

百思杰可靠性技术服务有限公司简介

百思杰可靠性技术服务有限公司，总部座落在信息发达的深圳市宝安区中心。是一家集产品可靠性检测，ROHS 检测，培训及技术咨询为一体的综合性专业服务公司。

百思杰公司的使命是为中国中小企业公司提供“价格最低，服务最好，速度最快”的专业服务，坚持“诚信为本，薄利多销，速度求存，服务当先”的经营理念，本着“商界无域、相融共生”的企业发展理念，同时秉承“没有人像我们一样抠门”的服务理念，为客户减少和节约在各种阶段所产生的测试与认证费用。

公司服务模块：

（一）. 检测服务及设备维修服务

1. 百思杰公司拥有专业的可靠性工程师队伍，为您的试验提供专业可靠性试验分析。

可以满足国内外客户的各种可靠性 Qualification 要求，目前我们已经成功为各个领域的客户提供过多种检测服务，我们将全方位地为客户提供“Total Solution”，服务过的企业包括“DELL Computer，华为，中兴，台达，纬创资通等知名企业。

公司目前与国内外近 20 家专业实验室建立了长期的合作关系。在华南地区，我们与多家知名检测机构建立了互动的交流机制，其中包括 SGS 公司，华测检测，SMQ，广州五所等公司，主要涉足的领域有电子电器，汽车电子，计算机，通讯，机械，塑胶产品等，我们将与您共同节约每一分测试费用。

主要提供的检测服务项目为：

环境与可靠性： 高低温试验 冷热冲击试验 步入式试验 快速温变试验 HALT 试验

特殊试验项目： 挤压试验 拉力试验 防水,防尘 盐雾/气体腐蚀 综合环境试验

机械环境试验： 斜坡冲击试验 跌落试验 常规机械试验 冲击碰撞试验 振动试验

产品失效分析： 失效分析，材料分析

2. 设备维护保养与售后服务业务：

目前我公司与国内外多家设备厂商合作，拥有 5 年以上设备售后服务经验的资深工程师 3 名，专业维护工程师 2 名，具备国产知名品牌以及进口知名品牌设备维修能力。如果您实验室在高使用率情况下，突然出现设备损坏时，我们将为您提供速度最快，价格最平的优质服务，为您的设备保驾护航。

主要维修设备及品牌为：广州爱斯佩克 GZ-ESPEC、上海爱斯佩克 SH-ESPEC、美国热测 Thermotron、美国环测 Envirotronics、其他国产设备 如高低温环境试验箱，冷热冲击箱，快速温变箱，HALT 箱以及各种可靠性试验设备。

临时性维修： 1. 控制类（温度不受控、湿度不受控、控制系统不能正常工作、传感器失效等） 2. 制冷类（制冷剂泄漏、管道焊接、维修阀门故障、更换过滤器、加注压缩机润滑油、维修压缩机、清洁冷凝器等） 3. 加热类（维修加热器、可控硅等） 4. 机械类（维修循环马达，风机叶片、改善循环风道、维修箱体结构故障等） 5. 湿度类（维修加湿过滤、维修加湿水共给管道、维修排水管道、维修加湿除湿系统等）

保养性维修： 1. 全面保养服务（4 次/年，包全部零部件） 2. 保养服务（4 次/年，包部分零部件或不包零部件）

实用可靠性设计与试验高级研修班

主办单位: 百思杰可靠性技术公司 协办单位: 中国可靠性网、人企网



(二).培训咨询服务

百思杰公司推行的全新电子可靠性工程和以前的可靠性方法不同之处，就是具有很强的操作性，可以直接帮助上述人员快速掌握实用操作方法，提升自身价值。培训老师都曾长期就职于国内外著名公司，对电子可靠性系统工程有深入的理解并具有丰富的工程实践经验和教学经验，擅长根据实际案例进行启发性教学。

服务项目：

1. 公开课培训：

可靠性基础知识课程

可靠性设计课程

失效分析课程

2. 内训课程：由百思杰专家、教师将亲临现场访谈，着眼企业的需求及发展，又针对性的为您“量身定做”培训课程，以臻完美。

3. 技术咨询服务：针对电子制造的企业特点和不同行业领域的要求，为用户提供可靠性全面解决方案。解合企业的实际状况，致力于企业可靠性技术难题的解决，为企业精心调研，科学诊断，提供落地的技术咨询服务。

4. 师资团队方面：百思杰咨询部门汇集了全国具有一定知名度并在电子设备可靠性工作中有所成就的专家、学者二十多名。



如失效分析资深专家，华为技术有限公司元器件可靠性高级顾问邓永孝研究员、原电子部可靠性专家组组长王锡吉研究员，西安交通大学城市学院副院长李能贵教授，陕西省兵器质量与可靠性专业委员会常务副主任秦英孝高级工程师等等。

《实用可靠性设计与试验技术》在深圳成功举办



百思杰可靠性技术服务有限公司 实用可靠性设计与试验高级研修班

 可靠性发展的历史	<h3>概述</h3>	
	<p>国外： 40年代重视可靠性。 50年代调查分析，统计试验。 60年代失效分析，强调环境试验的重要性 70年代可靠性工程</p> <p>国内： 50年代建立环境适应性试验基地 60年代提出可靠性问题。 70年代开展可靠性研究。 80年代以后可靠性保证、管理、系统工程</p> <p>78年电视机的MTBF300~500小时，年故障率95%</p> <p>从可靠性的发展历史看，可靠性是战争的产物；是产品的重要指标；是企业的命脉。</p>	

 可靠性发展的历史	<h3>概述</h3>	
	<p>可靠性的两种思路及产生的原因</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 通过强化试验保证产品的可靠性 2. 从失效机理控制入手保证产品的可靠性。 <p>可靠性研究的发展方向</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 微观失效机理研究的继续深入 2. 软件可靠性设计和硬件的统一 3. 事前控制为主，评价试验为辅，针对性和多样性评价方法的开展。 	



概述

产品在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的能力（概率），就叫做电子产品的可靠性。

可靠性试验是对产品可靠性进行调查、分析和评价的一类试验。



一、可靠性基础知识

可靠性试验与环境试验

可靠性试验是对产品进行评价的各种试验如增长、筛选、验证、验收、统计等

环境试验是检验产品对各种环境应力的适应性，快速暴露产品缺陷的试验，是可靠性试验的主要技术手段

环境应力

就是指外界各种环境对产品的破坏力，如产品在85℃下工作受到的应力，比在25℃下工作受到的应力大；在高应力下工作，产品失效的可能性就大大增加了。



一、可靠性基础知识


- MTTF: Mean Time To Failures
平均无故障时间
- MTBF: Mean Time Between Failures,
平均无故障间隔时间
- MCBF: Mean Cycle Between Failures
平均无故障间隔次数
- ESS: Environmental Stress Screening Test
环境应力筛选
- HALT: High Accelerate Life Test
高加速寿命试验
- HASS: High Accelerate Stress Screening
高加速应力筛选



一、可靠性基础知识

10℃规则

当讨论产品在不同环境下的使用寿命时，一般采用“10℃规则”的表达方式。即当周围环境温度上升10℃时，产品寿命就会减少一半；当周围环境温度上升20℃时，产品寿命就会减少到四分之一。这种规则可以说明温度是如何影响产品寿命（失效）的。



产品的失效

致命失效
漂移失效
间歇失效

一、可靠性基础知识

a. 功能性失效


致命失效、漂移性失效、间歇失效

- 致命失效:是指产品完全失去规定功能能力的一类失效。
- 漂移性失效:是指产品的一个或几个参数超过规定值所引起的一类失效, 漂移性失效在产品使用中有时是允许的
- 间歇失效:是指产品在使用或试验过程中呈现时好时坏一类的失效。

b. 阶段性失效 (浴盆曲线)

早期失效、偶然失效、耗损失效

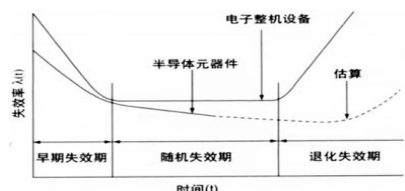
9



产品的失效


一、可靠性基础知识

浴盆曲线:
通常将电子元件和设备失效率数值连接成曲线后就会得出所示的“浴盆曲线”。此图表明半导体元件与电子器件失效曲线是随着操作时间变化而变化。产品不同阶段失效原因可以用右边表格说明



失效时期	早期失效期	随机失效期	退化失效期
常见失效机理和原因	<ul style="list-style-type: none"> ● 不够完善的生产 ● 存在缺陷的材料 ● 不合适的环境 ● 不够完善的设计 	<ul style="list-style-type: none"> ● 外部振动 ● 使用人员误用 ● 环境条件的变化波动 ● 不良抗压性能 	<ul style="list-style-type: none"> ● 氧化 ● 疲劳 ● 老化 ● 性能退化 ● 腐蚀

10



可靠性的特征量

一、可靠性基础知识

可靠度R(t)


产品在规定条件下使用时间t后, 还能完成规定功能的概率, 被定义为产品的“可靠度”。用数学符号来表示, 则为:

$$R(t) = P(T > t)$$

式中: t- 工作时间 (期望时间);
T- 产品出故障的时间 (寿命);
P- 表示不出现故障的概率。

例如某舰艇在95天的航海任务中, 其雷达不出故障的概率为90%, 其可靠度表达为:
 $R(95天) = P(T > 95天) = 90%$

11



可靠性的特征量

一、可靠性基础知识

可靠度函数的计算

当同型号的N个产品作为样品总数, 并足够大的情况下可靠度函数的估计值为:

$$R(t) = [N - n(t)] / N$$

式中: n(t) - 样品t时刻的失效总数;
N - 样品总数。

由于大部分的产品其失效分布为指数形式, 因此在指数分布情况下, 可靠度R(t)的计算公式为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t$$

式中: λ - 样品的失效率;
t - 时间

12



一、可靠性基础知识

可靠度特性

1. 可靠度是时间的函数。
2. 可靠度是表示一大批产品的统计特性，而不是表示个别产品或少数产品可靠性。
3. 可以用概率来表示产品的可靠性。

R(t)的用途

1. 估计一批产品随时间变化的可靠能力。
2. 估算一批产品工作一段时间后继续工作的可靠能力



一、可靠性基础知识

例1: 80个样品的失效时间分组整理如表, 如何估计这批产品的可靠度

组号	失效时间范围(h)	组中值(h)	失效数n
1	0~400	200	3
2	400~800	600	18
3	800~1200	1000	26
4	1200~1600	1400	15
5	1600~2000	1800	9
6	2000~2400	2200	6
7	2400~2800	2600	2
8	2800~3200	3000	1

根据公式:
 $R(t) = [N - n(t)] / N$
 求每一时间段的可靠度。

式中:
 N - 表示投入试验的样品总数;
 n(t) - 表示试验到t时刻失效的总数

$$R(0) = 1; \quad R(400) = 77/80 = 0.963; \quad R(800) = 59/80 = 0.738$$

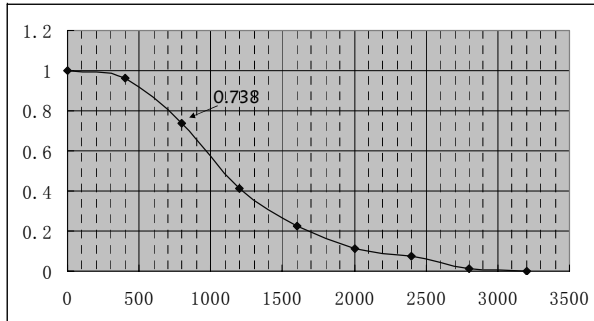
$$R(1200) = 0.413 \quad R(1600) = 0.225 \quad R(2000) = 0.113$$

$$R(2400) = 0.075 \quad R(2800) = 0.013 \quad R(3200) = 0$$



一、可靠性基础知识

根据计算的结果作图



$$R(0) = 1; \quad R(400) = 77/80 = 0.963; \quad R(800) = 59/80 = 0.738$$

$$R(1200) = 0.413 \quad R(1600) = 0.225 \quad R(2000) = 0.113$$

$$R(2400) = 0.075 \quad R(2800) = 0.013 \quad R(3200) = 0$$



一、可靠性基础知识

例2: 一批产品的失效统计满足指数分布, 有21个产品工作到800小时失效, 此时还有59个产品, 如再继续工作1000小时, 问在这1000小时里的可靠度是多少?

解: 利用已知条件: 1、工作时间800小时, 2、失效数量21个求失效率λ。

$$\lambda = 21 / (21 + 59) \times 800 = 0.000328$$

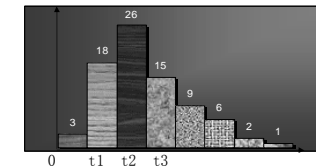
代入公式

$$R(t) = e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t$$

$$= 1 - 0.000328 \times 1000 \text{小时}$$

$$= 1 - 0.328$$

$$= 0.672$$



问题: 注意与前图的差别, R(t) 不同原因是什么?



可靠性的特征量

一、可靠性基础知识

失效分布函数 $F(t)$ (也称为不可靠度)

产品的寿命 T 是一个随机变量。如果以 t 表示规定的时间, 以 T 表示产品的寿命, 则 $T \leq t$ 的事件就是一个随机事件。随机事件 $T \leq t$ 的概率, 就称为该产品的失效分布函数, 即:

$$F(t) = P(T \leq t)$$

如果给定的时间 t 为 100 小时, 则表示为

$$F(100) = P(T \leq 100)$$

这表示了产品在 100 小时前的失效概率, 因而, 失效分布函数 $F(t)$, 含有累积失效概率的意思。

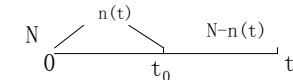


可靠性的特征量

一、可靠性基础知识

失效分布函数 $F(t)$ 的计算公式

$[0, t_0]$ 内产品的失效数与参加试验的总数之比是产品发生的失效频率。



当 N 为总数, 并足够大的情况下失效分布函数的表达式:

$$F(t) \approx n(t)/N$$

$F(t)$ 和 $R(t)$ 的关系

产品在规定的时间内失效与不失效, 完成与不能完成规定功能是相互对立的。概率论中称它们之间是相互对立的事件, 它们之间的关系式有:

$$R(t) + F(t) = [N-n(t)]/N + n(t)/N = 1$$

由以上公式可看出可靠度是小于 1 的。



可靠性的特征量

一、可靠性基础知识

例 3: 系统由 a、b 两个分组件构成, 已知 a 组件 1000 小时的可靠度为 0.96, b 组件 1000 小时的可靠度为 0.95, 求串联系统 1000 小时的可靠度。

根据系统可靠性的观点, 串联系统的可靠度为所用元器件可靠度的乘积, 目前为两个分组件的乘积, 有

$$\begin{aligned} R_{\text{系统}}(1000) &= R_a(1000) * R_b(1000) \\ &= 0.96 * 0.95 \\ &= 91.2\% \end{aligned}$$

显然系统可靠度低于每个组件的可靠度, 当系统由三个组件串联组成, 且 c 组件 1000 小时可靠度为 0.99 时, 系统可靠度为

$$R_{\text{系统}}(1000) = 0.96 * 0.95 * 0.99 = 90\%$$

1. 使用的组件或元器件越多可靠度越低。
2. 串联后的系统可靠度, 比各组件中最低的可靠度还要低。



可靠性的特征量

一、可靠性基础知识

失效密度函数 $f(t)$

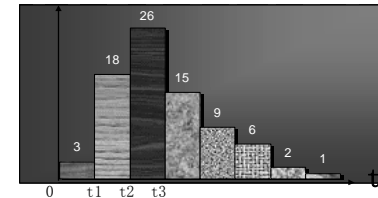
用来表征失效分布随时间变化的情况, 即产品在时刻 t 的单位时间里发生失效的概率, 称为产品在时刻 t 的失效密度。

如图可见在每个时间段中失效的比例是不一样的。

1. 用故障数据作近似计算

各组在时间间隔 Δt 的失效数 Δn_i 与产品总数 N 在时间间隔 Δt 之比称为该组的失效密度即

$$f(t) = \Delta n_i / \Delta t \times N$$



例如: 直方图 $t_2 \sim t_3$ 间的失效密度为:

$$f(t) = 26 / (t_3 - t_2) \times N = 26 / 400 \times 80 = 0.0001875$$



一、可靠性基础知识

失效密度函数 $f(t)$

2. 用分布函数计算

选用什么样的分布函数? 为什么选用指数分布?

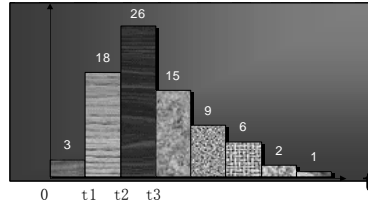
指数分布的重要性质——“无记忆性”

当产品工作了S小时, 再继续工作t小时的概率与已工作过的时间S的长短无关, 就像使用一个新产品一样。

用分布函数计算的公式为:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

图中可见累计失效率 $n(t)/N$ 是各组失效率的累加, 当累加到最后一组时必然为1。

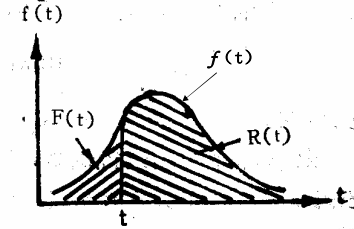


一、可靠性基础知识

失效密度函数 $f(t)$

如图可见在每个时间段中失效的比例是不一样的。失效密度函数在工程中的意义:

1. 相同条件下哪个时间段失效密度高;
2. 不同条件下哪种条件下失效密度高



失效密度函数与失效分布函数、可靠度的关系

$$F(t) = 1 - R(t) =$$

器件的失效分布类型指的就是 $f(t)$ 或 $F(t)$ 的函数类型, 它们是用来说明产品失效规律的一个较好形式, 反映失效产品数分布在各个时刻的情况。



一、可靠性基础知识

失效率函数 $\lambda(t)$

已工作到t时刻的产品, 在时刻t后单位时间内发生失效的概率, 称为该产品在时刻t的失效率函数, 又称为失效率, 计算公式为:

$$\lambda(t) = \Delta n(t) / \Delta t [N - n(t)]$$

失效率单位

$$1 \text{ 菲特 (Fit)} = 1 \times 10^{-9} / \text{h} = 1 \times 10^{-6} / 1000 \text{h}$$

表示每10亿个元件小时内只允许有一个产品失效, 即在每千小时内, 只允许有百万分之一的失效概率。通常也可用每小时或每千小时的百分数作为失效率的单位, 如 0.2%(1000h)。



一、可靠性基础知识

失效率函数 $\lambda(t)$

例4: 有100块IC, 在1000小时内失效5块, 在1000~1010小时失效38块, 求 $t=1000$, 和 $t=1010\text{h}$ 的失效率的估计值?

代入公式: $\lambda(t) = \Delta n(t) / \Delta t [N - n(t)]$

求解:

$$\lambda(0) = 5 / 1000 (100 - 5) = 5.2631 \times 10^{-5} / \text{h} = 52631 \text{ Fit}$$

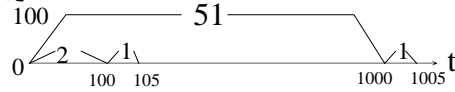
$$\lambda(1000) = 38 / (1010 - 1000) (95 - 38) = 0.06\% \text{ h}^{-1}$$



一、可靠性基础知识

失效率 $\lambda(t)$ 和失效密度函数 $f(t)$ 的区别

例5: 如图在 $t=0$ 时, 有 $N=100$ 件产品开始工作, 在 $t=100$ 小时前有两个失效, 而在 $100\sim 105$ 小时内失效1个; $t=1000$ 小时前有51个失效, 而在 $1000\sim 1005$ 小时内失效1个, 求失效率和失效密度。



$$\text{带入公式: } f(t) = \Delta n_1 / \Delta t \times N$$

$$\lambda(t) = \Delta n(t) / \Delta t \times (N - n(t))$$

$$\text{得出: } f(100) = 1/5 \times 100 \quad f(1000) = 1/5 \times 100$$

$$\lambda(100) = 1/5 \times 97 \quad \lambda(1000) = 1/5 \times 48$$

$f(t)$ 表示所有样品在某时段的失效, $\lambda(t)$ 表示在某时刻 t 之后, 还仍在工作的产品的失效概率。

25



一、可靠性基础知识

失效率 $\lambda(t)$ 与失效密度函数 $f(t)$ 的用途

例6: 有一批产品共80个投入试验, 每隔40小时测试一次, 失效数分别为7、6、6、5、2, 试验200小时后还有52个样品正常, 再继续试验2000小时共有5个样品失效, 问产品的失效分布形态。

$$\lambda(0) = 7/40 \times (80 - 7) = 0.0024$$

$$\lambda(40) = 6/40 \times (73 - 6) = 0.0022$$

$$\lambda(80) = 6/40 \times (67 - 6) = 0.0024$$

$$\lambda(120) = 5/40 \times (61 - 5) = 0.0022$$

$$\lambda(160) = 2/40 \times (56 - 2) = 0.0009$$

由失效率计算的前4个数据看, 基本为常数满足可靠度函数服从指数分布的形态。第五个数据失效率产生了很大的偏离说明从这次测试后产品将进入偶然失效期。由此可见失效率不是恒定不变的, 产品失效期的三个阶段其失效率也是变化的。

26



一、可靠性基础知识

失效率 $\lambda(t)$ 与失效密度函数 $f(t)$ 的区别

相同点: 反映产品失效的变化速度
不同点: 一个是反映全部产品在时刻 t 的变化速度 $f(t)$; 另一个是反映在时刻 t 以后, 未失效产品的变化速度。

失效密度的用途: 在一组数据中可以通过失效密度的计算判断产品的失效分布情况。

失效率的用途: 通过对数据的估算, 可以判断产品失效期的三个阶段。

27



一、可靠性基础知识

4个可靠性特征量的关系

前面我们已学过可靠度 $R(t)$ 、失效分布函数 $F(t)$ 与失效密度函数 $f(t)$ 的关系有

$$F(t) = 1 - R(t) =$$

它们与失效率的关系如下:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp[- \quad]$$

$$f(t) = F'(t) = \lambda(t) \exp[- \quad]$$

$$R(t) = e^{-\lambda(t)}$$

以上我们了解了4个可靠性特征量的表达方式, 它们都是用来全面描述产品寿命 T 统计规律性的。当我们了解其中的一个特征量, 其他的就可以通过以上的公式计算出来。

28



一、可靠性基础知识

可靠寿命、中位寿命与特征寿命

产品的可靠度R(t)是时间的函数,随着时间的延长,产品的可靠度会越来越小。假定开始工作时t=0,可靠度R(0)=1。以后在不同的时刻,产品的可靠度将具有不同的r值。在可靠性工作中经常需要知道,对于给定可靠水平r,产品的可靠度下降到r时的时间是多少?这个时间就称为产品的

