

可靠性基础



制作：纪玉金 日期：2005-1-1

深圳市核达中远通电源技术有限公司

SHENZHEN HOLDLUCK-ZYT POWER SUPPLY TECHNOLOGY CO., LTD.

目 录

第一节.可靠性基本术语及定义.....	3
一、可靠性定义.....	3
二、研究可靠性的意义.....	3
三、可靠性的研究内容.....	4
四、可靠性指标.....	4
第二节、可靠性相关计算.....	7
一、可靠性分布.....	7
二、筛选强度.....	8
三、可信度系数和加速因子计算.....	8
四、MTBF计算.....	10
第三节、可靠性试验.....	11
一、环境试验.....	11
1、低温试验.....	12
3、高温试验.....	14
5、温度循环.....	15
6、交变湿热.....	16
7、振动试验.....	16
8、包装自由跌落试验.....	19
9、其它试验.....	19
二、EMC试验.....	20
三、HALT和HASS试验.....	20
1、什么是HALT试验.....	20
2、HALT的常用的概念.....	20
3、HALT试验步骤.....	21
4、什么是HASS试验.....	23
5、什么样的产品要做HASS.....	23
6、筛选方法.....	23
四、验证试验.....	23
1、基本定义.....	23
2、序贯试验方案.....	24
3、定时截尾试验方案.....	24
4、全数试验方案.....	25
五、可靠性增长试验.....	25
1、可靠性增长试验的定义及目的.....	25
2、可靠性增长的试验方法.....	25
3、增长的模型.....	26
第四节、可靠性设计.....	27
一、可靠性模型图.....	27
二、可靠性分配.....	29
三、可靠性预计.....	32
四、降额设计.....	33

第一节.可靠性基本术语及定义

一、可靠性定义

一般所说的“可靠性”指的是“可信赖的”或“可信任的”。我们说一个人是可靠的，就是说这个人是在说得到做得到的人，而一个不可靠的人是一个不一定能说得到做得到的人，是否能做到要取决于这个人的意志、才能和机会。同样，一台仪器设备，当人们要求它工作时，它就能工作，则说它是可靠的；而当人们要求它工作时，它有时工作，有时不工作，则称它是不可靠的。根据国家标准的规定，产品的可靠性是指：产品在规定的条件下、在规定的时间内完成规定的功能的能力。

我国的可靠性工作起步较晚，20世纪70年代才开始在电子工业和航空工业中初步形成可靠性研究体系，并将其应用于军工产品。其他行业可靠性工作起步更晚，差距更大，与先进国家差距20~30年，虽然国家已制订可靠性标准，但尚未引起所有企业的足够重视。

对产品而言，可靠性越高就越好。可靠性高的产品，可以长时间正常工作（这正是所有消费者需要得到的）；从专业术语上来说，就是产品的可靠性越高，产品可以无故障工作的时间就越长。

二、研究可靠性的意义.

对于产品来说,可靠性问题和人身安全,经济效益密切相关.因此,研究产品的可靠性问题,显得十分重要.非常迫切.

1)提高产品可靠性,可以防止故障和事故的发生,尤其是避免灾难性的事故发生.86年1月28日,美航天飞机”挑战者号”由于1个密封圈失效,起飞76S后爆炸,其中7名宇航员丧生,造成12亿美元的经济损失;92年我国发射”澳星号”时由于一个小小零件的故障,发射失败,造成了巨大的经济损失和政治影响到.

2) 提高产品的可靠性,能使产品总的费用降低.提高产品的可靠性,首先要增加费用,如选用好的元器件,研制部分冗余功能的电路及进行可靠性设计、分析、实验,这些都需要经费.然而,产品可靠性的提高使得维修费及停机检查损失费大大减小,使总费用降低.

3) 提高产品的可靠性,可以减少停机时间,提高产品可用率,一台设备可顶几台用,可以发挥几倍的效益.美国GE公司经过分析认为,对于发电、冶金、矿山、运输等连续作业的设备,即使可靠性提高1%,成本提高10%也是合算的.

