厂商的企业级可靠性过程控制和评审数据，我们开发了新的基于公开数据的企业可靠性综合能力评估系数  $\delta_{\text{ECERCC}}$ （ECERCC 全称为 Evaluation Coefficient of Enterprise Reliability Comprehensive Capability）模型和计算方法。

$\delta_{\text{ECERCC}}$  的模型见(B-1)，模型相关参数说明及确定方法详见表 B-1 至表 B-8。

$$\delta_{\text{ECERCC}} = \frac{1.5\Pi_{\text{YoE}} + \Pi_{\text{YtSM}} + 1.5\Pi_{\text{AT}} + \Pi_{\text{R\&D}} + 0.5\Pi_{\text{NoE}} + 1.5\Pi_{\text{MS}} + 3.0\Pi_{\text{ERinfo}}}{10 \times 100} \quad (\text{B-1})$$

表 B-1 企业可靠性综合能力评估主要考虑因素及符号说明

企业可靠性过程控制能力评价主要影响因素		说明
名称	符号	
企业成立年限	$\Pi_{\text{YoE}}$	1) 符号角标 YoE 表示 Year of Establishment
企业上市	$\Pi_{\text{YtSM}}$	1) 符号角标 YtSM 表示 Years to Stock Market
企业年营业额	$\Pi_{\text{AT}}$	1) 符号角标 AT 表示 Annual Turnover 2) 通常取近 3 年的年营业额的平均值
企业研发投入占比	$\Pi_{\text{R\&D}}$	1) 符号角标 R&D 表示 R&D intensity
企业员工总数	$\Pi_{\text{NoE}}$	1) 符号角标 NoE 表示 Number of Employees
被评价产品的市场占有率	$\Pi_{\text{MS}}$	1) 符号角标 MS 表示 Market Share
被评价产品的公开质量可靠性信息	$\Pi_{\text{ERinfo}}$	1) 符号角标 ERinfo 表示 Enterprise Reliability information

表 B-2 企业成立年限  $\Pi_{\text{YoE}}$  区段及分值

企业成立年限 (年)	$0 < \Pi_{\text{YoE}} \leq 5$	$5 < \Pi_{\text{YoE}} \leq 10$	$10 < \Pi_{\text{YoE}} \leq 20$	$20 < \Pi_{\text{YoE}} \leq 30$	$\Pi_{\text{YoE}} > 30$
分值	60	70	80	90	100

说明：如果开展可靠性预计的产品为企业并购其它企业获取的情况，可以按照被并购企业成立起始年份计算。

表 B-3 企业上市年限  $\Pi_{\text{YtSM}}$  区段及分值

企业上市年限 (年)	未上市*	$0 < \Pi_{\text{YtSM}} \leq 5$	$5 < \Pi_{\text{YtSM}} \leq 10$	$10 < \Pi_{\text{YtSM}} \leq 30$	$\Pi_{\text{YtSM}} > 30$
分值	60	70	80	90	100

注\*：对于未上市但是进入世界 500 强的企业，可以按照其进入世界 500 强年限对应上市公司上市年限计算。

表 B-4 企业年营业额  $\Pi_{\text{AT}}$  区段及分值

企业年营业额 (亿元人民币)	$\Pi_{\text{AT}} \leq 0.2$	$0.2 < \Pi_{\text{AT}} \leq 4$	$4 < \Pi_{\text{AT}} \leq 10$	$10 < \Pi_{\text{AT}} \leq 100$	$\Pi_{\text{AT}} > 100$
分值	60	70	80	90	100

表 B-5 企业研发投入  $\Pi_{\text{R\&D}}$  区段及分值

企业研发投入占比 (%)	未公开	$\Pi_{R\&D} \leq 5\%$	$5\% < \Pi_{R\&D} \leq 10\%$	$10\% < \Pi_{R\&D} \leq 20\%$	$\Pi_{R\&D} > 20\%$
分值	60	70	80	90	100

表 B-6 企业员工总数  $\Pi_{NoE}$  区段及分值

企业员工总数 (人)	$\Pi_{NoE} \leq 20$	$20 < \Pi_{NoE} \leq 300$	$300 < \Pi_{NoE} \leq 1000$	$1000 < \Pi_{NoE} \leq 10000$	$\Pi_{NoE} > 10000$
分值	60	70	80	90	100