可靠寿命

$$R(t_r) = r$$

产品失效数与可靠寿命t_r的关系为:

$$\text{失效数 } n(r) = 100(1-r) \%$$

由上面的公式可求出可靠寿命与失效的样品数

指数分布时可靠寿命与失效率的关系:

$$t_r = -\ln r - 1/\lambda = 2.302(\lg 1/r) / \lambda$$



一、可靠性基础知识

可靠寿命、中位寿命与特征寿命

中位寿命

是指可靠水平r=0.5时,此时产品约有一半失效。

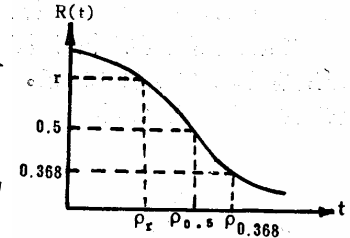
$$R(t_{0.5}) = 0.5$$

特征寿命

是指可靠水平r=e⁻¹的可靠寿命, R(t_{0.368})=e⁻¹。

在指数分布的场合特征寿命与平均寿命重合,因此有

$$MTBF = 1/\lambda$$



一、可靠性基础知识

平均寿命 (MTTF、MTBF)

假定有N个产品,在t₁, t₂...t_i, ...t_k各时刻的失效数分别为n₁, n₂...n_i, ...n_k, 那么,它们的算术平均值就可以用来估算平均寿命

组号	失效时间范围 (h)	组中值 (h)	失效数 n
1	0~400	200	3
2	400~800	600	18
3	800~1200	1000	26
4	1200~1600	1400	15
5	1600~2000	1800	9
6	2000~2400	2200	6
7	2400~2800	2600	2
8	2800~3200	3000	1

例5: 80个样品的失效时间分组整理如表, 如何估计这批产品的平均寿命

a. 先求出80个样品的总工作时间T

$$T = 200 \times 3 + 600 \times 18 + 1000 \times 26 + \dots + 3000 \times 1 = 96000h$$

b. 解这批样品的平均寿命的估计值

$$MTBF = T/N = 96000 / 80 = 1200h$$




一、可靠性基础知识

平均寿命 (MTTF、MTBF)续

可靠性寿命试验由于其破坏性,因此只能抽取部分产品进行试验,这部分产品就称为“子样”,其中的每个产品称为“样品”。

求平均寿命的估计值要注意以下内容:

1. 抽样要随机化,排除人为因素的干扰。
2. 一般来说,子样越大,估计的结果越精确。
3. 完全寿命试验中全部样品都必须在试验中失效,就可以采用算术平均值去估计平均寿命。
4. 试验过程中样品无失效或部分失效时,可采用截尾寿命试验。
5. 截尾寿命试验需要使用其他的公式估计平均寿命



可靠性中的寿命

一、可靠性基础知识


截尾寿命试验

1. 定时截尾试验
2. 定数截尾试验


平均寿命的几种估计计算

1. 平均寿命的点估计值
2. 单侧置信下限估计
3. 双侧区间估计

寿命估计计算中的重要工具
χ²分位数表,



33



平均寿命的几种估计计算公式

一、可靠性基础知识

1. 点估计值


无替换定时截尾 $\bar{\theta} = T/r = \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t \right]$

无替换定数截尾 $\bar{\theta} = T/r = \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_r \right]$


有替换定时截尾 $\bar{\theta} = \frac{n}{r} t$

有替换定数截尾 $\bar{\theta} = \frac{n}{r} t_r$

r: 故障数
t_i: 第i个产品故障前的工作时间
n: 样本数
t_r: 定数截尾时间



34



平均寿命的几种估计计算公式

一、可靠性基础知识


2. 双侧区间估计

定数截尾


下限 $\theta_L = \frac{2T}{\chi^2(\frac{1-c}{2}, 2r)}$; 上限 $\theta_U = \frac{2T}{\chi^2(\frac{1+c}{2}, 2r)}$

定时截尾

$\theta_L = \frac{2T}{\chi^2(\frac{1-c}{2}, 2r+2)}$; $\theta_U = \frac{2T}{\chi^2(\frac{1+c}{2}, 2r+2)}$



35



平均寿命的几种估计计算公式


一、可靠性基础知识

3. 单侧置信下限

定数截尾 $\theta_L = \frac{2T}{\chi^2(1-c, 2r)}$

定时截尾 $\theta_L = \frac{2T}{\chi^2(1-c, 2r+2)}$

T: 试验时间
χ²: 分位数分布表
α: 显著性水平; α = 1 - 置信水平



36

X²分位数表

自由度	概率													
	0.99	0.975	0.95	0.9	0.8	0.75	0.5	0.25	0.2	0.1	0.05	0.025	0.01	0.001
1	0.0002	0.001	0.0039	0.016	0.0642	0.102	0.455	1.323	1.642	2.706	3.8415	5.024	6.6349	10.83
2	0.0201	0.0506	0.1026	0.211	0.4463	0.575	1.386	2.773	3.219	4.605	5.9915	7.378	9.2103	13.82
3	0.1148	0.2158	0.3518	0.584	1.0052	1.213	2.366	4.108	4.642	6.251	7.8147	9.348	11.3449	16.27
4	0.2971	0.4844	0.7107	1.064	1.6488	1.923	3.357	5.385	5.989	7.779	9.4877	11.14	13.2767	18.47
5	0.5543	0.8312	1.1455	1.61	2.3425	2.675	4.351	6.626	7.289	9.236	11.07	12.83	15.0863	20.52
6	0.8721	1.2373	1.6354	2.204	3.0701	3.455	5.348	7.841	8.558	10.64	12.592	14.45	16.8119	22.46
7	1.239	1.6899	2.1673	2.833	3.8223	4.255	6.346	9.037	9.803	12.02	14.067	16.01	18.4753	24.32
8	1.6465	2.1797	2.7326	3.49	4.5936	5.071	7.344	10.22	11.03	13.36	15.507	17.53	20.0902	26.12
9	2.0879	2.7004	3.3251	4.168	5.3801	5.899	8.343	11.39	12.24	14.68	16.919	19.02	21.666	27.88
10	2.5582	3.247	3.9403	4.865	6.1791	6.737	9.342	12.55	13.44	15.99	18.307	20.48	23.2093	29.59
11	3.0535	3.8157	4.5748	5.578	6.9887	7.584	10.34	13.7	14.63	17.28	19.675	21.92	24.725	31.26
12	3.5706	4.4038	5.226	6.304	7.8073	8.438	11.34	14.85	15.81	18.55	21.026	23.34	26.217	32.91
13	4.1069	5.0088	5.8919	7.042	8.6339	9.299	12.34	15.98	16.98	19.81	22.362	24.74	27.6882	34.53
14	4.6604	5.6287	6.5706	7.79	9.4673	10.17	13.34	17.12	18.15	21.06	23.685	26.12	29.1412	36.12
15	5.2293	6.2621	7.2609	8.547	10.307	11.04	14.34	18.25	19.31	22.31	24.996	27.49	30.5779	37.7
16	5.8122	6.9077	7.9616	9.312	11.152	11.91	15.34	19.37	20.47	23.54	26.296	28.85	31.9999	39.25
17	6.4078	7.5642	8.6718	10.09	12.002	12.79	16.34	20.49	21.61	24.77	27.587	30.19	33.4087	40.79
18	7.0149	8.2307	9.3905	10.86	12.857	13.68	17.34	21.6	22.76	25.99	28.869	31.53	34.8053	42.31
19	7.6327	8.9065	10.117	11.65	13.716	14.56	18.34	22.72	23.9	27.2	30.144	32.85	36.1909	43.82
20	8.2604	9.5908	10.851	12.44	14.578	15.45	19.34	23.83	25.04	28.41	31.41	34.17	37.5662	45.31
21	8.8972	10.283	11.591	13.24	15.445	16.34	20.34	24.93	26.17	29.62	32.671	35.48	38.9322	46.8

37

例7: 产品的寿命服从指数分布。抽20个样品进行500小时的寿命试验, 在试验过程中无失败。求平均寿命M的置信水平为0.90的单侧置信下限。

解: 显然 $m = T/r = \infty$, 平均寿命无穷大肯定是不正确的但在定时截尾寿命的试验场合, 还是可以通过特定的公式计算和查X²分布表, 求出其一定置信水平下的单侧置信下限。

M = 2T / X²(1 - c, 2r+2)

= 2 × 20 × 500 / X²(1 - 0.90, 2)

= 20000 / 4.605

= 4343.1小时

38

一、可靠性基础知识

定时截尾寿命试验标准试验方案

生产方和使用方都需要一个试验方法来验证产品的可接受寿命, 较为常用的是以下的方案

定时截尾寿命试验的已知条件

θ_0 —— 生产方的MTBF (上限值)

θ_1 —— 使用方的MTBF (下限值)

α —— 生产方风险

β —— 使用方风险

d —— 鉴别比 $d = \theta_0 / \theta_1$

样本量与已知条件的关系

1. 鉴别比越小, 观测的样本量越大。
2. 风险率 α 、 β 越小, 观测的样本量越大。

39

一、可靠性基础知识

定时截尾寿命试验常用的标准试验方案简表

方案序号	判断风险标称值(%)		鉴别比	试验时间T	判别标准 (r <)	判断风险率真值	
	α	β				α	β
1	10	10	1.5	45.0	37	12.0	9.9
2	10	20	1.5	29.9	26	10.9	21.4
3	20	20	1.5	21.1	18	17.8	22.1
4	10	10	2.0	18.8	14	9.6	10.6
5	10	20	2.0	12.4	10	9.8	20.9
6	20	20	2.0	7.8	6	19.9	21.0
7	10	10	3.0	9.3	6	9.4	9.9
8	10	20	3.0	5.4	4	10.9	21.3
9	20	20	3.0	4.3	3	17.5	19.7
10	10	10	5.0	1.1	3	10.0	8.8
11	30	30	1.5	8.0	7	28.8	31.3
12	30	30	2.0	3.7	3	28.8	28.5
13	30	30	3.0	1.1	1	30.7	38.3

下三行为短时高风险

40



可靠性中的寿命

一、可靠性基础知识

例8：计算机的可靠性指标为6000小时，最低可靠性指标为4000小时，生产方和使用方的风险均为10%。设计一个鉴定试验方案。

解： $\theta_0=6000$ ； $\theta_1=4000$ ； $\beta=\alpha=10\%$ ；

$$d=6000 \div 4000=1.5$$

查表可采用方案1，试验时间为：

$$T=\theta_1 \times 45=4000 \times 45=180000 \text{小时}$$

判据标准是在180000内累计失效小于37次，可通过鉴定试验。

注意：GB5060.7《恒定失效率假设下的失效率与平均无故障时间的验证试验》、GJB899《可靠性鉴定和验收试验》、MIL-STD-781《工程研制、鉴定和生产的可靠性试验》有许多标准试验方案或推荐方案供选择，无需自己设计

41



如何正确认识MTBF

一、可靠性基础知识

例9：一批产品的MTBF=10万小时如何认识它？

一、通过MTBF我们可以知道该批产品的失效率 λ

产品在指数分布的情况下，MTBF和失效率之间存在一个可靠性数学中最为常见的公式：

$$MTBF=1/\lambda$$

根据公式我们可以了解MTBF为10万小时的产品，其失效率是多少？

$$\lambda=1/MTBF=1/100000=1 \times 10^{-5} \text{小时}$$

二、通过MTBF我们可以了解该批产品的年返修率

将10万小时换算为年（年=8760小时），大约是11.4年，带入公式求出每年产品的失效率为

$$\lambda=1/11.4 \text{年}=0.087 \text{年}$$

结果是MTBF=10万小时，该批产品的年返修率是8.7%。

42



如何正确认识MTBF

一、可靠性基础知识

三、MTBF=45000小时的产品是否大约平均可以运行5年多的时间不发生故障？ $45000 \text{小时} \approx 5.13 \text{年}$

根据以上学过的知识，当产品符合指数分布规律时，MTBF的可靠水平 $r=0.368$ ，带入失效率公式：

$$N(r)=100(1-r)\%$$

$$N(r)=100(1-0.368)\%=63.2\%$$

当产品运行了5年返修率约为总数的63.2%

四、如果要求产品的可靠度为0.9以上，MTBF如何？（见下例）

43



如何正确认识MTBF

一、可靠性基础知识

例10：已知设备是服从指数分布规律，且失效率 $\lambda=4 \times 10^{-4}$ 小时，请求出平均无故障工作时间是多少？如果要求有90%的把握不出故障，其使用时间应如何选择？

解：对于指数分布来说带入公式： $MTBF=1/\lambda$ 。可知其平均无故障时间为：

$$MTBF=1/4 \times 10^{-4}=2500 \text{小时}$$

由于要求90%的把握不出故障（即可靠水平 $r=90\%$ ），则根据可靠寿命公式：

$$t_r=2.302(\lg 1/r)/\lambda$$


解得：

$$t_r=2.302 \times 0.0458/4 \times 10^{-4} \text{小时}=263.6 \text{小时}$$

答：使用时间不应超过263小时。

如要求产品有90%的把握不出故障，其工作时间不要超过MTBF的十分之一。订购方要注意可靠水平 r

44



如何正确认识MTBF

一、可靠性基础知识

整机MTBF评价的方法

问题


- 1、全寿命试验的局限性
- 2、加速试验的可能性

解决方法

- 1、不同的定时截尾试验的选择
- 2、参数点估计的极大似然估计法（指数分布）
- 3、参数的区间估计（指数分布）
- 4、最佳和简单线性无偏估计（威布尔分布）
- 5、目的不是寿命评价的HALT和HASS（提高使用可靠性）

注意：所有试验室的MTBF都是估计值，如果有现场失效率统计数据，MTBF的可信度更高，因此生产单位完全可以通过统计失效率或维修数量来推算MTBF。

45



如何正确认识MTBF


一、可靠性基础知识

对于生产单位如何进行MTBF的估算

- 1、采用传统的试验评价方法（第三方评价）
- 2、采用统计现场失效率的方法
- 3、正确利用产品的老化时间
 - a、选取同型号同批次的产品
 - b、扣除批产品老化过程的早期失效时间
 - c、统计失效和老化的台时，并计算

MTBF是衡量产品可靠性特征的主要指标。其值越大可靠性越高。由于MTBF是寿命这个随机变量的数学期望，具有统计的意义，因此不能说明某一个产品无故障地工作时间

46



本章小结

一、可靠性基础知识


可靠性的定义、发展历史；

失效的概念：产品的失效分类（致命、漂移、间歇，早期、偶然和耗损失效）

可靠性指标：可靠度 $R(t)$ 、累计失效概率 $F(t)$ 、失效率 $\lambda(t)$ 、失效率密度函数 $f(t)$ 、失效率 $\lambda(t)$

寿命指标：可靠寿命 $R(t)=r$ 、中位寿命 $R(t)=0.5$ 、特征寿命 $R(t)=e^{-1}$ 、平均寿命(MTBF)

47




二、可靠性设计的基本概念

设计人员的四个全面

- 1、全面了解元器件的参数、可靠性能力（或薄弱环节）。
- 2、全面了解产品的生产工艺，设备条件。
- 3、全面了解整机或系统的失效特点与环境试验方法。
- 4、全面了解各类元器件的失效机理与对应的筛选试验。

48



基本术语

二、可靠性设计的基本概念


可靠性设计目的：

可靠性设计是为了在设计、生产、使用过程中挖掘和确定隐患(和薄弱环节)，并采取设计预防和设计改进措施，有效地消除隐患。从而形成产品的固有可靠性。

产品可靠性的三个阶段：

1. 设计阶段： 重视可靠性增长试验、确定和暴露薄弱环节
2. 生产制造： 元器件保证、生产工艺保证、固有可靠性
3. 使用过程： 环境条件、操作方法和检测程序、合理维护、现场使用可靠性。

49




基本内容

二、可靠性设计的基本概念

- 降额设计、
- 简化设计、
- 冗余设计(余度)、
- 容差设计、
- 热设计(10°C准则)、
- 可靠性分配
- 可靠性预计
- 可靠性增长
- 元器件的选用和应用控制
(元器件的故障模式、影响及危害度分析)

50



降额设计

二、可靠性设计的基本概念

降额设计的理论基础


电子元器件的基本失效率取决于工作应力(包括工作电压、反向电压、电流、功率、温度、振动、冲击、频率、速度、碰撞等)。除极少数低应力失效的元器件外，大部分的电子元器件均表现为工作应力越高，失效率越高的特性。

降额设计的目的

降额设计就是使元器件或设备工作时承受的工作应力适当低于元器件或设备规定的额定值，从而达到降低故障率、提高使用可靠性的目的。

电子产品和机械产品都应做适当的降额设计，因电子产品的可靠性对其电应力和温度应力敏感，故而降额设计技术对电子产品的设计则显得尤为重要，成为可靠性设计中必不可少的组成部分。

51



降额设计

二、可靠性设计的基本概念


元器件降额范围的控制

对于各类电子元器件，都有其最佳的降额范围，在此范围内工作应力的变化对其失效率有较明显的影响，在设计上也较容易实现，并且不会在设备体积、重量和成本方面付出过大的代价。过度的降额并无益处，会使元器件的特性发生变化或导致元器件数量不必要的增加或无法找到适合的元器件，反而对设备的正常工作和可靠性不利。

元器件降额的原则

- (1) 在额定参数条件下的降额
- (2) 每个单项指标都要考虑降额
- (3) 功率降额优先考虑
- (4) 感性负载重点考虑
- (5) 温度降额全面考虑(容易被忽略的是环境温度的影响)

52




降额设计

二、可靠性设计的基本概念

降额幅度可分为一、二、三级降额

1. 一级降额（实际承受应力）： $(\text{器件额定应力}) < 50\%$ 的降额）在技术设计上最容易实现，降额的效果也最好，但存在成本过高的问题；
2. 二级降额（70%左右的降额）在技术设计上也比较容易实现，降额的效果也很好，并且成本适中；
3. 三级降额在技术实现上要仔细推敲，必要时要通过系统设计采取一些补偿措施，才能保证降额效果的实现，所以说有一定难度，但三级降额的成本最低。

53



降额设计


二、可靠性设计的基本概念

元器件降额系数

不同的元器件降额标准亦不同，实践表明，大部分电子元器件的基本失效率取决于电应力和温度，因而降额也主要是控制这两种应力。

a2
降额系数

54




降额设计

二、可靠性设计的基本概念

集成电路的降额

大规模集成电路实际上是一个完成独立功能的小系统，为保证其正常工作，其内部参数通常允许工作范围很小，因此应着重于通过改进散热条件以降低器件的结温，使之低于相对应工艺器件的建议值，同时在功能允许的条件下，努力减少电路的输出负荷，降低其工作频率以减少功耗。

55



简化设计

二、可靠性设计的基本概念

简化设计的目的

简化设计就是在保证产品性能要求的前提下，尽可能使产品设计简单化。简化设计可以有效的提高产品的固有可靠性和基本可靠性。

简化设计提高固有可靠性的理论基础

$$R(t) + F(t) = 1$$


以上公式可看出可靠度是小于1的，由多组件 (R_1 、 R_2 、..... R_n) 构成的串联系统的可靠性为：

$$R_{\text{系统}}(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times \dots \times R_n(t)$$

从以上系统可靠度计算公式可以看出整个串联系统的可靠度是所有元器件或组件可靠度的乘积，当使用的元器件越多，系统的可靠度就越低，因此设计产品时应该尽量简化电路。

a3
简化计算

56



简化设计

二、可靠性设计的基本概念


简化设计的要求

为了实现简化设计，可采取以下措施：

- ① 尽可能采用模块化设计
- ② 尽可能实现零、部、组件的标准化、系列化与通用化。尽可能减少标准件的规格、品种数。
- ③ 尽可能采用经过考验的可靠性有保证的零、部、组件以至整机；
- ④ 尽可能减少产品组成部分的数量及其相互间的联接。

a4
简化例子

57



冗余设计

二、可靠性设计的基本概念


冗余设计的目的

冗余设计是系统或设备获得高可靠性、高安全性和高生存能力的设计方法之一。特别是当元器件或零部件质量与可靠性水平比较低，采用一般设计已经无法满足设备的可靠性要求时，冗余技术就具有重要的应用价值。

冗余设计（也称贮备设计）方式通常有冷备份、热备份、任务分担互助备份、表决备份等，究竟如何选择？一般在系统设计阶段根据组件在系统中的任务重要性、实现冗余的复杂度和难度、允许的维护方式和维修策略、成本等方面统筹分析，来选择采用合适的冗余方式。

冗余技术不能用来解决设备超负荷之类的问题。

58



冗余设计

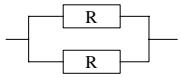
二、可靠性设计的基本概念

并联贮备


由功能相同的n个工作单元并联构成。即使有n-1个单元出现故障，只要有一个单元工作正常，系统仍可正常工作。当单元可靠度R为0.5左右时效果很好，当可靠度R很小 (R<0.1) 或很大 (R>0.8) 时可靠度效果不明显。

并联贮备两相同单元的可靠度公式和失效率公式

$$R_s = 2R - R^2; \quad \lambda_s = 2/3 \times \lambda$$



59



冗余设计

二、可靠性设计的基本概念

表决贮备

是将多个并联的工作单元的信息输入表决器，由表决器判定是否达到正常工作的单元数，由于并联的单元数多于系统要求正常工作的单元数，因而具备贮备效果，例如三个工作单元中只要两个工作正常系统就能正常工作。简称三中取二系统。表决贮备仅当单元可靠度R>0.5时，效果才明显，单元可靠度R低于0.5时，不如单个单元可靠。