4) 对于公司来讲,提高产品的可靠性,可以改善公司信誉,增强竞争力,扩大市场份额,从而提高经济效益。

三、可靠性的研究内容

可靠性工程是为了保证产品在设计、生产及使用过程中达到预定的可靠性指标,应该采取的技术及组织管理措施。这是介于技术和管理科学之间的一门边缘学科,可靠性作为一门工程学科,它有自己的体系、方法和技术。

1) 可靠性管理:完善可靠性组织结构,规划出可靠性组工作的目标制定出相应的流程,规范可靠性工作,监督可靠性工作的实施培训可靠性知识,增强质量意识,规避设计风险。

2) 可靠性设计:通过设计奠定产品的可靠性基础.研究在设计阶段如何预测和预防各种可能发生的故障和隐患.

3)可靠性试验及分析:通过试验测定和验证产品的可靠性,研究在有限的样本、时间和使用费用下,如何获得合理的评定结果,找出薄弱环节,并研究导致薄弱环节的内因和外因,研究导致薄弱环节的机理,找出规律,提出改进措施提出以提高产品的可靠性。

4) 制造阶段的可靠性:研究制造偏差的控制、缺陷的处理和早期故障的排除,保证设计目标的实现。

四、可靠性指标

衡量产品可靠性水平有好几种标准,有定量的,也有定性的,有时要用几种标准(指标)去度量一种产品的可靠性,但最基本最常用的有以下几种标准。

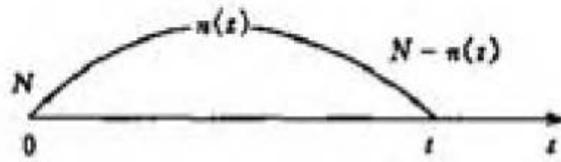
1.可靠度 $R(t)$:它是产品在规定条件和规定时间内完成规定功能的概率。一批产品的数量为 N ,从 $t=0$ 时开始使用,随着时间的推移,失效的产品件数逐渐增加,而正常工作的产品件数 $n(t)$ 逐渐减少,用 $R(t)$ 表示产品在任意时刻 t 的可靠度。

$$R(t) = \frac{N - n(t)}{N}$$

N : 试验样品总数 $n(t)$:到 t 时刻样品失效的总数

由上式可看出 $0 \leq R(t) \leq 1$,因此 $R(t)$ 越接近于 1,产品的可靠度越高。

假如在 $t = 0$ 时有 N 件产品开始工作, 而到 t 时刻有 $n(t)$ 个产品失效, 仍有 $N - n(t)$ 个产品继续工作(见图 2.1), 则 $R(t)$ 的估计值为



$$R(t) = \frac{\text{到时刻 } t \text{ 仍在正常工作的产品数}}{\text{试验的产品总数}} = \frac{N - n(t)}{N}$$

例 1: 10 个电源模块, 工作了 1 年后坏了 2 台, 它的可靠度为多少?

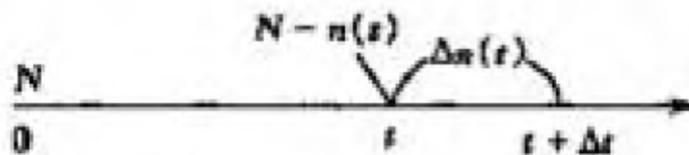
显然, 不可靠度

$$F(t) = \frac{n(t)}{N} = 1 - R(t)$$

可靠度加上不可靠度等于 1, 即 $R(t) + F(t) = 1$

2. 失效率 (故障率) $\lambda(t)$: 它是指某产品 (零部件) 工作到时间 t 之后, 在单位时间 Δt 内发生失效的概率

$$\lambda(t) = \frac{\text{在时间}(t, t + \Delta t)\text{ 内每单位时间失效的产品数}}{\text{在时刻 } t \text{ 仍正常工作的产品数}} = \frac{\Delta n(t)}{(N - n(t))\Delta t}$$