表 B-7 被评价产品的市场占有率  $\Pi_{MS}$  区段及分值

被评价产品的市场占有率 (全球市场) *	$0 < \Pi_{MS} \leq 5\%$	$5\% < \Pi_{MS} \leq 10\%$	$10\% < \Pi_{MS} \leq 20\%$	$20\% < \Pi_{MS} \leq 30\%$	$\Pi_{YoE} > 30\%$
分值	60	70	80	90	100
被评价产品的市场占有率 (中国市场) *	$0 < \Pi_{MS} \leq 10\%$	$10\% < \Pi_{MS} \leq 20\%$	$20\% < \Pi_{MS} \leq 30\%$	$30\% < \Pi_{MS} \leq 50\%$	$\Pi_{YoE} > 50\%$
分值	40	50	60	70	80

注\*：产品的市场占有率数据优先选用全球市场占有率数据取值，如果没有全球数据再按照中国市场占有率数据取值，如果全球和中国的数据都没有则按照中国最低档数据 40 取值。

表 B-8 被评价产品的公开质量可靠性信息  $\Pi_{ERinfo}$  项目及分值

*被评价产品的公开质量可靠性信息 $\Pi_{ERinfo}$	1) 产品手册	2) 可靠性试验或评估报告	3) 失效率数据	4) 产品结构材料数据	5) 环保合规证明或数据
分值	10	30	10	10	10
*被评价产品的公开质量可靠性信息 $\Pi_{ERinfo}$	6) 装配和应用指南	7) 行业、国际相关等级认证**			
分值	10	20			

注：  
\* 被评价产品的公开质量可靠性信息分值  $\Pi_{ERinfo}$  为本表中 1) ~ 7) 项中适用项目的分值之和。  
\*\* 行业、国际相关等级认证，例如汽车安全完整性等级 (ASIL 等级) 认证。

## 附录 C 有源器件芯片基础失效率数据

表 C-1 通用集成电路的芯片基础失效率

通用集成电路类型	$\lambda_{0TH}$
FPGA、CPLD、FPGA 反熔丝、PAL	0.166
模拟及混合集成电路（MOS、双极、BiCMOS）	0.123
微处理器、微控制器、DSP	0.075
Flash、EEPROM、EPROM	0.060
SRAM	0.055
DRAM	0.047
数字电路（MOS, 双极,BiCMOS）	0.021

注：

- 1) 混合=模拟+数字；
- 2) 若为 ASIC，则按 ASIC 的模型。

表 C-2 ASIC 的芯片基础失效率

ASIC 技术类型	ASIC 功能类型	$\lambda_{0TH}$
硅 MOS	数字 ASIC, 简单功能	0.021
	数字 ASIC, 复杂功能（有 IP 核和/或 $\mu P$ 核、存储块）	0.075
	模拟、混合 ASIC	0.123
双极硅, BiCMOS	数字 ASIC	0.021
	混合、模拟 ASIC	0.123

表 C-3 分立器件（小功率二极管）的芯片基础失效率

小功率二极管	$\lambda_{0TH}$
1A 以下信号二极管（PIN、肖特基管、信号管、变容管）	0.0044
1A~3A 整流管	0.0100
1.5W 以下齐纳整流管	0.0080
3kW 以下防护二极管（峰值 10ms/100ms）(TVS)	0.0210

表 C-4 分立器件（功率二极管）的芯片基础失效率

功率二极管	$\lambda_{0TH}$
晶闸管, 3A 以上三端双向可控硅	0.1976
3A 以上整流管	0.1574
1.5W 以上齐纳整流管	0.0954
3kW 以上防护二极管（峰值 10ms/100ms）(TVS)	1.4980

表 C-5 分立器件（小功率三极管）的芯片基础失效率

小功率三极管	$\lambda_{0TH}$
硅双极 < 5W	0.0138
硅 MOS < 5W	0.0145
硅 JFET < 5W	0.0143

表 C-6 分立器件（功率三极管）的芯片基础失效率

功率三极管	$\lambda_{0TH}$
硅双极 > 5W	0.0478
硅 MOS > 5W	0.0202
IGBT	0.3021

注：若一个封装内含 N 个元件（二极管、三极管）， $\lambda_{0TH}$  要乘以 $\sqrt{N}$ 。