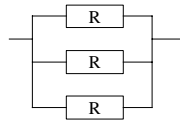
表决贮备系统可靠度公式： $R_s = 3R^2 - 2R^3$

数学表达式：

$$R_s(t) = \sum_{i=1}^{n-1} C_n^i R(t)^{n-i} \times (1 - R_i(t))^i$$

$$C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

a5
并联
数据



60



二、可靠性设计的基本概念

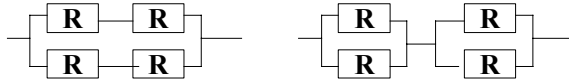
串、并组合贮备

左图为串并联贮备；右图为并串联贮备。串、并组合贮备的连接方式和系统可靠度随单元可靠度R的不同取值而变化，只有当单元可靠度足够高时才有意义，否则不如单个单元的可靠度高。

串并方式对单元可靠度的要求为 $R > 0.62$ ；

并串方式对单元可靠度的要求为 $R > 0.38$ ；

从两种组合的对比来看，并串方式的贮备效果要优于串并方式。



61



二、可靠性设计的基本概念

冷贮备

冷贮备也称非工作贮备，冷贮备系统是在工作单元发生故障时，由检测装置探测并控制处于良好状态的后备单元投入工作，理论上冷贮备的可靠度是 $R_s = R_1 + R_2$ ，远高于并联贮备，事实上如果检测装置的可靠度不高，还不如使用并联贮备。

冷贮备在多数情况下与并联贮备共同使用，会使系统或单元的可靠度成倍提高，因此对冷贮备的使用要高于其他几种方式。

不间断电源（UPS）就是冷贮备的例子

62



二、可靠性设计的基本概念

容差设计采用的方法：

1. 敏感度分析与极差综合法
2. 标准差综合法
3. 蒙特卡罗法和最优化设计

63



二、可靠性设计的基本概念

例：已知电感 $L=50\mu\text{H}$ 、极差 $\eta_L = \pm 10\%$ ，电容 $C = 20\text{pF}$ ，极差 $\eta_C = \pm 5\%$ ，求LC振荡回路频率极差综合的结果，若允许频率偏离量 $\pm 200\text{KHz}$ ，上述元件的极差是否满足要求？

解：振荡频率 $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$

$$\begin{aligned} \text{代入：} f &= 1/2 \times 3.14 \sqrt{50 \times 10^{-6} \times 30 \times 10^{-12}} \\ &= 4.11\text{MHz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{频率的百分极差 } \eta_f &= \Delta f / f = 200\text{KHz} / 4110\text{KHz} \\ &= \pm 4.9\% \end{aligned}$$

$$\text{综合极差 } \eta_F = 1/2 \times (10\% + 5\%) = 7.5\% > 4.9\%$$

结论：从计算结果看上述元件的极差不满足要求

64



二、可靠性设计的基本概念

电气兼容性是指设备内部组件之间以及设备与设备之间有相互连接关系的信号的电气特性，如信号的电平阈值误差、信号脉冲的宽度、信号脉冲的上升沿和下降沿的陡度及过冲与下冲、信号的延时和抖动、模拟信号的失真度、光收发器件的发送功率和接受灵敏度及误码率、无线发射信号的功率及无线接收设备的接收灵敏度等，在一定的误差范围内能够“互相容忍”，保证功能的正常实现。建议对以下几方面给予关注：

65



二、可靠性设计的基本概念

各功能单板对电源的电压波动范围、纹波、噪声、负载调整率等方面的要求予以明确，二次电源经传输到达功能单板时要满足上述要求。

选用专用器件时要检查其电气性能指标是否符合相关标准的要求。

对高速、高频电路，信号之间的串扰问题。

在研发阶段的调试、电源拉偏试验、高低温试验中，要注意检查信号经传输后到达“对方”该信号的接收端时是否符合“对方”设备对输入信号的各方面电气指标要求，即信号经过传输后电气性能发生的变化是否在“对方”设备接受信号的容差范围内，以排除影响电气性能长期稳定性的不良因素。

有条件时进行时钟拉偏、抖动注入等试验，验证设备的容差能力。

66



二、可靠性设计的基本概念

热设计的目的

热设计就是要减少热量产生、降低热阻、提高电性能稳定性和可靠性、延长寿命。热设计的重点是通过器件的选择、电路设计(包括容差与漂移设计和降额设计等)及结构设计(主要是加快散热)来减少温度变化对产品性能的影响，使产品能在较宽的温度范围内可靠地工作。

热设计的理论基础

制造电子元器件时所使用的材料有一定的温度极限，当超过这个极限时，物理性能就会发生变化。

温度升高对材料性能的影响导致电性能参数的变化，如耐压值、漏电流、放大倍数、允许功率等均是温度的函数。故障率随温度的增加而指数地上升，温度的上升对大部分元器件的失效机理具有加速的作用。

a8
故障率图

67



二、可靠性设计的基本概念

热设计的理论基础(续)

化学反应速率与温度的关系由阿洛尼斯(Arrhenius)总结的公式如下：

$$dM/dt = A \exp(-E/kT)$$

其中： dM/dt 为化学反应速率；

k 为玻耳兹曼($k=0.8617 \times 10^{-4} \text{eV/K}$)；

E 为引起退化或失效的激活能；

T 为热力学温度；

A 为常数。

68



二、可靠性设计的基本概念

温度对元器件的影响

温度对半导体器件的影响最为敏感，由于温度会对半导体材料的物理性能产生变化，因此所有的半导体器件使用温度（壳温）不要大于60℃。

对于金-铝界面高温（150℃）时会产生“紫斑”或空洞，导致接触面接触电阻增大或开裂。

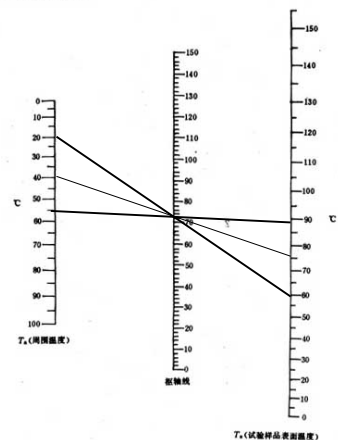
在高温大电流密度条件下容易出现电迁移现象，使得芯片内的铝线开路。会导致集成电路的失效。



五、环境试验内容

环境温度校正计算图

当环境温度20℃时样品表面温度为60℃；环境温度55℃时样品表面温度是多少？



温度对元器件的影响

温度对电容器的影响主要是每升高10℃，使用时间就要下降一半，绝缘材料的性能也下降。

温度的升高会导致电阻器的使用功率下降。

如碳膜电阻，当环境温度为40℃时，允许的使用功率为标称值的100%；环境温度增到100℃时，允许使用功率仅为标称值20%。

又如RJ-0.125W金属膜电阻，环境温度为70℃时，允许使用功率仅为标称值的20%。

温度的变化对阻值大小有一定的影响，温度每升高或降低10℃，电阻值大约要变化1%。



二、可靠性设计的基本概念

热设计的主要内容

- ① 元器件的热设计。主要是减小元器件的发热量，合理地散发元器件的热量，避免热量蓄积和过热，降低元器件的温升，是设计考虑的一项主要指标。
- ② 印制板的热设计。有效地把印制板上的热引导到外部。减少热阻，是结构设计的目的之一
- ③ 机箱的热设计。保证设备承受外部各种环境、机械应力的前提下，充分保证对流换热、传导、辐射，最大限度地地把设备产生的热散发出去。



二、可靠性设计的基本概念

热量的传递

只要存在温差就有热量的传递。热量的传递有三种基本方式：传热、对流和辐射。它们可以单独出现，也可能两种或三种形式同时出现。

热量传递的两个基本规律：热量从高温区流向低温区；高温区发出的热量等于低温区吸收的热量。

传热的基本公式

$$\Phi = KA\Delta t$$

式中： Φ 热流量，W；
 K 总传热系数，W/(m²·°C)；
 A 传热面积，m²；
 Δt 热流体与冷流体之间的温差，°C

73



二、可靠性设计的基本概念

对流的基本公式

$$\Phi = hcA(t_w - t_s)$$

式中： hc 对流换热系数，W/(m²·°C)；
 A 对流换热面积，m²；
 t_w 热表面温度，°C；
 t_s 冷却流体温度，°C。

辐射的基本公式

$$\Phi = \varepsilon A \sigma_0 T^4$$

式中： ε 物体的黑度；
 σ_0 斯蒂芬-玻尔兹曼常数 (5.67×10⁻⁸/m²·K⁴)
 A 辐射表面积，m²；
 T^4 物体表面的热力学温度，K。

74



二、可靠性设计的基本概念

热设计需考虑的问题

系统热设计应与电路和结构设计同步进行

尽量减少电路发热量

减少发热元件的数量

选择耐热性和热稳定性好的元器件

在结构设计时应合理地选择冷却方法

进行传热通道的最佳设计

尽量减少热阻，热阻是热量传递路径上的阻力

公式为： $\Phi = \Delta t/Rt$

式中： Rt ——整个传热面积上的热阻 ($R = 1/KA$)，°C/W。

75



热设计的工具



Fluke Ti20

主要特点： 低价位，高性能
 测温范围： -10~350°C (-14 ~ 662°F)
 测温精度： ±2°C 或 2% (取较大值)
 重复精度： ±1% 或 ±1°C (±2°F) 取较大者
 视场(FOV)： 20° 水平，15° 垂直
 工作电源： 可充电电池或 AA 型电池

红外探头：10×120InSb
 频谱响应：1.5~5.5 μm
 测温范围：25~550°C
 温度灵敏度：0.1°C 温度测量重复性：
 0.1°C
 最大帧频：50Hz
 主要作用：模块、元
 器件热分布热结构分
 析热设计验证



76

可靠性预计

二、可靠性设计的基本概念

可靠性预计的目的

根据设计方案、设计选用的元器件、电路和组装工艺以及产品的使用环境预估产品在未来工作可靠性的过程，审查设计任务书的可靠性指标是否满足所要求的指标，给可靠性分配提供基础。

在可靠性预计过程中两个阶段的目的

方案阶段

明确每个研制和设计所确定的工程内容对产品可靠性的影响，根据预计结果选择最优方案

设计阶段

对元器件种类、使用负荷及环境条件确定元器件的应用失效率，进而预计线路的累计失效率最终计算出产品设计的可靠性预计值

可靠性预计

二、可靠性设计的基本概念

可靠性预计的方法

失效率累加法、相似设备法、相似电路法、失效率累加法

可应用于方案论证和初步设计阶段，方法是以元器件的可靠性数据来预测系统的可靠性。

元器件的失效率数据可查GJB299B和MIL-HDBK-217

可靠性预计

二、可靠性设计的基本概念

例：某产品的元器件数量、质量系数、失效率如下表，求MTBF及工作500小时的可靠度。

元器件类型	数量	通用失效率 / ($\times 10^{-6}$ /小时)	质量系数	总失效率 / ($\times 10^{-6}$ /小时)
单片双极电路	20	0.85	1.00	17.00
硅NPN晶体管	120	1.10	0.40	52.80
通用硅二极管	340	0.27	1.00	91.80
碳膜电阻	420	0.12	0.60	30.24
绕线电位器	80	1.84	0.50	73.60
云母电容	170	0.09	1.00	15.30
电感器	60	0.29	0.70	12.18
连接器	60	0.20	0.80	9.60
开关	4	1.48	1.00	5.92
总和				308.44

可靠性预计

二、可靠性设计的基本概念

解1：MTBF与失效率的关系式为：

$$MTBF = 1 / \lambda$$

代入：MTBF = $10^6 / 308.44 = 3242h$

解2：工作500小时的可靠度，公式为：

$$R(t) = e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t$$

代入：R(500) = $1 - 500 / 3242 = 0.857$

失效率累加法是目前采用最多的预计方法。



可靠性
预
计

二、可靠性设计的基本概念

相似设备法

以以往相似设备的可靠性水平来预计方案的失效率和MTBF。

$$\lambda_{sn} = N_n / N_o \times \lambda_{s0}$$

$$M_n = N_o / N_n \times M_o$$

符号： λ_{sn} ：设计方案的失效率预计值

N_n ：设计方案的（估计）有源器件数

M_n ：设计方案的MTBF预计值

λ_{s0} ：相似设备的失效率预计值

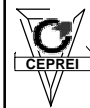
N_o ：相似设备的（估计）有源器件数

M_o ：相似设备的MTBF预计值

相似设备法收集与统计内容：

设备总台数n、故障记录及故障总数r、每台次故障前工作时间 $t_i (i=1, 2, \dots)$ 、有源器件数。

81



可靠性
预
计

二、可靠性设计的基本概念

相似设备法的例子

名称	有源器件数	老产品的MTBF	老产品失效率	新产品的有源器件数	预计的失效率
直流电源	100	11255	8.885E-05	80	7.108E-05
功率放大器	60	8700	0.0001149	60	0.0001149
CRT显示器	300	30000	3.333E-05	150	1.667E-05
工控计算机	120	8000	0.000125	100	0.0001042
驱动控制系统的MTBF	600	20000	0.00005	300	0.000025
			2426		3013

82



可靠性
预
计

二、可靠性设计的基本概念

相似电路法

是利用已知电路的可靠性推断设计方案的步骤：

1、确定典型电路的种类和各自的数量，例：有k种典型电路，每种电路的数量为： n_1, n_2, \dots, n_k

2、确定各典型电路的现场失效率的数值： $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$

3、累加方案所得的失效率，公式为： $\lambda_s =$

4、方案的MTBF的预计值为 λ_s 的倒数

这种方法的实施，需要有按电路种类统计的现场失效率数据或试验数据

83



可靠性
预
计

二、可靠性设计的基本概念

相似电路法的例子

名称	台数	老产品的单台MTBF	老产品失效率	预计的单台MTBF	预计的失效率	说明
直流电源	4	11255	0.0003554	19000	0.0002105	新研制
功率放大器	3	8700	0.0003448	22000	0.0001364	新研制
CRT显示器	4	30000	0.0001333	30000	0.0001333	选用老产品
工控计算机	4	8000	0.0005	8000	0.0005	选用老产品
驱动控制	5	20000	0.00025	20000	0.00025	选用老产品
系统的MTBF			631		813	

84



二、可靠性设计的基本概念

设计阶段的可靠性预计

与方案阶段的可靠性预计不同，设计阶段的可靠性预计是根据设计选取的元器件种类、使用负荷及环境条件，确定元器件的应用失效率，进而预计出线路的累计失效率，最后计算出产品设计的可靠性预计值。步骤为

- 1、元器件使用的电应力和环境应力来预计各元器件的应用失效率
- 2、各部件的元器件种类和数量进行失效率累加，求出产品各部件的应用失效率数值，并计算出相应的可靠度

85



二、可靠性设计的基本概念

3、将各部件的可靠性预计值，代入设计方案的可靠性模型，运用系统可靠性计算方法求出产品设计的可靠性预计值

4、把求出的设计可靠性预计值与指标分配值进行比较，若能满足要求，预计工作结束，否则改变选用的元器件，降低环境应力或进一步降额等措施重复计算，直到满意。

86



可靠性预计常用的标准

GJB299B - 1998 电子设备可靠性预计手册

GJB813 - 90 可靠性模型的建立和可靠性预计

GJB/Z 108 - 98 电子设备非工作状态可靠性预计手册

MIL - HDBK - 217

87



二、可靠性设计的基本概念

可靠性分配的问题

可靠性分配就是将整机或系统的可靠性指标合理的分配给组件或子系统，以明确各部件的可靠性设计的指标。前提是系统失效是满足指数规律的。在分配时需要考虑

- 1、子系统的复杂程度
- 2、子系统重要程度的差别
- 3、子系统运行环境的差别
- 4、子系统任务时间的差别
- 5、子系统研制周期的差别

88



二、可靠性设计的基本概念

分配时可以采用等分配法，可靠度平均分给每个组件，方法最为简单。

考虑装置复杂度的分配方式可用以下公式：

$$MTBF: m_i = NW_i t_i / n_i (-\ln R_s)$$

$$\text{失效率: } \lambda = 1/m_i$$

W_i = 由第*i*个装置引起系统的故障数 / 第*i*个装置故障总数
 N —— 组件或装置总数
 n_i —— 装置的单元数

这种分配方式关键是求 W_i ，如没有确切的统计数值可以用经验评分法： $W_i = d_i / c$

d_i : 对某装置的经验得分数， $d_i \leq c$

c : 总分值，评分方案一定时，为常数



二、可靠性设计的基本概念

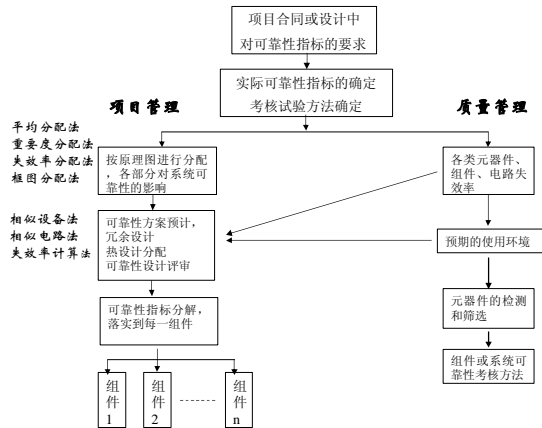
装置复杂度的分配方式

一个简单的例子

组件编号 <i>i</i>	装置单元数 n_i	重要度 W_i	任务时间 t_i	MTBF m_i	可靠度 R_i	计算公式	
1	20	0.7	4	398	0.990	$m_i = NW_i t_i / n_i (-\ln R_s)$ $R_i = e^{-t_i/m}$	
2	30	0.5	4	198	0.979		
3	200	0.8	4	45	0.911		
4	50	0.2	4	45	0.911		
N=300		当 $R_s=0.9$ 时， $-\ln R_s=0.1054$					



二、可靠性设计的基本概念



第二章 可靠性试验的分类 (1)

一般性的可靠性增长

事前没有明确的可靠性增长目标，不跟踪增长过程，采用集中改进故障的方式，不满足增长模型。

可靠性增长试验

试验时间为MTBF的5~25倍

试验、分析与纠正试验 (test analyse, and fix test)

是增长试验的核心部分



二、可靠性设计的基本概念

• 可靠性增长试验的目的

在研制过程中模拟实际的使用条件或加速条件进行试验，使产品存在的设计（包括电路设计、结构设计和工艺设计）缺陷，变为故障而充分暴露，并对故障进行分析、采取纠正措施，降低故障率到可以接受的值，使产品的固有可靠性得到增长。

• 可靠性增长试验的特点和方法

- a. 针对产品的薄弱环节进行
- b. 改进后产品原来的薄弱环节不重现或出现率低于允许的水平
- c. 验证条件与原故障发生的条件一致或更严酷
- d. 应用于部件、分机、设备

93



第二章 可靠性试验的分类 (1)

可靠性增长试验和验证试验

增长试验中产品的结构处于不断变化中，产品的可靠性也在不断变动，每次变动或最终都单独安排验证试验的费用和时间都不允许。

增长试验和增长模型的相配合，在增长试验结束后才能评估产品达到的可靠性水平。

增长模型是一个数学模型有许多种可选择，如果正确选择模型，可以在增长试验的过程中了解可靠性增长的规律。

94



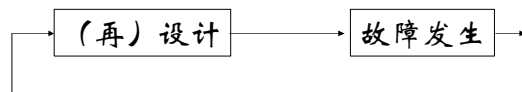
第二章 可靠性试验的分类 (1)

• 可靠性增长试验模型

可靠性增长应有增长目标值，必须要有可靠性增长模型。典型的可靠性增长模型有Duane模型和Amsaa模型。在试验终点时应该达到或超过规定的可靠性指标

• 可靠性增长试验的过程

通过试验逐步改正产品设计和制造中的缺陷，不断提高产品可靠性的过程。



95



第二章 可靠性试验的分类 (1)

可靠性增长试验的条件

可以应用可靠性试验的条件，也可以应用其他的试验条件如工程设计试验、性能试验、环境试验、安全试验。

可靠性增长试验的难点

- a. 时间和费用
- b. 故障信息的确实性
- c. 故障机理的检测、分析和改进
- d. 增长模型的选择

96



二、可靠性设计的基本概念

降额、简化、冗余、容差、热设计
可靠性预计
可靠性分配
可靠性增长

电子产品可靠性设计的重点

- 1、热设计和降额
- 2、简化设计
- 3、设计过程的验证试验



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 电阻器的种类

1、碳膜电阻器（结晶碳沉积）

成本低、性能稳定、阻值范围宽、温度系数和电压系数低，是目前应用最广泛的电阻器。



2、金属膜电阻器（合金材料真空蒸镀）

比碳膜电阻的精度高，稳定性好，噪声低、温度系数小。在仪器仪表及通讯设备中大量采用。

3、金属氧化膜电阻器（沉积一层金属氧化物）

由于其电阻体本身即是氧化物，所以高温下稳定，耐热冲击，负载能力强。

4、金属玻璃釉电阻器（金属粉和玻璃釉粉混合后印刷在基板上）

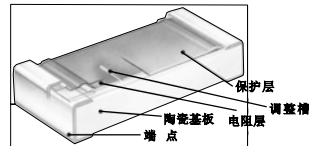
耐潮湿，高温，温度系数小，主要应用于厚膜电路



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

5、贴片电阻SMT

片状电阻是金属玻璃釉电阻的一种形式，他的电阻体是高可靠的钎系列玻璃釉材料经过高温烧结而成，电极采用银钯合金浆料。高频性能好。



6、绕线电阻器

用高阻合金线绕在绝缘骨架上制成，外面涂有耐热的釉绝缘层或绝缘漆。

绕线电阻具有较低的温度系数，阻值精度高，稳定性好，耐热耐腐蚀，主要做精密大功率电阻使用，缺点是高频性能差，时间常数大。



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析


2、电位器

电位器是一种机电元件，他靠电刷在电阻体上的滑动，取得与电刷位移成一定关系的输出电阻。

3、特殊电阻

压敏、湿敏、光敏、气敏、力敏电阻

特殊电阻主要由陶瓷或半导体等工艺制造，失效机理与电阻器和电位器有所不同，且用途是有特定条件的。




电阻器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析


电阻器在使用中的失效现象

机械损伤: 多发生在陶瓷胎体部分。
接触损坏: 两电极端头接触问题
开路失效: 以上的损伤会以阻值增大或开路的模式出现; 此外功率选择太小和超出使用电压要求也会引起开路失效; 开路失效中湿度的影响最大。
参数漂移失效: 材料气体的吸附和去气, 温度、湿度的变化引起的电解、氧化。