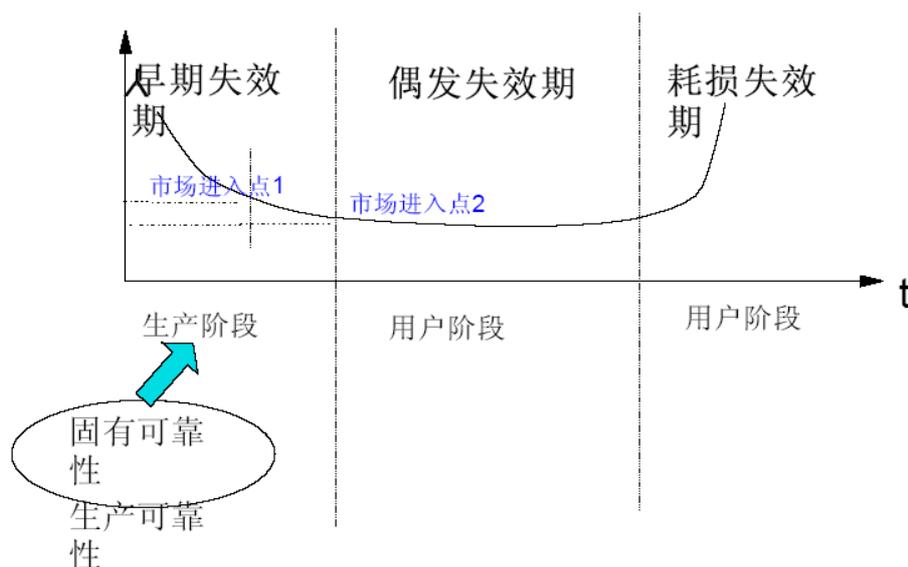
失效率单位: $\lambda(t)$ 对目前具有高可靠性的产品来说, 需用更小的单位来作为失效率的基本单位, 采用一个菲特 (Fit) 来定义, $1 \text{ Fit} = 10^{-6}/10^3 \text{ h} = 10^{-9} \text{ h}$ 它的意义是每 1000 个产品工作 10^6 h , 只有一个失效。

失效率曲线 (浴盆曲线 Bath-tub-curve): 产品的失效率随工作时间的变化具有不同的特点, 根据长期以来的理论研究和数据统计, 发现多数设备失效率曲线形同浴盆的剖面, 它明显地分为三段, 分别对元器件的三个不同阶段或时期。

第一阶段是早期失效期 (Infant Mortality); 表明器件在开始使用时, 失效率很高, 但随着产品工作时间的增加, 失效率迅速降低, 这一阶段失效的原因大多是由于设计、原材料和制造过程中的缺陷造成的。

为了缩短这一阶段的时间, 产品应在投入运行前进行试运转, 以便及早发现、修正和排除故障; 或通过试验进行筛选, 剔除不合格品

电子产品的失效特性曲线



第二阶段是偶然失效期,也称随机失效期(Random Failures);这一阶段的特点是失效率较低,且较稳定,往往可近似看作常数,产品可靠性指标所描述的就是这个时期,这一时期是产品的良好使用阶段,由于在这一阶段中,产品失效率近似为一常数,故设 $\lambda(t)=\lambda$ (常数) 由可靠度计算公式得:

$$R(t) = \text{EXP}\left(-\int_0^t \lambda(t)dt\right) = e^{-\lambda t}$$

这一式表明设备的可靠度于失效率成指数关系.

第三阶段是耗损失效期(Wearout);该阶段的失效率随时间的延长而急速增加,主要原因是器件的损失已非常的严重,寿命快到尽头了,可适当的维修或直接更换了.

3.平均无故障工作时间 MTBF(Mean Time Between Failure); 是指相邻两次故障之间的平均工作时间,也称为平均故障间隔。它仅适用于**可维修产品**。同时也规定产品在总的使用阶段累计工作时间与故障次数的比值为 MTBF。

$$MTBF = \frac{\text{总的工作时间}}{\text{故障数}} = \frac{1}{\lambda}$$

思考题:

- 1 产品的可靠性定义是什么?
- 2 提高产品的可靠性有哪几方面的重要意义.
- 3 度量一种产品的可靠性常用的指标是什么.

第二节、可靠性相关计算

一、可靠性分布

1 指数分布

这种分布是可靠性工作中最重要的一种分布,并且几乎是专门用于电子设备可靠性预计的一种分布.它描述瞬时故障率是常数的情况.

这种模型的一些具体应用有:

- 1)其故障率随着工作时间的增长没有很大变化的产品;
- 2)没有过多余度的复杂的可修复设备;
- 3)在某一合理的时间内经过进行老化面消除早期故障或固有故障的设备

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

例 2.1 某计算机故障率是恒定的,若每 17 天发生一次错误,设有一个需要 5 小时才能解决的问题,问该计算机解决问题的可靠度是多少?