电阻器失效的85~90%是属于致命性失效, 失效模式主要表现为开路; 只有10%左右是阻值漂移, 短路的失效模式在电阻器中很少见到。



a13
电阻失效
101




电阻器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

电阻器在使用中的常见失效

电阻器分类	失效模式	失效原因
金属膜电阻器	开路	a、瓷芯基体破裂; b、电阻膜破裂; c、电阻膜分解; d、引线断裂; e、接触不良; f、使用不当
	短路	a、电晕放电; b、银迁移
	阻值的异常漂移和超差	a、电阻膜的厚度不均匀、有斑点; b、电阻膜层的刻槽间有导电粘污物; c、膜层与帽盖的接触不良
碳膜电阻器	开路	同金属膜电阻器
	阻值的异常漂移和超差	a~c项 同金属膜电阻器 d、膜层螺旋槽刻不当
	外观不合格	a、标志质量差; b、外表涂层劣
线绕电阻器	开路	a、绕组断线; b、电流腐蚀; c、引线接合不牢固 d、焊点接触不良
	电参数超差	a、线材绝缘不好老化不充分

102




电阻器


三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

电阻器使用规则 (一)

- 1、使用过程的机械冲击力
- 2、贴片电阻的耐焊接热时间要严格控制
- 3、弯折引脚时不能从引线根部直接弯折, 需留有2~3mm的距离。
- 4、功率选取一般在额定功率的1/4左右使用。
- 5、抗浪涌电压能力小于150V (1/8W)
- 6、小型贴片电阻慎用在高电压的部位 (爬电距离)



103



电阻器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

电阻器使用规则 (二)

7、耐电压能力

a、连续电压能力

$$U_R = \sqrt{P_R R}$$

式中: U_R —额定电压 (直流或交流有效值), V;
 P_R —额定功耗, W;
 R —标称阻值, Ω 。

任何情况下, 额定电压都不得超过电阻器的极限电压。

b、极限电压 (瞬间电压能力)

该电压一般由生产厂根据使用的电阻材料的电流密度, 以及刻槽宽度确定。

104

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

电阻器使用规则 (三)

8、对于小型电阻器、低阻电阻器，使用电流不应该超过样品的额定电流，额定电流的计算公式为

$$I_n = \sqrt{P_R/R}$$

9、当环境温度比额定值高时，为了使电阻器发热温度不致超过最高容许温度，允许负荷的功率必须比额定功率低，可按下式计算：

$$P = P_n (t_{max}-t_0) / (t_{max}-t_n);$$

P_n : 额定功率 t_n : 额定环境温度
 t_{max} : 最高环境温度 t_0 : 高于额定环境温度的温度

105

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

电位器的使用 and 选择

电位器是机电一体化的产品，磨损失效是电位器的主要失效模式。

选用方式为：导电塑料电位器、金属膜电位器、金属玻璃釉电位器、有机实心电位器、合成碳膜电位器，排列在后的价格相应的低。

绕线电位器

绕线电位器是将康铜丝或镍铬合金丝作为电阻体，并把它绕在绝缘骨架上制成。绕线电位器特点是接触电阻小，精度高，温度系数小，其缺点是分辨力差，阻值偏低，高频特性差。主要用作分压器、变阻器、仪器中调零和工作点等。

a14
电位器
失效

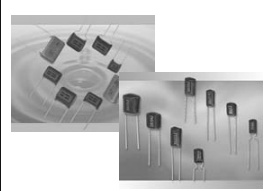
106

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

电容器的种类

高频磁介电容
 铝电解电容
 钽电解电容
 薄膜电容
 片状电容 (表贴电容)

钽电解	CA	复合介质	CH
铌电解	CO	漆膜介质	CQ
铝电解	CD	云母	CY
其它电解	CE	合金电解	CG
高频瓷介	CC	纸介	CZ
低频瓷介	CT	聚苯乙烯	CB
涤纶	CL	聚丙烯	CBB
玻璃膜	CO	聚四氟乙烯	CBF
玻璃釉	CI	聚碳酸酯	CLS
金属化纸介	CJ		



107

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

磁介电容器的失效现象和使用注意

开路、短路、

磁片开裂

磁介电容器的使用注意事项

跌落的影响

引线脚的应力影响

裂纹和水汽的影响

a15
磁片电容

108



铝电解电容器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 铝电解电容器的失效现象

击穿、短路、容量下降、漏液、爆炸、起火

详细请参照EIAJ RCR-2367电子设备用固定非固体铝电解电容器使用的注意事项说明指导书。

保存超过了3年的电容器，需经过电压处理之后使用。

电容器要定期检修，检修项目如下：

- 1) 外观：压力阀的状态等
- 2) 电气性能：容量、损耗、漏电等



铝电解电容器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 铝电解电容器的使用注意事项（一）

1、额定电压

电容具有极性，不要加载反向电压或交流电压（即使是使用两级性电容器，也不能使用交流电）。

2、纹波电压

有过量纹波电流流过电容器会引起异常高热，有时会导致短路或起火等致命故障。

3、温度的影响

低温下电容器的频率特性会变差，当电解液低温下冻结时，会导致电容器失效。

4、腐蚀的影响

进行全面涂膜时，涂膜剂会把助焊剂或者清洗剂等的残留卤化物封住，产生腐蚀现象。



铝电解电容器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 铝电解电容器的使用注意事项（二）

5、容许过电压

包括电源电压在内，容许的连续最高电压需要控制在电容器额定电压的111%这一范围之内。

6、容许过电流

根据电路的高频电压以及过电压等因素，经过电容的过电流容许值要严守以下公式计算出的数值。

$$\text{最大容许过电流} = (2\pi \times \text{额定频率} \times \text{额定静电电容} \times 10^{-6}) \times 1.3$$

7、最大容许VA

最大容许VA务必遵照按下列公式计算所得的数值。

$$\text{最大容许VA} = (2\pi \times \text{额定频率} \times \text{额定静电电容} \times (\text{额定电压})^2 \times 10^{-6}) \times 1.35$$



铝电解电容器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 铝电解电容器的使用注意事项（三）

8、工作频率

电子设备用电容器，是为商用频率（50Hz或60Hz）电压开发设计的。在高频情况下容量下降。

铝电解电容器容量频率特性测试数据 (μF)

型号规格	100Hz	1KHz	3KHz	5KHz	10KHz	15KHz	20KHz	30KHz	40KHz
450V 470 μF	428.6	335.2	138.6	64.1	15.4	3.51	-0.76	-3.88	-4.84
450V 82 μF	74.3	67.5	45.5	28.8	11.1	5.72	3.49	1.66	0.97
63V 2200 μF	2244	1875	763.9	380.2	-94.2	-101.5			
75V 12000 μF	10866	1189	186	-16.3	-129.4				

a16
铝电解
失效

注：电容量为负值，表示在该频率下电容器呈感性。



铝电解电容器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析
铝电解电容器的使用注意事项(四)

9、漏电流故障判断

铝电解漏电流的影响，如果漏电流增大，会影响周边的电路并导致电路工作不正常。

- a、重复的开机正常，工作一段时间工作不正常，通常是由于电解电容的使用温度升高导致漏电增大。
- b、开机不正常，数分钟后工作正常，通常是用在耦合电路中的铝电解漏电。

10、特殊设计

- a、反复急剧充放电，需用多引板铝电解电容器。
- b、设计时严禁电容短路放电，至少要有10~100Ω的放电阻。

113



铝电解电容器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析
铝电解电容器的寿命推算

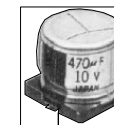
出厂时的指标是主要的寿命依据，例如铝电解电容的出厂指标为：105℃使用1000小时。根据10℃2倍规则可求出在55℃使用的寿命为：

$$1000 \text{小时} \times 2^5 = 32000 \text{小时}$$

然而考虑到使用的环境温度和纹波电流时，寿命公式应为：

$$L = L_d \times 2^{(T_0 - T) / 10} \times K^{-\Delta T / 10}$$

- L_d: 直流工作电压下的使用寿命 (K=2, 纹波电流允许的范围内)
- (K=4, 超过纹波电流范围时)
- T₀: 最高使用温度
- T: 工作温度
- ΔT: 中心温升

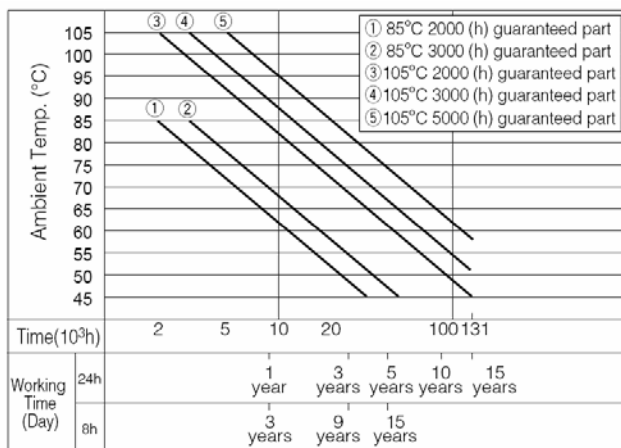


114



铝电解电容器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析
铝电解电容器的寿命推算



115



钽固体电解电容器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析
钽固体电解电容器的特点

- 1、失效现象基本为短路。
- 2、极性反接时，不会马上产生故障。
- 3、钽电容故障大部分出现在使用初期。
- 4、使用电压越高故障率越高。
- 5、不合适应用在滤波电路中，如果必须使用在滤波电路中有条件限制。
- 6、可靠性程度取决于出厂前筛选工序的实施。

116

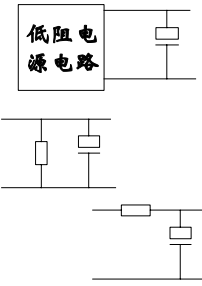
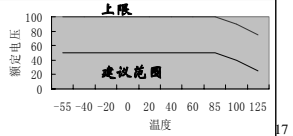
三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

1. 使用电压

a. 尽可能减小电压，一般来说使用额定电压的50%的电压量即可。尤其是在使用低阻抗电路时，最好使用额定电压的30%的电压。

b. 如果电路出现瞬间电流，如电器开关或充电器等，应将电阻列放，电流限制在300mA以下，或串联电阻按3Ω/V的要求限制电流。

c. 在摄氏85度的环境下使用，建议在图中所示的数值范围内使用

CEPREI

铝
固
体
电
解
电
容
器

a18
铝电容
失效

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

2. 纹波电流

如果通过铝电容器的纹波电流或电压过量，其中的焦耳热可能引起电容本体的温度上升；会引起银离子向阳极迁移和沉积，因此最大容许电流 I_{MAX} (Arms)，可以通过下列公式算出

$$I_{MAX} = \sqrt{P_{MAX} / ESR(D)}$$

P_{MAX} : 电容器的容许功率损耗数值(W)，根据周围的温度以及本体尺寸而有所不同。按下表所示计算。

基于本体尺寸的容许功率损耗数值 (P_{MAX})

外型	P_{MAX} (W)						
	P	UA. A	UB. B	UC. C	D	E	F
周围温度							
25 °C	0.015	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05
55 °C	0.01	0.019	0.019	0.019	0.032	0.032	0.032
85 °C	0.005	0.01	0.01	0.01	0.018	0.018	0.018

CEPREI

铝
固
体
电
解
电
容
器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

2. 纹波电流 (续)

ESR(D): 电容器的等价阻抗 (Ω)，需要注意的是ESR(D)会因纹波电流频率而产生变化，因此需要根据使用的频率作出修正。

$$ESR(D) = k * ESR(120)$$

K: 使用频率数的系数

$$ESR(120) = \tan \delta / 2 \pi f C$$

ESR(120): 120Hz的等价阻抗 (Ω)

f : 使用频率(Hz)

C : 120Hz的容量 (μF)

频率f	K
120	1
400	0.8
1k	0.65
10k	0.5
20k	0.45
40k	0.43
100k	0.4
1M	0.35

CEPREI

铝
固
体
电
解
电
容
器

119

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

3. 纹波电压

a. 直流电压和纹波电流电压的先头数值之和不能超过额定电压。

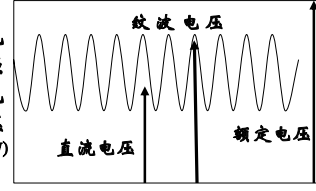
b. 注意不要使重叠电压的变动而引起的反向电压加载至电容器。

c. 容许纹波电压因额定电压而不同

d. 需要注意的是，当在高温环境下使用时，需按照下列公式计算出容许纹波电压

$$V_{rms}(at 55^{\circ}C) = 0.8 \times V_{rms}(at 25^{\circ}C)$$

$$V_{rms}(at 85^{\circ}C) = 0.6 \times V_{rms}(at 25^{\circ}C)$$

$$V_{rms}(at 125^{\circ}C) = 0.4 \times V_{rms}(at 25^{\circ}C)$$


CEPREI

铝
固
体
电
解
电
容
器

120



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

4、失效率的计算公式

钽固体电解电容的基础失效率，是指在85℃下额定电压加载1000小时时的失效率。

品种	区分	基础失效率
TMCP型	超小型产品 (2102)	1%/1000h
TMCU型	薄型产品	
TMCM型	小型产品	
TMCS型	标准产品	
TMCTX型	内置安全保险装置产品	
TMCH型	高可靠性产品 (电装品)	0.5%/1000h
TSMS型	密封型标准产品	0.5%/1000h
TSU型	密封型大容量产品	1%/1000h

121



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

4、失效率的计算公式

$$\lambda_{use} = \lambda_{85} \times K_d \times K_R$$

λ_{use} : 使用状态下的推定失效率

λ_{85} : 基础失效率见前表

K_d : 基于周围温度以及降低额定值损耗比的失效率修正系数 K 求出

K_R : 基于电路阻抗的失效率修正系数

K_d 的数值通过图1所示计算，其中的失效率修正系数： K (降低额定值损耗比) = 使用电压/额定电压

K_R 的数值通过图2所示计算

122



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

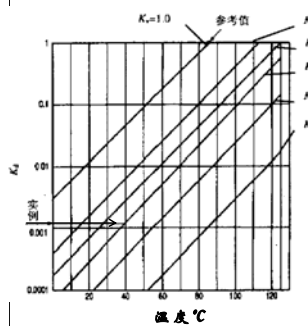


图1基于周围温度以及降低额定值损耗比的失效率修正系数 (K_d)

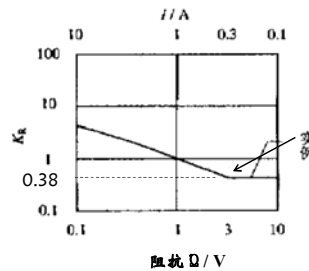


图2基于电路阻抗的失效率修正系数 (K_R)

123



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

型号: TMCM型; 额定: 10V10 μ F(B型)
工作温度: 40℃; 电路阻抗: 3 Ω /V

$$K = \text{使用电压} / \text{额定电压} = 3V / 10V = 0.3$$

λ_{85} : 根据表3 得出 1%/1000h

K_d : 根据图1 得出 0.0012

K_R : 根据图2 得出 0.38

$$\lambda_{use} = \lambda_{85} \times K_d \times K_R$$

$$= 1\% / 1000h \times 0.0012 \times 0.38$$

$$= 1 \times 10^{-5} \times 0.0012 \times 0.38$$

$$= 4.56 \times 10^{-9}$$

$$= 0.000456\% / 1000h$$

$$= 4.56 \text{Fit} \quad \text{推定失效率}$$

124



钽固体电解电容器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 5、反向电压

- a、因为钽电容器的导电体具有整流特性，如果加载反向电压，即使是很低的反向电压也会导致较大的电流，引起自身发热，从而有可能引起短路现象。
- b、如果在实际安装时搞错极性，电路阻抗升高可能会不易发生短路。但是这会降低其特性以及其可靠性，因此需要注意。
- c、如果在不得已的情况下使用反向电压电路时，数值不应超过：
25℃时：额定电压的10%或者1V；
85℃时：额定电压的5%或者0.5V；

125



电容器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 电容器的自我修复功能

许多电容器都有自动修复功能，按修复方式可以分两类：

渐进修复：铝电解、钽电容

现象是原来较大的漏电流会变小，从电路来说有些无法解释的失效，突然又好了。在设备正常工作时渐进修复方式不会对电路产生危害

快速修复：金属电极型薄膜电容

瞬间大电流可以快速修复缺陷，但是由于瞬间电流的影响所产生噪声，有可能对电路产生损害，在数字电路中会造成数据破坏，且不能恢复。这种故障一直困扰设计、维修和使用者。

126



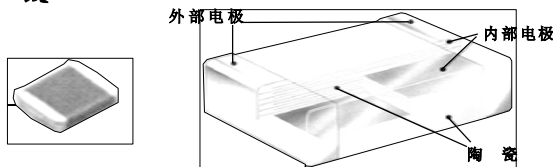
片状电容器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 片状陶瓷电容器

1.陶瓷介质体；2.内部电极；3.外部电极。

分析片状电容生产过程，可靠性差与片状电容内部存在缺陷有关，如：小气泡、小杂质、微裂纹等，其中存在微裂纹占大多数情况。

微裂纹产生的机理：从本质上讲，片状电容微裂纹来自于内电极与陶瓷介质在烧结过程中收缩不一致



a20
片状电容

127



电容器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 电容器的使用 and 选择

- 1、电容器的寿命与温度关系极大，因此控制电容器的温度是设计人员重点考虑的。
- 2、当使用电压（尤其是纹波电压）过高时容易产生热。
- 3、高频时铝电解的电容量会急剧下降，当电容在高频工作时会发热。
- 4、滤波电路应尽量采用铝电解电容，如果需要使用钽电容需注意限制冲击电流。
- 5、钽电容的使用寿命远高于铝电解，但最高电压不高，要注意浪涌电压的破坏。
- 6、设计人员对电容引脚宽度设计要合适。
- 7、铝电解有安全电容和普通电容的分别，可适当选用

128



有关的
标准

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

GJB360.1 电子及电气元件试验方法总则

GJB360.5~.35 是电子元器件元件的各种试验方法和测试方法

GJB 1862—94 有可靠性指标的精密固定电阻器总规范

GJB 1432A—99 有可靠性指标的片式膜固定电阻器总规范

GJB 972—90 有可靠性指标的塑料膜或金属化塑料膜介质直流或交直流非金属壳固定电容器总规范

GJB 1214—91 有可靠性指标的优质金属化塑料膜介质直流、交流或交直流金属壳密封的固定电容器总规范

GJB546 电子元器件可靠性质量保证大纲

GB1772 电子元器件失效率试验方法

129



继电器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

直流线圈的输入电源

直流型继电器的线圈两端所加电压建议使用线圈额定电压 $\pm 5\%$

直流线圈的反电动势

直流线圈的反电动势是使用电压的3~5倍，会引起电路工作不正常或直接损坏电路，因此在使用中必须有反电动势的释放回路。



130



继电器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

负荷的种类和冲击电流

负荷的种类和冲击电流的特性是与通断频率也有关系的，是产生触点粘连的一个大的重要因素。特别是在有冲击电流存在的负荷的情况请与稳态电流一起测定冲击电流值，并讨论与选定的继电器的余裕度。

表中显示了有代表性的负荷与冲击电流的关系。

负荷的种类	冲击电流
电阻负荷	1倍
螺线管负荷	10~20倍
电动机负荷	5~10倍
白炽灯负荷	10~15倍
水银灯负荷	约3倍
钠灯负荷	1~3倍
电容器负荷	20~40倍
变压器负荷	5~15倍
说明	冲击电流是稳态电流的倍数

131



继电器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

反向电压对使用寿命的影响

象启动DC继电器那样，通断继电器串联电路或DC电动机、DC套管、DC螺线管等的感应性负荷时必须进行二极管等的浪涌吸收以保护触点，这一点很重要。

切断这些感应负荷时，会引起数百~数千V的反向电压，使触点受到很大损害，寿命可能会明显缩短。另外，在上述负荷的电流小于1A以下的领域里，反向电压产生白热或者电弧放电的电弧，通过这个放电使空气中含有有机物分解，在触点生成黑色的异物（氧化物、碳化物），导致接触不良。

132



继电器

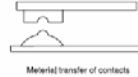
a21
触点失效
a22
继电器触点保护

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 触点移动现象

触点的移动现象是指单方的触点粘连或蒸发，向其他方向的触点移动。随着通断次数的增加产生如下图那样的凹凸，这个凹凸变为被锁定状态，正好引起触点粘连。这是由于直流的感应电压、容量负荷在电流值大的时候，或者瞬间冲击电流大（数A~数十A）的时候。触点可观察到出火花的电路经常发生。一般表现为-极凸、+极凹的形状。

为了保护触点，设计时必须考虑触点的保护电路，目前常用的保护电路有RC保护、二极管保护、可变电阻保护。

触点的移动现象



133



继电器

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 安装保护元件时的注意事项

实际安装二极管、C-R、可变电阻等保护元件的情况，必须在负荷或者触点的旁边安装。如果距离远了，就不能发挥保护元件效果的情况。作为接触器考虑在50cm以内安装。

直流负荷（火花发生）高频率通断时的异常腐蚀
例如使用直流的电子管或者套管高频率通断时，会产生青绿色的锈。这是伴随通断火花（电弧放电）引起空气中的氮和氧反应生成的，在高频率出现火花的使用电路中需要注意。

134



继电器

a24
延长寿命例子

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 继电器寿命

一般来说继电器的寿命是以通-断次数来表征的，而在实际应用中很少达到使用次数，尤其是当继电器作为保护电路时。但在频繁开关的检测电路中必须考虑次数与寿命时间的关系。

触点在大电流、高电压电路中，使用时由于触点粘连造成的失效会极大的影响使用寿命。由此可见如何保护触点是延长使用寿命的关键。

在继电器使用中，由触点引发的故障远远大于继电器线圈的故障

135



连接器、开关

a25
镀层致密度

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 氧化对连接器和开关的影响

金属接触的元件其接触触点在高温、潮湿的环境下非常容易氧化，使得接触电阻变大，影响使用。在设计人员无法控制使用环境时，元器件的选择就显得十分重要。

选择方法：

- 1、观察镀层的致密度
- 2、短期的高温 and 潮热试验后观察氧化程度
- 3、密封继电器内部的水汽含量越小越好。
- 4、注意连接器的最大允许电流和接触电阻。

136



连接器、开关

a26
损坏硬盘的例

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 压力、插拔力的影响

继电器、接插件、开关的机械接触部分都存在一个压力问题，作为固定设备正常使用时，压力的大小可能不成为问题。但作为移动设备时接插件的压力就必须认真考虑。如何判断是否满足使用的要求可采用以下方法

- 1、随机振动试验，检测接触点的瞬间开路
- 2、使用标准的插拔力试验设备检查
- 3、机械疲劳试验

137



连接器、开关

a27
接插件烧毁

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 继电器、开关的触点抖动及影响

继电器和开关在触点接触前由于空气的电离、以及接触电阻的不稳定会造成信号不稳定，由于过程较短一般不会对电路产生大的影响，（除非触点有大电流或高电压时，参造继电器的消弧电路）。但在数字电路中有可能引起电路的不正常翻转，有条件的话可以加RC滤波电路，如开关或继电器作为单片机按键输入时可由软件滤波。

138



半导体器件

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

半导体器件的失效模式

随着半导体技术的发展，芯片加工工艺技术的成熟，以及生产线工艺控制能力的增强，半导体器件的失效总体表现为芯片本身失效减少，而器件封装结构和半导体器件后工序导致的失效成为主要失效原因。

139




半导体器件

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

使用不当或选择不当造成的失效

- (1) 应用电路设计不合理导致器件在测试或使用中存在过流、过压、过功率等状态，导致器件失效。
- (2) 整机系统其他部件的故障导致元器件失效。
- (3) 装配中的机械过应力造成外壳损伤、引线压伤或使用中的应力释放导致引线断裂、芯片脱落、芯片开裂等。
- (4) 生产过程中装配、调试不规范导致过电应力和极性反接等使器件失效。
- (5) 工艺过程中焊接温度过高过长造成元器件损坏
- (6) 未采取严格的防静电措施导致静电损伤失效。
- (7) 整机设计人员对元器件性能及使用条件缺乏足够了解，使所选用的元器件不符合使用要求或在超应力条件下使用而失效。

140




半导体器件

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

二极管的应用问题

- 正向电流 (瞬间电流)
- 反向电压 (瞬间电压)
- 发光二极管 (光耦的设计)
- 稳压二极管
- 电压瞬变抑制二极管 (TVS、肖特基等)

141



半导体器件

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析


- 功率三极管在应用中被忽略的问题
- 开关电路射前、后沿对可靠性的影响
- 场效应管的控制栅电流和功率管的基极电流
- BE结反向的后果
- 机械应力问题 (与生产关系重大)
- 如何判断性能良好的功率三极管
- 散热与烧结良好的关系 (单管、多管)
- 饱和压降
- 响应时间
- 内部水汽的影响 (空封器件)

a29
开关前
后沿

a30
bc结
反向

a32
控制栅
电流

142



半导体器件

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析


感性负载对三极管的影响

如果电路的负载是电感性的，例如：继电器线包、偏转线圈、电机和长电缆等。在电流关断瞬间，由于电感线圈内出现的反电动势就会突然加在负载晶体管上，这种电压浪涌的冲击，对晶体管BC结造成的电损伤，会引起EC间漏电增大，并且这种损伤是累积性的，当损伤达到一定程度后就会导致发生二次击穿烧毁。

反电动势的大小与线圈电感量、 di/dt 、直流电压和电流大小有关。它引起电压的瞬间跳动值是电源电压的2~5倍，这种瞬变电压的大小应采用“记忆示波器”进行检测，测得的数值是电路设计，尤其是可靠性设计中的重要根据。

a33
外壳
由寄

143



半导体器件

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

功率管的热影响

- 1、二次击穿失效有正偏二次击穿和反偏二次击穿。前者与器件的热性能有关，后者与集电结附近载流子雪崩倍增现象有关，但两者总是与器件内部的电流集中过程密切相关。
- 2、金属间化合物使Au-Al系统失效

金丝与铝层的键合，或者铝丝与镀金管腿的压焊。由于金、铝两者化学势不同，在长期使用或贮存后，在高于200℃温度下，它们之间产生一系列电导率较低的金属间化合物。

这些金属间化合物具有各种颜色，故称“紫斑”，而Au₂Al呈白色，则称“白斑”，Au₂Al的危险性更大。

144



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

高频小功率管的可靠性

高频小功率管和小功率的mos管由于制造工艺不同在使用时要特别注意以下两点

静电击穿

放大倍数下降



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

余量确定

在应用中分立器件的余量确定是可靠性设计的基本要求，在应用中温度过高引起的失效占多数，其次是浪涌的破坏，事实上机械应力造成的失效往往被设计人员忽略，在生产工艺上被体现出来。

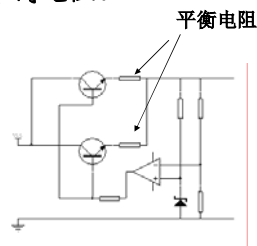
- 1、通过“记忆示波器”确定反电动势、浪涌电压、上升沿时间、下降沿时间。
- 2、通过计算确定最大电流和功率。
- 3、实测管壳温度。



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

功率器件的并联使用

器件的并联使用是不得已的办法，如果需要并联使用一定要能保证两器件或多器件的平衡，方法是必须加平衡电阻。



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

集成电路

对于中小规模的集成电路有TTL、CMOS两大类特点是TTL电路的速度快、功耗大；CMOS正好与其相反，抗干扰能力上CMOS优于TTL。

对于使用TTL和CMOS的混合逻辑电路，由于不同的开关/保持时间容易产生时钟、电源和有用信号的谐波，因此设计中尽量采用相同的电路。



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

集成电路

数字集成电路的输入端是需要注意的。虽然反复强调输入端不能浮空，但仍然会有浮空的设计。

模拟电路的使用（运算放大器）必须注意输入端需要有静态工作电压，对于单电源的运放尤其小心。

在直流放大电路中，随温度和时间漂移设计是可靠性设计的难点。

光电器件的技术指标和应用。

集
成
电
路

149



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

I/O 端口

MCU的I/O端口是与外部电路的连接管道，所有的端口高阻输入，高输入引脚易受噪声影响。不能浮空尤其是要注意端口通过插座输出时。

长线传输时的网络端口设计必须加保护元件，保证防止雷击损坏端口，同时最好是将端口器件电源和主电路电源隔离。

专用器件的端口不能正常工作的两个实例

集
成
电
路

a35
RS485
应用

a36
RS485
网络载

150



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

可编程器件

随着半导体技术的飞速发展，单片机本身的设计中不断采用了一些新的抗干扰技术，使单片机的可靠性不断提高。除选择抗干扰能力强的单片机外，单片机系统中其它辅助元器件的可靠性也至关重要，一些抑制干扰的元器件的使用有助于提高系统的可靠性。此外，单片机系统在电路设计、印制电路板的设计、布线与制造工艺、系统安装时有关良好的接地等，都直接影响应用系统的可靠性。

集
成
电
路

151



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

可编程器件

对于单片机与其他可编程器件的失效主要是芯片设计的问题，设计人员需要控制的主要是使用温度和湿度问题。

此外程序设计中软件的可靠性问题不容忽视。软件容易存在的问题

- 1、程序跑飞（干扰、非法数值、死循环）
- 2、干扰导致的时序紊乱
- 3、非正常使用（中途断电、不按要求按键）
- 4、多功能端口的设定被随意改变。
- 5、复位电路（在晶振稳定后工作）
- 6、中断引脚与程序设计

集
成
电
路

a37
I²C读写

MP3换
电池

152



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

电过应力(简称EOS)和静电放电(简称ESD)损伤是过应力损伤的主流,集成电路和晶体管大部分属于微功耗、微型结构器件,它本身能够承受“过应力”的能力很差,也就是说本身很脆弱,很容易受到过应力,特别是ESD/EOS的损伤。

电过应力的来源很多,最常见的有

- 1、电浪涌
- 2、操作失误
- 3、CMOS电路振荡引起功率过荷
- 4、门锁效应

153



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

电浪涌损伤

电浪涌即电瞬变,它是一种随机的短时间的电压或电流冲击。它是电子设备在装调维护过程中经常遇到的问题,系统越大就越复杂就越容易出现这种问题。电浪涌虽然平均功率很小,但瞬时功率很大,并且电浪涌的出现是随机的,不容易被操作者发现,所以对半导体器件带来的危害特别大,轻则引起电路出现逻辑错误,重则使器件的PN结受到损伤或引起功能失效。

154



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

电浪涌的来源

- 1、交流220V电压突跳
 - 2、雷击产生的电势
 - 3、核爆炸瞬间在空间产生的核电脉冲是一次很强的电浪涌
 - 4、电感负载的反电动势对晶体管BC结造成的电损伤
 - 5、大电容负载和白炽灯泡负载产生的电流浪涌
- 抑制电浪涌的对策

为了抑制电浪涌的损伤对策是1、在直流电源的交流输入端串接“交流滤波器”; 2、对地加压敏电阻,外部引线采用屏蔽线; 3、屏蔽; 4、在电感线圈两端并联箝位二极管,在长电缆两端对地分别连接电压瞬变抑制二极管箝位;

155



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

不容忽视的操作失误

- 1、双列直插式封装的集成电路当测试时不慎反插。
- 2、电路调试时,不慎出现“试笔头”桥接短路管脚,这种短接有时会造成电损伤
- 3、在电子设备中设置的“检测点”,如果位置设置不当又无保护电路时,维修时就可能将不正常的电压引入该端而损伤器件。

操作失误造成的损伤有可能不会立即失效,但有损伤的器件最好不要使用了。

156



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 CMOS电路非正常自振荡

集成
电路

- 1、当CMOS电路的任何一个输入端发生浮空时，CMOS电路都会发生自激振荡。
- 2、CMOS电路输入缓慢变化的脉冲时容易引起振荡。输入缓慢变化的脉冲使输入端处于VDD/2的时间增长，导致输出端出现不稳定的时间增长，容易诱发CMOS电路发生振荡。振荡后电路功耗增大(高达200mA)，就会发生电过应力损伤。

防止振荡的方法有：1、不允许CMOS电路的任何一个输入端出现浮空状态；2、普通CMOS电路的上升时间应小于 $10\mu s$ ，而计数器和移位寄存器电路，5V时应小于 $5\mu s$ ，10V时应小于 $1\mu s$ ，15V时应小于 $200ns$ ；3、利用施密特触发器进行整形

157



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 CMOS电路的可控硅效应(闩锁效应)

闩锁
效应

CMOS电路的静态功耗极小，但可控硅效应被触发后功耗会变得很大(50~200毫安)，并导致电路发生烧毁失效。CMOS电路的硅芯片内部，在VDD与VSS之间有大量寄生可控硅存在，并且所有输出端和输入端都是它的触发端，在正常条件下工作，由于输入和输出电压满足下式要求：

$$VDD > V_{out} > V_{SS}; \quad VDD > V_{in} > V_{SS}$$

所以正常工作条件下CMOS电路不会发生可控硅效应。但在某些特殊情况下，上述条件会不满足，可控硅效应(闩锁)就可能发生，发生闩锁的CMOS电路如果无限流保护就会被烧毁。

158

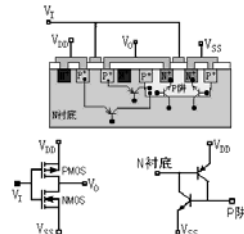


三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 闩锁的现象和机理

集成
电路

现象：cmos电路温度急剧上升，电流增大10~200倍，电路表面有烧毁的裂纹。

机理：在CMOS集成电路中，由于在同一硅衬底上同时制作PMOS管和NMOS管，在结构上不可避免地存在NPNP寄生可控硅结构。在正常工作条件下，其中如PN结起电隔离作用。但是在一定的电条件下，该结构一旦被触发，通过自身的电反馈过程，寄生可控硅结构便处于导通状态(即闩锁效应)，电源到地之间便会流过很大的电流。如果线路上没有有效的限流预防措施，只要电源不切断，即使触发信号已经消失，已形成的导通电流也不会消失。此时IC可能由于功耗电流过大而发热甚至烧坏。



a38
闩锁
失效

159



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 闩锁的现象和机理

集成
电路

线路产生这种寄生可控硅导通的基本条件：

- ①电源浪涌电压峰值超过器件的击穿电压，使IC的电源端对地间进入二次击穿状态
- ②输入或输出电压(V_o 或 V_i)高于VDD或低于VSS。如
 - a. 输出端存在较大的电感负载。
 - b. 设备使用两组以上通断延时有差异的电源。
 - c. 输出驱动带长线。
 - d. 接地系统不良。

闩锁效应是CMOS电路在结构上所固有的寄生可控硅结构效应，是可防止的一种失效机理，因此在芯片内部的输入、输出和电源端都有保护网络，但是由于结构和尺寸的限制，这一保护网络的保护作用有限。

160



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 闕锁可能发生的情况和应对措施（一）

1、两台电子设备连接时，处于接口部位的CMOS电路容易发生闕锁，因为两台设备不是使用同一直流电源，由于电源电压的差别会引起接收端的CMOS电路发生闕锁；

措施：在两台设备的信号连线上串入一只限流电阻，电阻值的选择取决于电源电压 $R \approx VDD(K\Omega)$

2、CMOS电路进行高温电老化时信号源电源与老化电源不同时；

措施：先开老化电源后开信号源电源，并串入一只限流电阻，电阻值为 $R \approx VDD(K\Omega)$

161



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 闕锁可能发生的情况和应对措施（二）

3、当CMOS电路的输出端有大电容负载时，关电源或电源电压下跌，都有可能使得大电容上的电压大于VDD容易引起闕锁；

措施：预防闕锁的措施是在大电容器上串进数K Ω 限流保护电阻

4、CMOS电路的输入端连接长线时容易发生闕锁。因为长线的电感和分布电容容易引起LC振荡，振荡时会出现瞬间 $V_{in} < V_{SS}$ 的情况；

措施：输入端串接限流电阻，将电流限制在1mA以下，对地加接瞬态电压抑制二极管

162



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 闕锁可能发生的情况和应对措施（三）

5、CMOS电路使用高阻电源时容易发生闕锁，原因是瞬态电流在电源内阻上产生的压降，会使电源中出现负毛刺，也就是说会发生 $V_{out} > VDD$ 或 $V_{in} > VDD$ 的意外情况；

措施：在VDD与地之间并联两只电容器，1只为10~50 μF 电解电容器，另1只是0.01 μF 的高频电容器。

6、CMOS电路的地线电阻较大时容易发生闕锁；

措施：在布线设计时，想法尽量减小地线电阻。

7、抗闕锁性能差的CMOS电路容易发生闕锁。

措施：在选择与采购电路时，首先应选择抗闕锁性能较好的CMOS电路。

163



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 闕锁应对措施汇总

在Vdd与Vss之间加上完善的去耦电路。

在Vdd端加上适当的限流措施。

尽可能降低器件所使用的电源电压。

输入端加上钳位措施，如加接瞬态电压抑制二极管。

如有长线驱动，必须采用消振措施和加接瞬态电压抑制二极管。

改进接地系统。

由于功耗小，因此Cmos电路的应用也越来越广泛，线路设计人员对闕锁的认识也在提高，抗闕锁设计不要被忽视了。

164



静电放电

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

静电放电(ESD)损伤的原理

静电放电损伤是电过应力损伤的特殊形式，它的特点是电压高、电荷量小，并且这种损伤是偶然发生的，损伤引起的破坏性带有积累性，当损伤较轻时器件并不会失效，但随着损伤次数的增加，器件就会突然发生失效。

在电子工业中存在的静电放电现象十分普遍，由于生产过程中大量使用塑料和高分子材料，所以静电电荷的产生与积累都很严重。而半导体器件和集成电路都向高速、高集成、低功耗方向发展，这样就使得它们对静电放电损伤变得更加敏感。例如，人体静电电压在1~2KV范围内发生的ESD，人体并无感觉，但对静电敏感器件却会引起失效。因此，ESD损伤是在不知不觉中发生的，具有隐蔽性

165



静电放电

ESD损伤机理

(1)电压型损伤

- a.栅氧化层击穿(MOS电路输入端、MOS电容)
- b.气体电弧放电引起的损坏(芯片上键合根部、金属化条的最窄间距处、声表面波器件的梳状电极条间)
- c.输入端多晶硅电阻与铝金属化条间的介质击穿
- d.输入/输出端n+扩区与铝金属化条间的介质击穿。

(2)电流型损伤

- a.PN结短路(MOS电路输入端保护二极管、线性电路输入端保护网络)
- b.铝条和多晶硅条在大电流作用下的损伤(主要在多晶硅条拐弯处和多晶硅条与铝的接触孔)
- c.多晶硅电阻和硅上薄膜电阻的阻值漂移(主要是高精度运放和A/D、D/A电路)

166



静电放电

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

引起ESD损伤的三种途径

- (1)人体活动引起的摩擦起电是重要的静电来源，带静电的操作者与器件接触并通过器件放电。
- (2)器件与用绝缘材料制作的包装袋、传递盒和传送带等摩擦，使器件本身带静电，它与人体或地接触时发生的静电放电。
- (3)当器件处在很强的静电场中时，因静电感应在器件内部的芯片上将感应出很高的电位差，从而引起芯片内部薄氧化层的击穿。或者某一管脚与地相碰也会发生静电放电。

根据上述三种ESD的损伤途径，建立了三种ESD损伤模型：人体带电模型、器件带电模型和场感应模型。其中人体模型是主要的。

167




静电放电

三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

ESD可以通过五种耦合途径进入电子设备

- 1、电场容性耦合到表面积较大的网络上，并产生高压-容性耦合
- 2、电弧注入电荷/电流-电荷释放
- 3、电流导致导体上产生电压脉冲-共模阻抗耦合
 $V=L \times di/dt$
- 4、电弧产生一个频率范围在1MHz到500MHz的强磁场，并感性耦合到临近的每一个布线环路-感性耦合
- 5、电弧辐射的电磁场会耦合到长的信号线上，这些信号线起到接收天线的作用-辐射耦合

168





三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

静电放电

最容易受到静电放电损伤的集成电路有：
 CCD、EPROM、微波集成电路、高精度运算放大器、带有MOS电容的放大器、HC、HCT、LSI、VLSI、精密稳压电路、A/D和D/A电路、普通MOS和CMOS、STTL、LSTTL等。

实例1：
 88年11月广州某电视机生产厂，每天在生产线上组装的产品失效率高达10%，失效的绝大部分是遥控处理芯片，原因是没任何防静电措施。






三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

电路形式	双极型数字电路	双极型线性电路	MOS集成电路	双极型单稳电路和振荡器电路
ESD损伤的失效模式	a.输入端漏电流增加 b.参数退化 c.失去功能 其中对带有肖特基管的STTL和LSTTL电路更为敏感。	a.输入失调电压增大 b.输入失调电流增大 c.MOS电容(补偿电容)漏电或短路 d.失去功能	a.输入端漏电流增大 b.输出端漏电流增大 c.静态功耗电流增大 d.失去功能	a.单稳电路的单稳时间发生变化 b.振荡器的振荡频率发生变化 c. R.C连接端对地出现反向漏电

静电放电

晶晶体管失效





三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

静电放电

ESD对集成电路的损坏形式

- a. MOS电路输入端保护电路的二极管出现反向漏电流增大
- b. 输入端MOS管发生栅穿
- c. MOS电路输入保护电路中的保护电阻或接触孔发生烧毁
- d. 引起ROM电路或PAL电路中的熔断丝熔断
- e. 集成电路内部的MOS电容器发生栅穿
- f. 运算放大器输入端(对管)小电流放大系数减小
- g. 集成电路内部的精密电阻的阻值发生漂移
- h. 与外接端子相连的铝条被熔断
- i. 引起多层布线间的介质击穿(例如：输入端铝条与n+、间的介质击穿)





三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

静电放电


预防ESD损伤的原则

凡是对ESD比较敏感的器件，在整个使用过程中都应全面采取严格的防静电损伤措施。其原则是：

1. 尽量防止和减小静电荷的产生；
2. 加速静电荷的泄漏，防止静电荷积累；

ESD防护的要求

1. 不能破坏被保护元器件的最低性能要求
2. 保护电路的开启电压应低于被保护元器件的ESD阈值电压。
3. 保护电路的响应时间要小于被保护元器件的响应时间。
4. 保护电路有在短时间内释放较大的静电能而不自损坏的能力。





三、元器件的故障模式、影响及危害度分析

防静电的保护元件

防静电的保护途径一是泄放电流、二是电压钳位，三是电流限制。常用的方法是旁路泄放、钳位或电流抑制。常用元件为：

静电放电

- 1.瞬变电压抑制二极管。特点是响应时间短，承受瞬时功率容量大，1ms可吸收脉冲功率高达1000w以上。
- 2.压敏电阻。是一种电阻随外加电压变化敏感元件。特点为当电压增大到阈值时电阻值急剧下降，有很好的大电流容量和耐火功率冲击的能力。是混合电路和整机理想的静电保护元件。
- 3.铁氧体磁环。将导线穿绕磁环，可减小静电放电峰值电流。

173



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析 静电防护设计方法

1、介质隔离技术

最有效的ESD保护方法，采用绝缘介质如塑料机箱、空气间隙及绝缘材料等把内部系统和元器件与外界隔离

静电放电

2、屏蔽技术

使用金属屏蔽外壳，防止大的ESD电流冲击内部电路

3、电气隔离技术

PCB板上安装光耦合器或者变压器(电源)、光纤/无线和红外线(信号通路)，实现电气隔离

4、使用ESD泄放回路

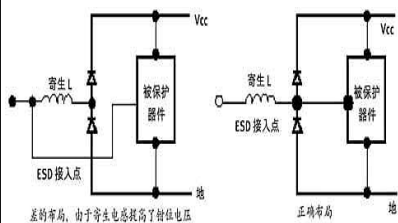
5、外接ESD保护器件

6、合理的PCB布局布线

174

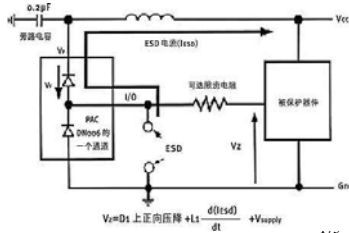


三、元器件的故障模式、影响及危害度分析



静电放电

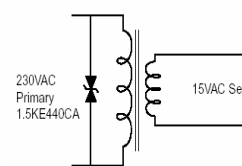
避免电源端上的电感



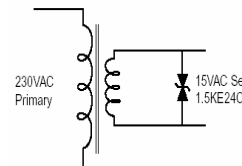
...