$\theta = 17 * 24 = 408$ 小时 $\lambda = 1 / \theta = 1 / 408 = 0.0024$ 错误数/小时

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0.0024 * 5} = 0.99$$

2 标准正态分布

对可靠性来说,正态分布有两种用途:

- 1) 用于分析由于磨损(如机械装置)而发生的帮障产品.(磨损故障往往最接近正态分布)
- 2) 对制造的产品及性能是否符合规范进行分析.

例 2.2 现已证明微波发射管服从正态分布,其均值 μ 为 5000 小时,标准差 σ 为 1500 小时, 试求出当任务时间为 4100 小时时,这种管子的可靠度?

$$R(t) = P\left(z > \frac{t - \mu}{\sigma}\right)$$

$$\begin{aligned} R(4100) &= P\left(z > \frac{4100 - 5000}{1500}\right) \\ &= P(z > -0.6) = 1 - P(z < -0.6) \\ &= 1 - 0.27 = 0.73 \end{aligned}$$

3、威布尔分布; 与指数分布相比, 只是变量 λ 不一样。威布尔分布的 $R(t) = e^{-(t/a)^b}$; 当 $b=1$ 时, $R(t) = e^{-(t/a)}$

二、筛选强度

在进行环境应力筛选设计时，要对所设计的方案进行强度计算。这样才能更有效的析出产品缺陷。在典型筛选应力选择时，一般恒定高温筛选用于元器件级，温度循环用于板级以上产品；温度循环的筛选强度明显高于恒定高温筛选。下面介绍一些筛选强度（SS）的数学模型。

1、恒定高温筛选强度

$$SS=1-\exp[-0.0017(R+0.6)^{0.6}t]$$

式中：R—高温与室温(一般取 25℃)的差值；t—恒定高温持续时间(h)；

例 2.3：用 85℃对某一元器件进行 48H 的筛选，则其筛选强度为： $61.6\% = 1 - \text{EXP}(-0.0017*((60+0.6)^{0.6}*48)$ ；

2、温度循环的筛选强度

$$SS=1-\exp\{-0.0017(R+0.6)^{0.6}[\text{Ln}(e+v)]^3N\}$$

式中：R—温度循环的变化范围（℃）；V—温变率（℃/min）；N—温度循环次数；

例 2.4：用 60℃到-40℃以 10℃/min 的速率做 15 次循环（每个循环 20min，15 个共计 5H）则对应的筛选强度为：

$99.87\% = 1 - \text{EXP}(-0.0017*((100+0.6)^{0.6}*(\ln(2.718+10))^3*15)$ ；

3、随机振动的筛选强度

$$SS=1-\exp\{-0.0046(G_{\text{rms}})^{1.71}\cdot t\}$$

式中：t—为振动时间（min）；Grms---单位振动加速度均方根值 m/s^2

三、可信度系数和加速因子计算

1. 可信度系数 A

测试时间=A×MTBF，根据给定的 MTBF 值,确定出可信度系数 A,就可算出需测试的时间了.

$$A=0.5 \times \chi^2(1-a, 2(r+1))$$

$\chi^2(1-a, 2(r+1))$ 是自由度为 $2(r+1)$ 的 X 平方分布的 $1-a$ 的分位数；

a 是要求的信心度； r 是允许的失效数，由你自己决定

例 2.5 某种产品，要求在 90%的信心度,允许失效 1 个下的可信度系数 A?

此分布值可以通过 EXCEL 来计算，在 EXCEL 中对应的函数为 CHIINV；
允许失效 1 次时, $A=0.5 \times \text{CHIINV}(1-0.9, 2*2) = 0.5 \times \text{CHIINV}(0.1, 4) = 0.5 \times 7.78 = 3.89$

2. 加速因子 Accelerated Factor

对于某些测试时间较长的试验,若按常规的方法去做,则耗时耗力,使用加速试验,可以加快试验时间,节约试验经费.常用有阿列纽斯(Arrhenius Model)和

1) Arrhenius Model(热-压效应)

$$A_{ft} = \exp\left[\frac{Ea}{k} \times \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t}\right)\right] \quad A_{fv} = \exp[\beta \times (V_t - V_u)]$$

$$AF = \exp\left[\frac{Ea}{k} \times \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t}\right)\right] \times \exp[\beta \times (V_t - V_u)]$$

AF:加速因子 Ea:激活能 Tu:使用环境温度 Tt:试验环境温度
 β :电压加速度常数(经验值) Vu:使用电压 Vt:试验电压.
 $k=8.6171 \times 10^{-5} \text{eV}$