三、元器件的故障模式、影响及危害度分析



高压端保护能力不强



低压端保护能力强

用TVS保护交流变压器时，应选择变压器的次级端进行保护

176



通用的可靠性设计分析方法

定量要求

选择和确定产品的故障定义和判据、可靠性指标以及验证时机和验证方法，以便在研制过程中用量化的方法来评价和控制产品的可靠性水平。

确定可靠性指标主要考虑下列因素：

- 1) 国内外同类产品的可靠性水平；
- 2) 用户的要求或合同的规定；
- 3) 本企业同类产品的可靠性水平；
- 4) 进度和经费的考虑与权衡。

当前，多数民用机械产品的用户一般还不会在合同中提出明确的可靠性定量要求。但潜在的要求是的确客观存在的。

181



通用的可靠性设计分析方法

3.制定和贯彻可靠性设计准则

制定和贯彻可靠性设计准则是一项重要的可靠性定性设计方法，它可以在进行产品设计的同时把可靠性设计到产品中去。这种方法的实用性强，效费比高，应予优先采用。

可靠性设计准则一般都是针对某个型号或产品的，但也可以把各个型号或产品的可靠性设计准则的共性内容，综合成某类产品的可靠性设计准则。

与可靠性设计准则相似的一种可靠性设计文件是“可靠性设计检查表”。它用向设计人员提问题的方式促使设计人员考虑产品可靠性要求和消除可能存在的设计隐患。

182



通用的可靠性设计分析方法

4.系统可靠性模型的建立和可靠性分配

(1) 系统可靠性模型的建立 建立可靠性模型是为了定量分配、估算和评估产品的可靠性。

为了建模，要在产品工作原理图的基础上画出产品的可靠性框图。产品的工作原理图是表示产品各单元之间的功能联系，而可靠性框图则是以各种串-并-旁联的方框组合表示系统各组成单元之间的完成规定功能中的关系。这两者是不能混淆的。

(2) 可靠性分配 工程中常用的可靠性分配方法有比例分配法和加权分配法。

183



通用的可靠性设计分析方法

5.故障模式、影响(危害度)分析(Fault Modes, Effects (and Criticality) Analysis—FME(C)A)

FME(C)A分析是另一个重要的可靠性定性设计分析方法。此方法研究产品的每个组成部分可能存在的故障模式，并确定各个故障模式对产品其他组成部分和产品要求功能的影响。它亦能同时考虑故障发生的概率和危害度的等级。

184



通用的可靠性设计分析方法

6.故障树分析 (Fault Tree Analysis—FTA)

FTA分析是以故障树的形式进行分析的方法。它用于确定哪些组成部分的故障模式或外界事件或它们的组合可能导致产品的一种已给定的故障模式。它以系统的故障为顶事件，自上而下地逐层查找故障原因，直至找出全部直接原因（基本事件，即硬件和软件故障、人为差错和环境因素等），并根据它们之间的逻辑关系用图表示。这种图的外形像一棵以系统故障为根的树，故称故障树。

185



通用的可靠性设计分析方法

7.确定可靠性关键件和重要件

确定原则如下：

- 1) 会导致人员伤亡的产品；
- 2) 会引起系统故障的产品；
- 3) 严重影响系统可用性的产品；
- 4) 难以采购的产品；
- 5) 需进行特殊处理、储存或防护的产品；
- 6) 从以往使用上看容易损坏的产品；
- 7) 大功率产品和昂贵的产品；

186



通用的可靠性设计分析方法

8.可靠性设计评审

要在产品研制的各个阶段，设置可靠性设计评审点，对可靠性工作计划和实施情况进行有效的监督管理。

- 1) 有别与产品的设计评审；
- 2) 方案阶段需保证预计与分配的合理性；
- 3) 设计阶段重点是简化、降额、热设计、尺寸、外形、重量、材料选择等，重点是评价关键的测试参数；
- 4) 可靠性验证阶段重点是保证产品参数的一致性，耐环境适应能力；
- 5) 生产阶段：材料的可靠性保证，工艺条件的保证筛选试验，可靠性试验的条件；


187



本章小结

- 降额
- 简化
- 冗余
- 容差
- 热设计
- 可靠性预计
- 可靠性分配
- 可靠性增长


188



四、整机设计规则

1. 热设计 《传热学》赵佩南 高等教育出版社
2. 印制电路板设计
接地技术、干扰技术、屏蔽技术、金属迁移（离子迁移）
3. 电磁兼容设计 《电子产品的安全要求、试验与设计》中国计量（总部）实验室
4. 三防（防潮、防腐蚀、防霉菌）和防尘设计
5. 结构和防振设计

189




四、整机设计规则

热设计的具体要求

1. 满足设备使用要求。
2. 满足设备预期工作的热环境的要求
环境温度和压力（或高度）的极限值；
环境温度和压力（或高度）的变化率；
周围其它物体的辐射热；
3. 采用的冷却方式
直接冷却和间接冷却，按传热的机理分有自然冷却，强迫冷却、蒸发冷却、半导体致冷等方法。
4. 热设计应符合与其有关的标准、规范规定的要求

190



四、整机设计规则

设计中需要考虑的问题（一）

最大限度地利用传导、自然对流和辐射等简单、可靠的冷却技术。

尽可能缩短传热路径，增大换热（或导热）面积，增加表面黑度，提高辐射换热能力。


加大热传导面积和传热零件之间的接触压力，提高接触表面的加工精度或在接角面间加导热脂，以减少热阻。

在热流通道口应减少各种阻力，零件和元器件的排列的方向和安装方式应保证最大的热对流。

元器件安装时，要充分考虑周围元器件辐射换热的影响。

室外、便携产品对太阳辐射需要有相应的防护措施

191



四、整机设计规则

设计中需要考虑的问题（二）


使用通风机进行风冷时，进出风口应符合电磁干扰和安全性要求，必要时还应考虑防淋雨要求。

进入的空气与排出的空气之间的温差应小于 14°C 。并注意强迫通风与自然通风的方向尽量一致。

在冷却风道上要先冷却热敏元件低温元件，再冷却高温元件，并使每个元器件，零部件的配置和安装合理。

采用强制风冷系统时，应保证在机箱内有足够的正压强。进气口和排气口之间应有足够距离，要避免热风回流

192



四、整机设计规则

热设计

设计中需要考虑的问题 (三)

如果环氧树脂树脂印制线路板不足散发所产生的热量，应考虑加设散热网络和金属条散热。

在冷却装置中，应该具有防止诸如燃料油微粒，灰尘，纤维微粒等沉积物和其他老化措施，以免增大热阻降低冷却效果。同时还应防止由于工作周期、功率、热环境以及冷却剂温度等变化引起的热瞬变，使元器件的温度波动减少到最低程度。


使用半导体制冷器。

恒温设计（放大器、液晶加固）

使用强制风冷却时，必须要兼顾防尘问题

193

a45
主板的
防尘



四、整机设计规则


热设计

加快散热的措施 (一)

① 加快对流。对流是固体表面与流体表面的热流动，有自然对流和强迫对流之分。在电子设备中流体通常指的是空气。对流散热的措施有：

- 加大温差，即降低周围对流介质的温度；
- 加大流体与固体间的接触面积，如把散热器做成肋片、直尾形、叉指形等。
- 加大周围介质的流动速度，使它带走更多的热量。

194



四、整机设计规则

热设计

加快散热的措施 (二)


② 加快传导。在固体材料中，热流是由分子之间相互作用产生的，这就是传导。加快传导散热的措施有：

- 选用导热系数大的材料制造传导零件；
- 加大与导热零件的接触面积；
- 尽量缩短热传导的路径，在传导路径中不应有绝热或隔热元件。

③ 加快辐射。热由物体沿直线向外射出去是辐射。加快辐射散热的措施有：

- 在发热体表面涂上散热的涂层；
- 加大辐射体与周围环境的温差，亦即周围温度愈低愈好；
- 加大辐射体的表面面积。

195



四、整机设计规则

印刷电路板设计

整体需要考虑的主要是采用的电路形式，元器件的合理布局和元器件的选择，以及与其他设计的接口配合问题。

印刷电路板版图的设计主要要考虑的是接地、抗干扰、金属离子迁移，以及电磁兼容性设计。

在新的封装技术和封装尺寸改变后，焊盘的设计需要与生产工艺条件配合形成规范，同时焊接技术对版图设计的影响比过去复杂。

196



四、整机设计规则

接地方式:

1. 浮动接地

高频时不采用

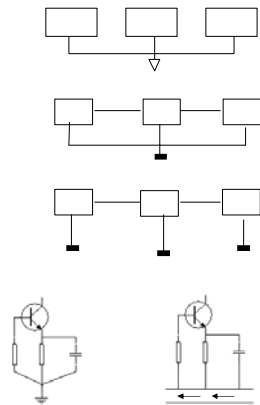
2. 单点接地

低频和音频采用

3. 多点接地

高频时采用

4. 混合接地



正确

不正确

197



四、整机设计规则

1. 电路按区域分开

电路板上既有线性电路(怕干扰), 又有高速逻辑电路(怕干扰、又产生干扰), 有些还有功率驱动(干扰源)。应按区域使它们尽量分开, 而相互间的地线、电源线不要相混, 分别与电源、地线相连。要尽量加大线性电路的接地面积。

2. 正确选择单点接地与多点接地

在低频电路中, 信号的工作频率小于1MHz, 它的布线和器件间的电感影响较小, 而接地电路形成的环流对于干扰影响较大, 因而应采用一点接地。当信号工作频率大于10MHz时, 地线阻抗变得很大, 应尽量降低地线阻抗, 采用就近多点接地。当工作频率在1~10MHz时, 如果采用一点接地, 其地线长度不应超过波长的1/20, 否则应采用多点接地法。

198



四、整机设计规则

3. 尽量加粗接地线

若接地线很细, 接地电位则随电流的变化而变化, 致使电子设备的定时信号电平不稳, 抗噪声性能变坏。因此应将接地线尽量加粗, 使它能通过三倍于印制电路板的允许电流。如有可能, 接地线的宽度应大于3mm。

4. 将数字电路接地线构成闭环路

设计只由数字电路组成系统时, 将接地线做成闭环路可以明显的提高抗噪声能力。其原因在于: 印制电路板上有很多集成电路元件, 尤其遇有耗电多的元件时, 受接地线粗细的限制, 会在地线上产生较大的电位差, 引起抗噪声能力下降, 若将接地线构成环路, 则会缩小电位差值, 提高电子设备的抗噪声能力。

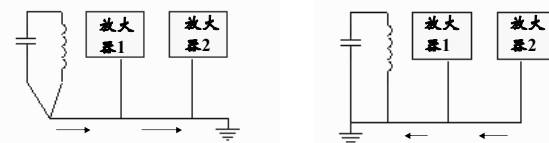
199



四、整机设计规则

5. 多级电路的接地

对于多级电路接地点选择在靠近电源的一端, 线路应逐级接地使地电流的流向从小信号向大信号电路的方向; 严防大信号地电流流经小信号地,



正确

不正确

200

四、整机设计规则

6. 系统布局与接地

将电路的功能和使用的电路形式划分区域；正确布置元件的位置和方向；关键的元件、电路和走线都要屏蔽；在图中按不同电路分别接地。

201



四、整机设计规则

7. 预防离子迁移

金属离子迁移的条件：湿度、电压、使用的材料。设计要求相邻两条并行线不要有大于10V的电压差；印刷电路板表面有防潮涂覆层；外接引脚或电路板线条不要镀银。

202



四、整机设计规则

8. 元器件的摆放

在元件布局上信号传输越短越好；

从热影响的角度看，电容应远离发热部件，发热器件与电容、运放、放大电路要有散热空间。

从位置上讲，最敏感元件应与干扰源和“危险”元件远离；不同电位的元件不能平行布置，离不开的元件应相互垂直。

石英晶体振荡器外壳接地，并尽量靠近振荡电路。石英振荡器下面、噪声敏感器件下面要加大地的面积而不应该走其它信号线。

203



四、整机设计规则

电磁干扰的传播途径

辐射：通过空间向外辐射。

传导：通过导线、公共阻抗耦合将骚扰源带入其他电路，传导是骚扰源传播的重要途径。

感应耦合：骚扰能量可通过与其相邻的导体产生感应耦合

电磁干扰的随机性和捕捉

电磁干扰有时是不规律的，幅度和频率范围都不确定，对随机出现的干扰应该用“记忆示波器”的单次触发捕捉。对电磁发射的测量使用具有符合EMI测量特殊要求的“频谱分析仪”。

204





四、整机设计规则

电磁干扰的波形

电磁干扰有不同的波形各波形所占带宽由宽到窄为矩形波-锯齿波-梯形波-三角波-余弦行波，由此可见缓慢上升的波形干扰最小，

在干扰波形中脉冲下的面积决定频谱中的低频含量，高频成分与脉冲的陡度有关系。

电磁兼容测量标准

GB/T 6113.1-1995无线电骚扰和抗扰度测量设备规范

GB/T 6113.1-1995无线电骚扰和抗扰度测量方法



四、整机设计规则

电磁干扰形成的三要素

$$N=G \times C / I$$

N: 电路受干扰程度; G: 电磁骚扰源强度; C: 耦合途径或传播通道; I: 敏感设备的抗干扰性能。

电磁兼容设计原则

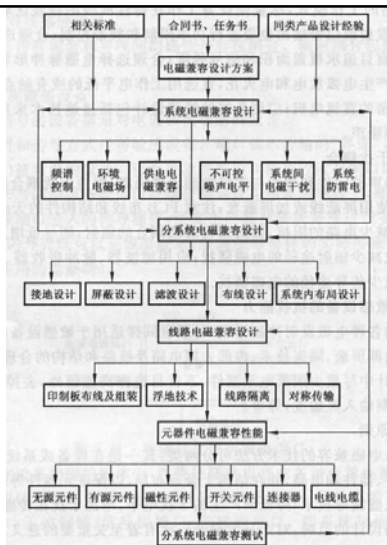
针对三要素解决抑制电磁骚扰源; 切断电磁骚扰耦合途径; 提高电磁敏感设备的抗干扰能力。

设计时选相互干扰小的元器件、电路; 采用接地、屏蔽、滤波技术, 降低干扰幅度。



设计步骤

- 功能性设计
- 检测并修改
- 防护性设计
- 布局性设计
- 设计内容
- 元器件的选择;
- 电路的选择
- 印刷板的设计
- 接地和搭接
- 屏蔽技术应用
- 滤波技术应用
- 电路布局和设备布局
- 导线的分类和敷设



四、整机设计规则

无源器件的选择

高频时有引脚的形成约1nH/mm/引脚; 无引脚的约0.5nH; 0.3pF。选择效果表贴-放射状引脚-轴向平行

电阻器选择: 碳膜-金属膜-线绕电阻; 增益电阻靠近放大器; 偏置电阻靠近有源器件及它的电源和地

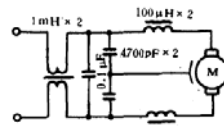
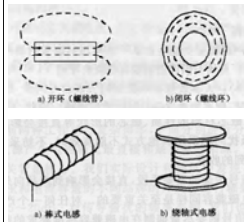
电容器选择: 钽电容、铝电解用于低频终端, 陶瓷电容常用于去耦和高频滤波; 由于谐振频率不同通常用两个去耦电容并联。



四、整机设计规则

磁性元件

会产生电磁干扰，又是抑制电磁干扰不可或缺的器件；开环电感的磁场穿过空气，会引起辐射带来EMI问题。选择开环电感时，绕轴式优于棒式。



四、整机设计规则

磁性材料铁和铁氧体特点：

铁磁芯电感用于低频几十kHz，铁氧体磁芯电感用于高频到MHz，铁氧体磁芯电感更适合电磁兼容应用。如磁导率850的铁氧体，10M时阻抗10Ω，100M时阻抗大于100Ω，自然形成了低通滤波器。

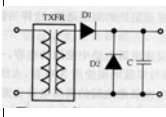
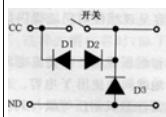
通常单股线穿过铁氧体磁珠，其高频衰减约10db
通常用于电源线的入口

磁导率越高，抑制的频率越低，体积越大，抑制效果越好；体积一定细长形状比短粗的抑制效果好；内径越小抑制效果越好



四、整机设计规则

二极管选用：



整流二极管	大电流；慢响应；低功耗	用于电源
肖特基二极管	低正向压降；高电流密度；快速反向恢复时间	用于快速瞬态信号和尖脉冲保护
齐纳二极管	反向工作；用于钳位正向电压	用于ESD保护；过电压保护；低电容高数据率信号保护
瞬态电压抑制二极管 (TVS)	工作于雪崩模式；钳位正向和负向瞬态过渡电压	用于抑制ESD激发瞬时高电压；抑制瞬时尖脉冲
变阻二极管	覆盖金属的陶瓷粒（陶瓷粒的作用如高压的肖特基二极管	用于ESD保护；高压和高瞬时保护



四、整机设计规则

开关元件的选用

不同的开关管在开关电源上应用整体辐射骚扰可相差15~20db；

二次整流回路的二极管应选快速恢复的肖特基管
可控硅在交流电流中应用最好采用过零触发方式

开关变压器的分布电容和漏磁，初、次之间加静电屏蔽层减小分布电容、外包高导磁率的屏蔽材料抑制漏磁。



四、整机设计规则

a. 开关电源

一般采用单端正激式、单端反激式、双管正激式、双单端正激式、双正激式、推挽式、半桥、全桥等八种拓扑。单端正激式、单端反激式、双单端正激式、推挽式的开关管的承压在两倍输入电压以上，如果按60%降额使用，则使开关管不易选型。在推挽和全桥拓扑中可能出现单向偏磁饱和，使开关管损坏，而半桥电路因为具有自动抗不平衡能力，所以就不会出现这个问题。双管正激式和半桥电路开关管的承压仅为电源的最大输入电压，即使按60%降额使用，选用开关管也比较容易。在高可靠性工程上一般选用这两类电路拓扑。

213



四、整机设计规则

b. 数字电路

- ①多采用集成电路，减少分立器件的数目；
- ②多采用FPGA、单片机、DSP以及嵌入式芯片以减少中小规模集成电路；
- ③尽量用固态继电器减少电磁继电器的干扰；
- ④能用低速器件的就不用高速器件的，高速器件只用在关键的地方。
- ⑤尽量选择高抗扰门限的器件。
- ⑥低功耗的器件优先选用

214



四、整机设计规则

c. 模拟电路

- ①如果模拟信号可以转换为数字信号就应采用数字信号转换，如V/F、A/D、
- ②噪声元件与非噪声元件要离得远一些。
- ③差分电路或平衡电路的采用有助于减少地线干扰的影响，因为差分电路只响应两输入端引线间的电位差
- ④在甚高频段以下采用差分放大可对干扰实现共模抑制比，可提高10~20分贝的系统抗扰度。

215



四、整机设计规则

- 1、三个区域的电源线、地线分三路单点引出；单面板、双面板，电源线、地线要尽量粗，信号线的过孔要尽量少。
- 2、关键的线尽量短并要尽量粗，并在两边加上保护地。将敏感信号和噪声场带信号通过一条扁带电缆引出的话，要用地线-信号-地线.....的方式引出。
- 3、使用45度的折线布线，不要使用90度折线，以减小高频信号的发射。
- 4、任何信号线都不要形成环路，如不可避免，环路应尽量小。
- 5、4层板比双面板噪声低20dB。6层板比4层板噪声低10dB。经济条件允许时尽量用多层板。

216

四、整机设计规则

版图设计要求

6. 时钟振荡电路、特殊高速逻辑电路部分用地线圈起来。让周围电场趋近于零。

7. 对A/D类器件，数字部分与模拟部分不要交叉。噪声敏感线不要与高速线、大电流线平行。

8. 放大的信号线不要并行，防止串扰。

9. 并行线电压尽量低，防止离子迁移

10. 每个集成电路要加一个独石电容式瓷片电容作去耦电容，去耦电容焊接引脚要尽量短。

11. 不用的输入端接地或电源，单片机不用的I/O端口要定义成输出。

12. I/O驱动器件、功率放大器件尽量靠近印刷板的边，靠近引出接插件。

13. 继电器线圈处要加放电二极管。

离子迁移

217

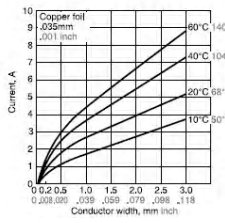
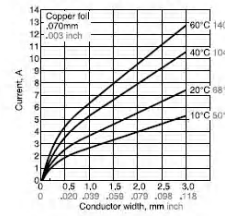
四、整机设计规则

版图设计要求

导体宽度与温度

导体宽度越窄、铜箔越薄温度上升越大，如果温度上升太高会使层压板变色或特性劣化。一般导体允许电流上升温度规定是10°C以下。有必要根据导体允许电流设计导体宽度。右图表示了不同铜箔的上升温度电流和导体宽度的关系。另外，要注意不要由于异常电流而超过导体的破坏电流。

a49
大电流
变色

218

四、整机设计规则

三防设计

防潮、防霉、防盐雾（腐蚀）

主要表现为产品的绝缘降低、性能劣化、断裂而失效，主要原因：

绝缘材料被水汽所湿润

缝隙被水汽侵入并凝结

霉菌生长

金属接触处电化腐蚀、氧化加剧

尘土堆积和水汽浸润造成的材料腐蚀

219

四、整机设计规则

三防设计

三防设计内容

印刷电路板涂覆防潮材料

密封和灌封

金属表面保护

选用不生霉材料，或经防霉处理的材料


材料选择：

涂覆材料：丙烯酸漆、聚氨酯清漆、有机硅

不生霉材料：有机硅塑料、聚乙烯、聚丙烯、氟丁橡胶、环氧酚醛玻璃布板、聚酯

灌封材料：环氧树脂、硅橡胶、硅凝胶

220



四、整机设计规则

耐振设计

1、设计前提条件的明确

2、基本考虑

卧装、粘接固定、加坐固定、加带固定、加卡和螺钉固定。

局部或整机灌封


重量分布均匀

减振器设计

3、验证方法是振动试验，一般情况随机振动可通过试验，那么冲击和线加速度也可通过。

221

耐振设计



四、整机设计规则

安全性设计

对设备安全性能的总体要求

1、设备在正常工作条件下，不对使用人员以及周围环境造成安全危险

2、设备在单一故障条件下，不对使用人员以及周围环境造成安全危险


3、设备在预期的各种环境应力条件下，不会由于受外界影响而变得不安全

安全性设计内容：

防电击安全设计；防高温设计；防火设计；防机械危险；防爆炸伤人；防辐射伤人

222

安全性设计



四、整机设计规则

本章小结

1、热设计中重点是如何解决散热问题

2、印制电路板设计中的接地技术


3、电磁兼容设计中的接地技术、干扰技术、屏蔽技术

4、三防（防潮、防腐蚀、防霉菌）和防尘设计

5、结构和防振设计往往被设计人员忽略

6、整机设计中关注你所选择的电路形式和关键的元器件

223



五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响


焊接标准和缺陷

抗静电标准和预防

工序对可靠性的影响（应力问题）

Pcb板制备对产品可靠性的影响

224

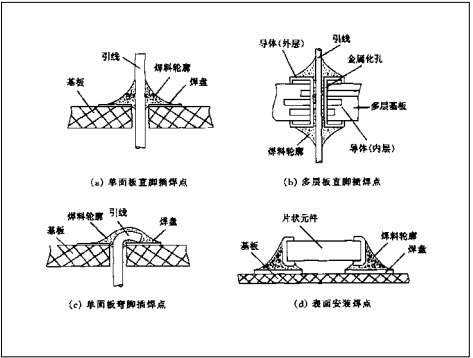


焊接和焊接缺陷

a48

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响


直插式焊接形貌



(a) 单面板直插焊接点 (b) 多层板直插焊接点

(c) 单面板带脚插焊点 (d) 波面安装焊点



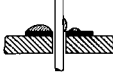

225




焊接和焊接缺陷

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

直插式焊接形貌

	不良焊点的形貌	说 明	原 因
1		元器件引脚未被锡膏润湿, 引脚与焊料的润湿角大于 90°。	元器件引线可焊性不良。 焊接时间不足。 焊接温度不足。 助焊剂比重不足。 助焊剂失效。
2		焊盘未被锡膏润湿, 焊盘与焊料的润湿角大于 90°。	印制板焊盘可焊性不良。
3		基板元器件插入孔全部露出, 元器件引脚及焊盘未被锡膏润湿。	元器件引脚长度过长, 伸入孔中。 元器件引脚、焊盘可焊性严重不良。
4		元器件引脚及焊盘已润湿, 但焊盘上焊料覆盖部分小于 1/2, 插入孔仍有部分露出。	元器件引脚与孔径配合不良。 $D - d > 0.5\text{mm}$ D : 孔径 d : 元器件引脚直径

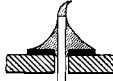
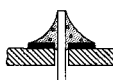

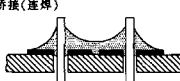
226




焊接和焊接缺陷

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

直插式焊接形貌

	不良焊点的形貌	说 明	原 因
5		元器件引脚头部有焊瘤拉出星尖形。	锡流与印制板传送速度不一致。 预热温度不足。 焊接温度不足。 焊接时间太短。
6		焊点内部有针眼或大小不等的孔洞。	预热时间不够或温度不够, 溶剂未充分发挥。 焊盘、引脚、局部不清洁。 金属化孔内有裂纹。 PCB 有潮气。
7		焊点表面不光滑, 有毛刺。	焊接温度不够。 焊料有杂质。 助焊剂比重太大。
8		相邻焊点之间的焊料连接在一起。	焊接温度、预热温度不够。 助焊剂比重太大。 印制板脱离锡面时速度太快, 角度太小。 印制板传送方向选择不恰当。




227



焊接和焊接缺陷

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

直插式焊接形貌

9		元器件引脚没有伸出焊点。	人工插件未插到位。 焊接前元器件因震动而移位。 焊接时因可焊性不良而浮起。
10		焊盘的锡帽与基板材料脱离。	常发生在烙铁焊中; 烙铁接触时间过长。 烙铁温度过高。
11		焊点的弯月面呈明显的上凸圆弧。	常发生在烙铁焊中; 供锡过量。 烙铁温度不足, 润湿不够不能形成弯月面。

228

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

直插式焊接形貌

焊接和焊接缺陷

不良焊点的形貌	说 明	原 因
12 	焊点未形成弯月形的焊脚角, 焊脚角小于15°。	阻焊剂侵入焊盘。 焊接温度太高。 印制板脱离锡面时速度太慢、角度太大。
13 	焊料未全部润湿双面板的金属孔, 在元件面的焊盘上未形成弯月形的焊脚角。	元件引脚可焊性不良。 焊接时间不够。 预热温度不够。 焊接温度不够。
14 	焊料结晶疏松、无光泽	焊接温度过高。 焊接时间过长。

229

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

表贴组装工艺

单、双面回流技术

焊接和焊接缺陷

锡膏涂布 → 元件贴装 → 回流焊接 → 翻板 → 锡膏涂布

↓

回流焊接 ← 元件贴装

单、双面波峰焊技术

黏胶图布 → 元件贴装 → 黏胶固化 → 翻板 → 波峰焊

↓

波峰焊 ← 翻板 ← 黏胶固化 ← 元件贴装 ← 黏胶图布

230

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

集成电路的封装

焊接和焊接缺陷

按体宽和间距来分类。
主要名称有S0, SOM, SOL, S0P (日本)
间距为标准1.27mm

翼形引脚

按体宽和间距来分类。
主要名称有DIP
间距为标准2.54mm

231

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

集成电路的封装

焊接和焊接缺陷

因封装材料的不同有:
PLCC (塑膜)
CLCC (陶瓷)
MLCC (金属)
其中以PLCC最常用
引脚一般采用J形设计
16至100脚。间距采用标准
1.27mm。可使用插座

常用的封装形式。种类
和名称繁多MQFP、SQFP
CQFP、BQFP、TQFP

J形引脚

232

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

焊接形貌

	良好	最小可允许的焊点	最大可允许的焊点
片状电阻、电容			
短引脚器件 (SOIC) (PLCC)			
无引线器件 (LCCC)			

焊接和焊接缺陷

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

集成电路的封装

针栅阵列排列引脚设计

BGA

球栅阵列排列引脚

PGA

接点多为球形，在陶瓷BGA上有采用柱形的。常用间距有0.8, 1, 1.27和1.5mm。引脚数目已高达800多。

COB、COG封装

裸芯片贴装

焊接和焊接缺陷

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

封装带来的焊接问题

焊接和焊接缺陷

不良焊点

平介面不良

扭曲

弯曲

水平偏移

断裂

表面粗糙

多锡

缺锡

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

曼哈顿效应 (立碑)

根本原因：元件两侧润湿力不平衡，两侧焊料溶化时表面张力不等。张力与润湿力方向相反，不利焊料与被焊金属的润湿于焊接，不能消除，但应尽量减少。

焊盘设计

元件外形和尺寸

焊点热容量

锡膏涂布

锡膏质和量

可焊性

贴片准度

小容量

大容量

小容量

大容量

大容量

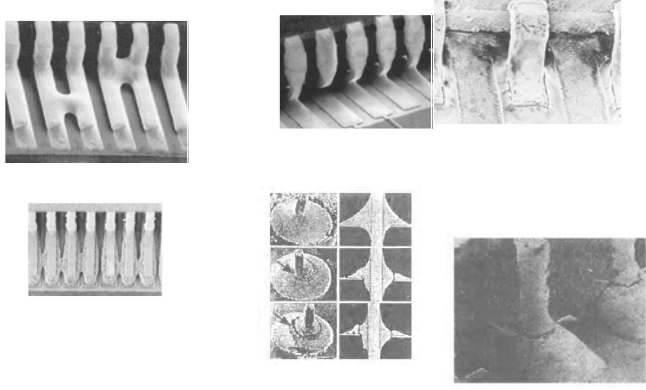
多层板

焊接和焊接缺陷

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

即时故障和可靠性寿命

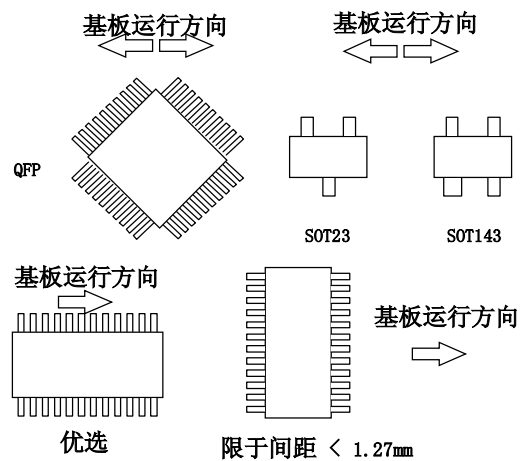
焊接和焊接缺陷



237

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

焊接和焊接缺陷

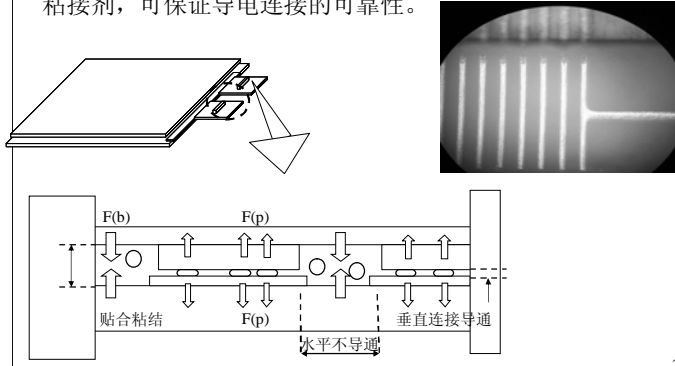


238

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

焊接和焊接缺陷

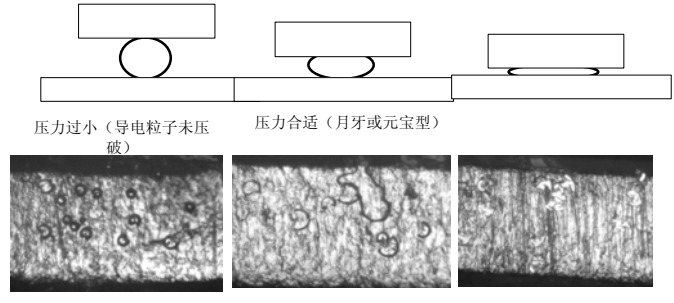
■通过一定的温度、压力和时间，融化ACF的基材并将电粒子压破，垂直导通LSI BUMP和对应LCD ITO，水平方向由于导电粒子未压破而不导通，高温固化后的基材树脂作用为粘接剂，可保证导电连接的可靠性。



239


五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

焊接和焊接缺陷



240

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响




焊接和焊接缺陷

设计配合

- 1、焊盘尺寸和导锡槽设计
- 2、电路摆放方向和行走方向
- 3、孔径与引脚尺寸的配合
- 4、元器件密度、线条密度
- 5、散热问题
- 6、pcb板的平整度要求
- 7、充分认识设计与生产的关系，以及更改元器件尺寸对生产的影响。

241

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响



生产中的静电防护


静电对器件的损伤环节

- (1) 元器件制造和运输交付过程
- (2) 元器件的防静电包装和解包装
- (3) 印刷电路板生产过程 收货、验收、储存、插入、运送、焊接、测试、组装。
- (4) 设备生产过程 电路板验收、运送、测试、装配出货。
- (5) 设备使用和维修过程 收货、安装、试验、使用及保养

静电对器件的损伤特点
 隐蔽性、潜伏性、累积性、随机性、复杂性

242

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响



生产中的静电防护

生产过程中的静电控制

在生产过程中只要存在摩擦就会产生静电，因此静电的产生是必然的。因此如何减少静电产生和释放这些静电电荷就是静电控制的工作。

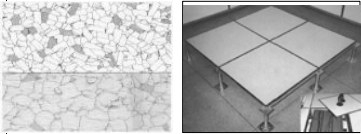
- 1、控制静电产生主要是控制工艺过程摩擦产生的静电和工艺过程中低静电材料的选择；
- 2、释放静电电荷主要是加快静电的泄漏和中和，不允许静电电荷的积累；
- 3、采用屏蔽技术阻隔静电对电路的损伤。

243

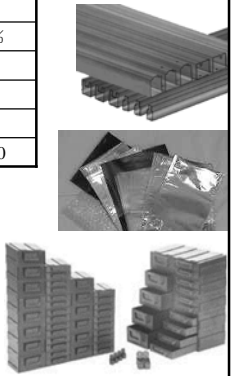
五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

相对湿度与摩擦产生静电的关系

事件	相对湿度 (RH)		
	10%	40%	50%
走过乙烯地毯	12000	5000	300
在工作椅上操作人员的移动	6000	800	400
封装的器件从塑料管中取出	2000	700	400
将印刷电路板装进泡沫包装盒中	21000	11000	5500



防静电地板



防静电包装

244



五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

生产线静电防护必备

防静电服装和腕带是消除人体防静电系统的重要组成部分，可以使消除或控制人体静电的产生，从而减少制造过程中最主要的静电来源。



防静电服装



手腕带



脚腕带



五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

静电消除器

一般来说当带电体是绝缘体时，由于电荷在绝缘体上不能流动，所以不能采用接地的办法泄漏电荷，这时就必须采用静电消除器产生异号离子去中和，达到消除静电的目的。如对生产线传送带上产生的静电荷就采用这种方法进行消除。



离子消电器



五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

静电释放

静电释放采用的材料为耗散材料（表面电阻率为 $1M\Omega$ ），不要使用绝缘材料或导电材料。

放电以不伤害人体为原则，静电释放速度越快越好，一般以小于5mA电流计算。

	10^4	10^5	10^{12}
屏蔽材料	静电导体	耗散材料	绝缘材料



五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

生产线注意事项

- (1) 将所有元器件当作是静电敏感器件；
- (2) 在没有良好接地的情况下，永远不要接触敏感器件或组件
- (3) 如果IC不在工艺线或防静电工作台上时，将它们保存在接地屏蔽的容器中；
- (4) 带有IC的电路板必须在防静电工作台处理；
- (5) 腕带、鞋套应每天检测，保证满足参数要求；
- (6) 所有仪器、设备、周转箱都要接地；
- (7) 流过IC的气体和液体要保持低速；
- (8) 长袖应卷起，并戴上防静电袖套；
- (9) 在没有其它防静电措施的情况下，不要拿装在防静电管中的IC；

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

生产线注意事项

(10) 在可能产生静电的工序使用定点离子消电器
 (11) 腕带要保持人体和地等电位;
 (12) ESD保护工作台要保持器件和地等电位;
 (13) 不要用金属板接地来代替静电工作台
 (14) 拿器件时拿外壳而不触摸管脚引线
 (15) 电路板安装时最后插入敏感器件
 (16) 不带电插拔器件和电路板
 (17) 经常触摸静电接地柱
 (18) 不做摩擦类动作等
 (19) 防止人和人之间直接传递。
 (20) 元器件仓库的货架需良好接地。
 (21) 尽可能保证工作场地的环境湿度。

249

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

静电相关标准

标准号	标准名称	出版单位
GB/T 15463-95	静电安全术语	中国标准出版社
GJB 1649-93	电子产品防静电放电控制大纲	国防科工委军标
GJB/Z 105-98	电子产品防静电放电控制手册	国防科工委军标
GJB 3007-97	防静电工作区技术要求	国防科工委军标
SJ/T 10630-1995	电子元器件制造防静电技术要求	电子部标准化所
QI 1693-89	电子元器件防静电要求	航天部
QI 2846-96	防静电操作系统通用规范	航天部
QI 1950-90	防静电操作系统技术要求	航天部
QI 2177-91	防静电安全工作台技术要求	航天部
QI 1875A-98	静电测试方法	航天工业总公司
IEC 61000-4-2	电磁兼容性 (EMC) 第 4-2 部分: 静电放电抗干扰试验	IEC
ANSI/ESD S20.20-1999	《静电释放控制方案》	美国 ESD 协会

0

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

工序的影响

1、工序安排不当会造成电路的机械应力损伤，如功率器件先焊接后固定的损伤最为严重。

2、回流焊时不满足湿敏条件的塑封器件要先烘烤再使用，避免分层。

251

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响

PCB板存在的问题

1、镀层氧化和缺陷
 2、清洗和粘污的影响
 3、水汽的影响

252



镀层的氧化

五、装配、生产工艺对产品可靠性的影响 PCB板的镀层直接影响焊接的可靠性



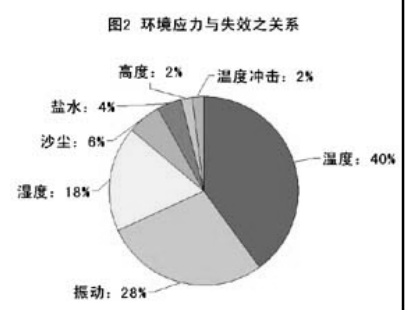
本章小结

- 1、了解电子产品生产工艺
- 2、什么是焊接缺陷
- 3、应力释放对产品可靠性的影响
- 4、PCB缺陷对产品可靠性的危害
- 5、静电对产品的危害，如何进行防护
- 6、重视设计与生产工艺的配合



六、环境试验

环境应力条件可以引起产品失效，Hughes航空公司（美国）技术资料明确地表示了失效与环境应力的关系。图中可见在各种应力影响之中温度和湿度所引发的失效占所有环境应力引发失效的60%左右。



环境试验的发展

六、环境试验

缩短可靠性试验时间的因素：

- 1、加大试验的环境应力。
- 2、测量和试验作业工序所需的时间。
- 3、高精度测试与时间的关系。

例如：在寿命试验的情况下，最普通的评价方法是从每隔一定时间所测定的数据，来判断故障情况以及产品的优劣状况。这时，用于判断的试验数据的测量间隔越短，对寿命评价以及异常的判断也就越快，同时试验时间也能缩短。

加大试验应力作加速寿命试验，那么试验时间的短缩效果就更大了。但是传统的每隔一定时间的测量方法，还是不能满足对产品进行快速可靠性评价的要求。



六、环境试验

在线试验技术

在可靠性评价试验中加大试验应力的加速寿命试验可以缩短试验时间，但试验应力受到一定的限制不可能无限加大，那么只能将测量间隔缩短。因此发展出在线试验技术，该技术通过实时测试，取得试样的特性变化与时间、温度及湿度等环境条件之间有比较性的数据，从而改善判定方法、缩短了试验时间和试验作业工序所需时间，也增加了评价试验的信息量。

综合环境试验技术

- 1、真实再现了使用的环境
- 2、各种应力的组合起到了对产品的加速的作用



六、环境试验

环境试验可大致可分为"气候环境试验"、"机械环境试验"和"综合环境试验"。与气候有关的环境试验包括温度，湿度与压力等环境应力试验，而机械环境试验则包括冲击和振动等环境应力试验。

试验类型	自然暴露试验、人工模拟试验、现场使用试验	
	人工模拟试验	
单因素试验 综合试验 组合试验	气候条件	高低温、湿度、气压、风雨、冰霜
	机械条件	冲击、碰撞、振动、摇摆、噪声、恒加速度、跌落
	生物条件	霉菌、有害生物、海洋生物
	辐射条件	太阳辐射、电磁辐射、核辐射
	化学活性物	硫化氢、二氧化硫、混合气体、盐雾、防爆试验
	机械活性物	沙粒、沙尘



六、环境试验

环境试验目的:

- 1 观察产品在各种环境下的适应性和耐受性
- 2 排除早期失效提高产品的质量
- 3 为失效分析提供验证数据和有效的信息
- 4 为寿命试验和加速寿命试验提供试验手段

环境试验的意义:

环境试验贯穿于电子电工产品的设计、试制、生产、销售、使用的全过程，通常是设计——环境试验——改进——再环境试验——直至投产。环境试验做得越仔细越严格，改进提高得越好，在使用中越可靠。因此环境试验是可靠性试验的基础和最常用的技术手段



六、环境试验

应用范围有:

- (1) 产品的设计定型(型式)试验
- (2) 可靠性增长试验
- (3) 用于生产检查试验
- (4) 用于产品的验收试验
- (5) 可靠性寿命试验
- (6) 研究性试验和验证试验
- (7) 七、筛选试验



六、环境试验

电子电工产品的环境试验方法很多，这就有一个试验顺序的问题。所谓试验顺序，是指对同一产品进行二种或二种以上的单因素人工模拟试验时，应先进行什么试验，后进行什么试验。试验顺序通常对试验结果是有影响的，如果选择不当会造成试验结果不真实，甚至造成试验中断，所以必须合理的确定试验顺序。参照GJB150.1的附录A“环境试验顺序表”

- (1) 根据试验目的来确定试验顺序
- (2) 根据实际遇到的环境因素来确定试验顺序
- (3) 根据能对产品产生最大的影响来确定试验顺序
- (4) 根据试验的经费和时间确定试验顺序

261



六、环境试验

(1) 允许误差范围内的中断
在试验中断期间，试验条件未超过规定的试验允许误差。在此情况下，中断时间可以作为总的试验时间的一部分。

(2) 未达到试验条件的中断
试验条件低于规定的试验条件而试验中断时，应立即对品进行外观检查以及工作性能检测，如果未发现损伤和性能降低，则应使样品在试验温度上重新稳定后继续试验。其试验时间应为中断前的时间和重新稳定后的时间之和。恢复试验后，若没有出现不满足试验条件的情况，则试验有效。

(3) 超过试验条件的中断
试验条件超过规定的试验条件时，应立即对试验样品进行全面的外观检查和工作性能检测。如果未发现问题可以考虑继续试验，但在此情况下，如果样品在后一项试验中出现故障或失效，则试验结果常作无效处理，如果发现问题，最好的办法结束试验，并用新的样品重新试验。

262



六、环境试验

温度应力失效		环境应力条件	敏感元件和材料
分类(原因)	失效模式		
老化	抗拉强度老化 绝缘强度老化	温度+时间	塑料、树脂
化学变化	热分解	温度	塑料、树脂
高温氧化	氧化层的结构	温度	连接点材料、连接器
热扩散	引线断裂	温度+时间	异金属连接部位
击穿	内在的短路， 绝缘性差	高温(200-400℃)	银，金，铜，铁，镁， 镍，铅，钡，铂，钽， 钛，钨，铝
半导体损坏	热点、参数漂 移	温度，电压，电子能	非均质材料
电迁移	断开引线 断裂	温度+电流(密度为 10 ⁶ A/cm ²)	例如，钨，铜，铝(特别 是集成电路中的铝引线)

263



六、环境试验

温度应力失效		环境应力条件	敏感元件和材料
分类(原因)	失效模式		
金属迁移	短路	温度+应力+时间	银、铋、镉、铝、铅、 锡、锌
金属蔓延	疲劳，损坏	温度+应力+时间	弹簧，结构元件
软化，熔化 汽化	扭曲	温度	金属，塑料，热保险丝、
金属脆化	损坏、断裂	低温	体心立方晶体(例如铜， 钼，钨)和密排立方晶体 (例如锌，钛，镁)及其 合金
塑料脆化	损坏、爆裂	低温+低湿度	低弹性的非晶体(例如苯乙 烯，丙烯酸甲酯)、密封圈
焊剂流动	噪声，连接不实	低温	特别是连接到印刷电路板 上的元件(例如开关，连接 器件)

264



六、环境试验

塑料封装高温离层(爆米花)现象

表贴器件(SMD)在经过再流焊后容易发生失效,失效现象常表现为开路、半开路或时好时坏,失效原因是封装塑料发生热开裂(这种裂缝发生在内部,用显微镜进行外观检查时也不可能发现)。

其失效机理是:因表贴器件芯片外面包封的塑料很薄,很少,外部的潮气容易浸入内部。表贴工艺(SMT)是将器件整体加热而不是只对管腿加热(例如:波峰焊、烙铁焊),并且加热时间长(一般215℃~240℃,时间1~2分钟)。当封装体内有潮气,表贴再流焊时,潮气受热膨胀(水分子体积可扩大40倍),造成封装塑料开裂。开裂的发生与塑料体内含湿量、芯片尺寸、塑料包封的厚度,管脚引线与塑料的粘合状况以及再流焊时受到的温度冲击等因素有关。



六、环境试验

危害:由于剥离或爆裂而拉断引线和芯片破裂。

芯片尺寸越大,塑料包封层越薄的SMD,机械应力问题更为突出,因此,越容易发生热开裂现象。根据SMD器件对潮湿的敏感性,可分为1-6级,其中6级是最敏感的。潮湿敏感器件要采用真空包装,如果包装受到破坏,允许放置的时间如下表所示,如果超出了规定的时间,表贴前必须先进行烘烤。

潮敏级别 1 2 2a 3 4 5 5a 6

级别 时间 条件 (<30℃)

1	无限制	<85% R-H
2	1年	<60% R-H
2a	4周	<60% R-H
3	168h	<60% R-H
4	72h	<60% R-H
5	48h	<60% R-H
5a	24h	<60% R-H
6	使用前必须烘烤,并在规定时间内回流	



六、环境试验

高温大电流造成的电迁移

当互连引线中通过大电流密度时,静电场力驱动电子由阴极向阳极运动。高速运动的电子与金属原子发生冲量交换,原子受到猛烈的电子冲击力,这就是电迁移理论中的电子风力 F_{ed} 。实际上,金属原子上还受静电场力 F_{ei} 的作用,如图1所示。

当互连引线中的电流密度较高时,向阳极运动的大量电子碰撞原子,使得所产生的电子风力 F_{wd} 大于静电场力 F_{ei} (图1)。因此,金属原子受到电子风力的驱动,产生了从阴极向阳极的受迫的定向扩散,即发生了金属原子的电迁移(图2)。

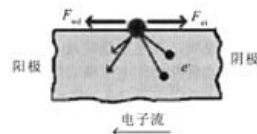


图1 电迁移作用力的示意图

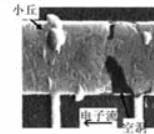



图2 金属原子电迁移示意图



六、环境试验

湿度应力失效			所使用的环境条件	敏感元件和材料
一般分类	媒介分类或原因	失效模式		
水汽吸附吸收	扩散	膨胀绝缘性能变差潮解	湿度	使用低结晶度的极性树脂(例如聚酰胺、聚乙烯醇、酚醛树脂)封装、覆盖或者构造元件
	水解	化学变化	温度+湿度	聚碳酸酯、聚酯、聚甲醛、对苯二甲酸丁二酯
	微细爆裂(细线爆裂,吸气)	湿气渗透绝缘性能变差潮解	湿度、温湿度循环 冷热冲击+湿度 温度循环+湿度	用树脂覆盖或者封装元件
迁移	离子迁移	短路 绝缘性能变差	湿度+直流电场	铋、镉、铜、铅、锡、锌、银
			湿度+直流电场+卤素离子	当与卤素共存时,发生迁移的金属:金、铟、钨、铂
霉菌	无	绝缘性能变差 质量变化	温度(25-35℃)+ 湿度(最小为90%)	塑料材料(例如聚氨酯、聚氯乙烯、环氧树脂、丙烯酸酯)

六、环境试验




湿度对产品的影响

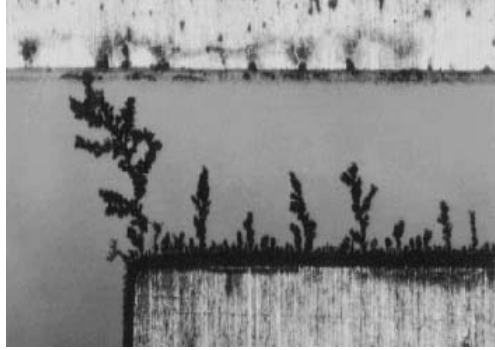
湿度应力失效			所使用的环境条件	敏感元件和材料
一般分类	媒介分类或原因	失效模式		
腐蚀	电池腐蚀	颜色变化、阻抗增加、开路	湿度+与外金属接触所形成的电势	连接0.2伏电势的连接器或需更加仔细选择
	电解腐蚀		湿度+直流电场	例如电阻、封装集成电路的树脂、PCB板、
	裂隙腐蚀		湿度	

269

六、环境试验




湿度对产品的影响



照片是用水滴法进行试验产生离子迁移的照片，

270

六、环境试验



湿度对产品的影响


(1) 物理性能的变化

潮湿环境可以引起材料的机械性能和化学性能的变化，如体积膨胀、机械强度降低等。由于吸潮，使密封产品的密封性降低或遭破坏、产品表面涂敷层剥落、产品标记模糊不等。

由于水汽破坏了绿油层，造成湿汽渗透。

271

六、环境试验



湿度对产品的影响

(2) 电性能变化

由于凝露和吸附作用，使绝缘材料的表面绝缘电阻下降。另外，由于水分的吸收和扩散（渗透）作用，使绝缘材料的体积电阻下降，损耗角增大，从而产生漏电流。对于整机设备，将会导致灵敏度降低、频率漂移等。

272



湿度对产品的影响

六、环境试验

(3) 腐蚀作用

湿热试验一般不能作为腐蚀试验。湿热的腐蚀作用是由于空气中含有少量的酸、碱性杂质，或由于产品表面附着如焊渣、汗渍等污秽物质而引起间接的化学和电化学腐蚀作用。

表面清洗不干净，存在腐蚀性离子造成腐蚀

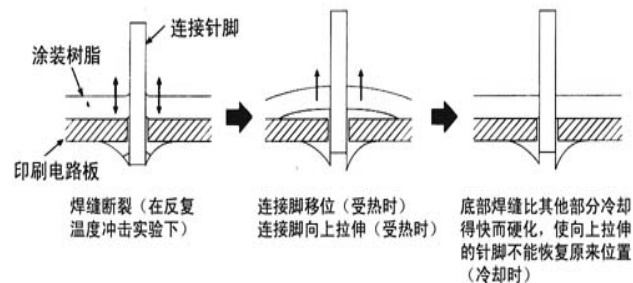
273



温度冲击对产品的影响

六、环境试验

1. 材料间热应力不同造成焊接部位开裂
2. 膨胀、收缩、变形是主要应力



在冷热冲击条件下印刷电路板焊接接脚错位

274



机械冲击和振动对产品的影响

六、环境试验

机械应力	失效现象	受影响的部件
振动	断裂、脱落、 瞬断、瞬接 共振 渗漏	元件、内部不良的元器件、接插件、装配件、紧固件 继电器 组件、整机 空腔密封的元器件
冲击	断裂、脱落、 变形	元器件、接插件、装配件、紧固件
碰撞	断裂、脱落、 变形	元器件、接插件、装配件、紧固件

275



机械冲击和振动对产品的影响

六、环境试验

(1) 对结构的影响:

主要是指变形、弯曲、产生裂纹、断裂和造成部件之间的相互撞击等。这种破坏又可分为由于振动所引起的应力超过产品结构强度所能承受的极限而造成的破坏，以及长时间的振动（例如10⁷次以上应力循环的振动）使产品发生疲劳而造成的破坏。这种破坏通常是不可逆的。


(2) 对工作性能的影响:

主要是指振动使运动部件动作不正常、接触部件接触不良、继电器产生误动作、电子管噪声增大、指不灯闪烁，从而导致工作不正常、不稳定，甚至失灵不能工作，这种影响的严重程度，往往取决于振动量值的大小，而且这种破坏通常不属于永久性的破坏。因为在许多情况下，一旦振动停止，工作就能恢复正常。这种破坏往往是可逆的。

(3) 对工艺性能的影响

这种影响主要是指螺钉松动，连接件或焊点脱开等。这种破坏通常在一个不太长的振动时间内（例如半小时）内就会出现。

276




高温试验

六、环境试验

- (1) 试验方法的选择
- (2) 试验严酷等级的选择
- (3) 在同一个试验箱中，有几个样品同时进行试验时，应注意试验样品之间，样品和安装器件之间不致相互干扰，也不应影响箱(室)内的循环气流。
- (4) 制订产品高温试验时，必须规定和掌握以下内容：
是否进行预处理；初始检测的条件和项目；试验期间样品的状态；试验严酷等级，包括温度、容差和试验持续时间；试验期间应检测的项目，加负载的情况及时间；恢复条件；最后检测的项目及采用的试验程序与标准试验程序的差别。

277



低温试验

六、环境试验


低温试验

低温试验用于考核产品在低温环境条件下贮存和使用的适应性，常用于产品在开发阶段的型式试验、元器件的筛选试验。

低温试验的技术指标包括：温度、时间、变化速率。

注意产品从低温箱取出时由于温度突变会产生冷凝水。（对温度循环、温度冲击、湿热试验均适用）

278



温度变化试验


六、环境试验

在美国，冷热温度冲击试验经常作为产品出厂前的一种筛选试验形式对产品进行100%的全数检查。在日本，冷热冲击试验则作为加速可靠性试验的一种形式广泛应用于产品开发的阶段。

温度冲击广泛采用的背景如下：

- ① 为减少成本，采用新材料，新工艺；
- ② 整机的小型化使得元器件更容易受热；
- ③ 加工过程中元器件可能会受到严重的热应力影响，例如当采用焊锡焊接时；
- ④ 由于产品精度要求元器件连续地受到更大的热应力影响；
- ⑤ 随着便携式电子产品的普及，产品使用环境已经变得更加复杂苛刻；
- ⑥ 可靠性要求及水平越来越高。

279



温度变化试验

六、环境试验

- 温度变化类型：
 - 一、是自然条件下的温度变化
 - 二、由于人类的社会实践而诱发的温度变化
- 温度冲击与温度变化的应用方向
 - a. 温度冲击试验目的是为了在较短的时间内确认产品特性的变化，以及由于构成元器件的异种材料热膨胀系数不同而造成的故障问题。这些变化可以通过将元器件迅速交替地暴露于超高温和超低温的试验环境中观察到由于急剧的温度变化，将使产品受到一种热冲击力。在这种热冲击力的作用下，将导致电子电工元件的涂覆层脱落、灌封材料或密封化合物龟裂甚至破碎、密封外壳开裂、填充材料泄漏等，从而引起电子元器件电性能的下降。对于由不同材料构成的产品，由于温度变化时产品受热不均匀，因此导致产品变形、密封产品开裂、玻璃或玻璃器皿和光学仪器等破碎。
 - b. 温度变化试验的目的是用于确定产品在温度变化期间，或温度变化以后受到的影响。温度变化试验不是模拟使用现场的温度变化对产品的影响，而是用于考核产品的设计、工艺和生产。
- 温度变化试验对试验设备的要求

两箱法；一箱法；两液槽法。

280

六、环境试验			
冷 热 冲 击 与 温 度 循 环 的 区 别	冷热冲击试验		温度循环试验
	温度变化速率	急剧20~30℃/min	缓慢1~5℃/min
	循环次数	5~10个循环（多至1000循环）	5~10个循环（多至1000循环）
	试验时间	短	长
	用途	1 膨胀系数不同引起的连接部剥离	1 通过长期试验发现腐蚀倾向
		2 膨胀系数不同龟裂后水分进入	2 长时间地多次循环观察应力疲劳现象
3 水分渗入导致腐蚀及短路现象发生的加速试验		3 调查分析市场失效的相关性	
使用设备	冷热冲击试验箱	高低温试验箱	

281

六、环境试验	
湿 热 试 验	<p>•恒定湿热试验</p> <p>恒温恒湿的技术指标包括：温度、相对湿度、试验时间</p> <p>注意产品试验结束后应对样品有1~2小时的恢复期。</p> <p>•循环湿热试验</p> <p>模拟热带雨林的环境，确定产品和材料在温度变化，产品表面产生凝露时的使用和贮存的适应性。常用于寿命试验、评价试验和综合试验。</p> <p>交变湿热的技术指标包括：温度、相对湿度、转换时间、交替次数。</p> <p>注意试验结束后应对样品有1~2小时的恢复期。</p>

282

六、环境试验	
湿 热 试 验	<p>高压蒸煮试验（高压蒸汽恒定湿热试验）</p> <p>高压蒸煮试验采用高压高湿条件，主要考核塑料封装的半导体集成电路和空封器件等电子器件的综合影响，是用高加速的试验方式评价电子产品耐湿热和密封的能力，常用于产品开发、质量评估、失效验证。</p> <p>高压蒸煮试验的技术指标包括：大气压力、相对湿度（饱和或非饱和）、温度、试验时间。</p> <p>常用于塑料封装的半导体器件、集成电路、密封继电器，密封器件等。</p>

283

六、环境试验	
湿 热 试 验	<p>试验方法的选择</p> <p>湿热试验是产品三防（防潮、防霉、防盐雾）评价试验之一，被广泛用于电子电工技术领域。要想得到最经济、易控制、再现性好的试验结果，正确的选用试验方法是非常重要的。</p> <p>(1) 根据产品的受潮机理和吸湿方式选择湿热试验方法。产品是以吸附或吸收水分后而受潮的，一般应采用恒定湿热试验；产品是以凝露或通过呼吸作用加强了湿度对产品的影响的，应采用循环湿热试验；如果产品有渗透作用而无呼吸作用时，则要从实际出发，根据产品的类型及使用条件；适当选用恒定或循环湿热试验。</p> <p>(2) 根据产品本身的特征选择。对于固体实心的产品或绝缘材料，为了检查这些产品在潮湿大气中的电性能或绝缘性能，通常采用恒定湿热试验。对于密封或空心产品，由于热应力的作用引起热胀冷缩导致产品受潮，常采用循环湿热试验。</p> <p>对于固体实心产品在选择试验方法时，应考虑受潮机理，如果受潮是由凝露引起的，应采用循环湿热试验。</p> <p>(3) 根据试验结果的再现性选择。根据国际和国内环境工程的经验得知，对于某些产品，恒定湿热和循环湿热试验的作用效果基本上是一致的。在这种情况下，由于恒定湿热试验操作简单、经济、再现性好，因此应采用恒定湿热试验。</p>

284



六、环境试验

机械振动试验

机械振动试验用来确定机械的薄弱环节，产品结构的完好性和动态特性、常用于型式试验、寿命试验、评价试验和综合试验。

机械振动试验中有一类故障的发生，不在一个特定条件下不会发生，或不在这种特定条件中这种故障不会轻易地被测量出来，或是故障的再现性很差（即很难预测到它何时会发生），因此机械振动试验在许多情况下，产品是需要处于工作状态并连续测试的，例如继电器、连接器、组件、整机等。

机械振动的技术指标包括：扫频频率范围、定频振动频率、振动幅值（位移幅值）、加速度、扫频循环次数、定频时间、方向。

285



六、环境试验

冲击和碰撞

碰撞和冲击一样，是一个非常复杂的物理过程，并且是随机的，能在不同的时间周期上出现。然而由于它们对产品所造成的物理失效不完全相同，为了在试验室内模拟方便起见，才分成冲击试验和碰撞试验二种试验来进行。

- 冲击——峰值加速度较大、脉冲持续时间较短、很少重复出现、相对于产品结构强度来说属极限应力的破坏，造成结构变形，安装松动，产生裂纹甚至断裂，还会使电气连接松动，接触不良，造成时断时通，使产品工作不稳定。
- 碰撞——将那些峰值加速度不大、脉冲持续时间较长、不断重复出现、相对于产品结构强度来说是重复应力的定为碰撞，碰撞试验主要是为了确定产品经受重复碰撞后所引起的累积损伤。

286



六、环境试验

整机试验条件参考

整机试验条件的参考

1、原则上环境试验应针对产品的使用特点、环境条件、以及故障模式、失效机理来确定环境试验的应力，不会存在对所有整机都可行的通用试验条件。

2、对某一具体产品做试验时，所有的试验条件必须以对应的国标、行标为准。确认没有国/行标时，应该根据实现的使用情况选定试验条件，本试验条件仅作参考用。

3、产品的诞生可分为三个阶段，每阶段环境试验应力可以不同，也可相同

设计阶段 可以采用高一些的环境应力，尽可能使用严酷的条件，暴露产品存在的缺陷或潜在的缺陷

小批量生产阶段 环境应力适当降低些

量产阶段 量产阶段的例行试验所采用的环境应力与产品的技术指标相同或略高。

4、整机环境试验中如果样品经过恒定湿热、交变湿热，该样品是不能作为合格品的，其他试验的样品应有选择性的分级。

287



六、环境试验

整机试验条件参考

1. 高温贮存

高温试验的温度必须高于产品技术条件规定的高温工作温度 T_{max} 。研制试验时温度最高（一般取 $T_{max}+20^{\circ}C \sim 30^{\circ}C$ ）、小批量试产试验时温度次之（一般取 $T_{max}+15^{\circ}C \sim 25^{\circ}C$ ）、例行试验最低（一般取 $T_{max}+10^{\circ}C$ ）。

2. 低温贮存

低温试验的温度 T_L 必须低于产品技术条件规定的低温工作温度。通常状况下三个阶段的 T_L 都取 $-40^{\circ}C$ 。

3. 温度循环应力

高温保持温度同高温试验温度；低温保持温度同低温试验温度。

温变率：大于 $1^{\circ}C/min$ ，小于 $5^{\circ}C/min$ 。

循环次数：大于80次（研制试验）。建议： $+10^{\circ}C$ 以上加电（研制试验）

温度保持时间：大于0.5小时（组件）或2小时或中心温度达到试验温度5分钟（整机）。

4. 温度冲击试验

高温保持温度同高温试验温度；低温保持温度同低温试验温度。

温变率：大于 $20^{\circ}C/min$ ；

循环次数：20次

温度保持时间：大于0.5小时（组件）或2小时（整机）

288



六、环境试验

5. 恒定湿热应力

恒定湿热应力采用标准为温度 $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ；湿度为 $90\% \pm 3\%$ ；试验时间为24~96小时。全天候产品要加电。

6. 扫频振动的应力

频率范围10~55Hz；恒定振幅0.35mm。

扫频速率每分钟1个倍频程。

试验方向X、Y、Z，每方向25分钟。

7. 冲击振动的应力

半正弦波，脉冲宽度11ms。

冲击强度30g；冲击方向X、Y、Z，共6方向，每方向3次。

8. 模拟汽车运输的应力

按实际发货的要求包装和装载。用载重汽车在三级公路上以20~40公里时速跑200公里，或在模拟汽车运输台上振动90min。



电子类环境试验标准

国标GB2421-99 “电工电子产品基本环境试验规程 总则”

国标GB2422-95 “电工电子产品环境试验 术语”

国标GB2423.1~GB2423.44全部为试验方法，具体环境试验的标准可以参照单项的试验规范，以下为国标提供的44种环境试验的其中4种

GB2423.1-89 试验A: 低温试验方法

GB2423.2-89 试验B: 高温试验方法

GB2423.3-93 试验Ca: 恒定湿热试验方法

GB2423.4-93 试验Db: 交变湿热试验方法

国标GB2424.1~GB2424.25为试验导则，如果需要制定环境试验方案，相关的试验导则是需要了解的。

国标GB/T 4796规定了“环境参数分类及其严酷程度分级”；

国家军用标准 GJB-150

国际电工委员会标准 IEC-68

美国军用标准 MIL-STD-810



谢谢各位

本教材的大部分图片和实例取材于信息产业部
电子第五研究所研究分析中心试验室

教材的编制工作得到本试验室同事的帮助，在
此对各位的支持深表感谢