阿列纽斯(Arrhenius Model)由热和电压加速度组成,可独立使用,也可组合.广泛用于建立产品寿命与温度的关系模型.这一关系式用于表示某个失效机理对温度的敏感度和产品的热加速因数

Ea 根据原材料的不同,有不同的取值,一般情况下:

氧化膜破坏	0.3eV
离子性(SiO ₂ 中Na离子漂移)	1.0—1.4eV
离子性(Si-SiO ₂ 界面的慢陷阱)	1.0eV
由于电迁移而断线	0.6eV
铝腐蚀	0.6—0.9eV
金属间化合物生长	0.5—0.7eV

下表是根据不同器件的Ea值:

Example:

	Ea (eV)	N		Ea (eV) x N
Transformers	0.5	1	0.5	
Resistors	0.56	63	35.28	
R-Pacs	0.56	3	1.68	
Inductors	0.56	2	1.12	
Capacitors	0.6	30	18	
Linear Modules	0.7	9	6.3	
Diodes	1	14	14	
Transistors	1	10	10	
	共计:	132	86.88	0.65818182

2) 温度-湿度效应(Hallberg-Peck)

$$Af = \left(\frac{RH_t}{RH_u}\right)^3 \times \exp\left[\frac{Ea}{k} \times \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t}\right)\right]$$

RHu:相对湿度下的使用环境; RHt:相对湿度下的测试环境.

其它参数同上.

这一式子常用于估计温、湿度效应的加速度因子.该模型也可用于无偏压 HAST 试验。

根据不同的环境和失效机理来选择各种模型，当然还有其它的加速模型，参考其它文献。

附：不同状态下的失效机理：

I. 电压加速的失效机理：即时间相关介质击穿、栅氧化缺陷、电荷增益等（偏压寿命试验 EIA JESD-22-A108）

II. 温度循环（EIA JESD-22-A104）失效机理：芯片开裂、芯片上的短路开路、钝化层开裂、芯片连接上的空隙、塑料封装开裂/裂纹、线焊焊盘凹孔、线焊金属间化合物过量、焊点不良。

III 高压蒸煮（EIA JESD-22-A102）失效机理：金属化腐蚀、潮湿进入和分层。

IV. 温湿度偏压（EIA JESD-22-A10）失效机理：电解/电池腐蚀、分层和开裂延伸。常见的失效位置包括指状引脚与封装材料、线焊、焊盘以及芯片金属化之间的接合面。

VI. 高加速应力试验（EIA JESD-22-A110）：这一试验是要加速有关金属化腐蚀、材料界面处的分层、线焊失效和绝缘电阻下降的失效机理。（将在以后详解半导体的可靠性及退化机理）

四、MTBF 计算

1、基本 MTBF 的计算

在实际工作过程中，很多时候并不需要精确在知道某个产品的 MTBF，只需要知道是否可以接受此产品。这时，只需要对产品进行模拟运行测试，当产品通过了测试时，就认为产品达到了要求的 MTBF，可以接受此产品。

如何确定产品应该进行什么样的测试，也就是我们应该用多少样品进行多长时间测试？根据 MTBF（平均失效间隔时间）的定义，从“平均”这一个看来，失效的次数越多计算值就越能代表“平均值”，当然失效的次数越多对应的总测试时间也就越长；一般情况下要求：只要测试时间允许，失效的次数就应该取到尽可能地多。

例:某种产品，要求在 90%的信心度下 MTBF 为 20000H，因单价较贵，只能提供 10 台左右的产品做测试，请问如何判定此产品的可靠性是否达到规定的要求？

小提示:在测试中若预估出测度时间较长,一般可增加台数,这样总的台时数增加,测试时间有所降低;也可使用上面介绍的加速试验. 对一般电子产品而言，多用高热加速，有时也用高温高湿加速。

若允许一次失效，在 90%的置信度下，需要测试的时间为： $T_{test}=A*MTBF$ ，

$$Af = \left(\frac{RHt}{RHu}\right)^3 \times \exp\left[\frac{Ea}{k} \times \left(\frac{1}{Tu} - \frac{1}{Tt}\right)\right]$$

A 的计算同上用 EXCEL 计算，即： $A=0.5*CHIINV(1-0.9,2*2)=0.5*CHIINV(0.1,4)$
 $=0.5*7.78=3.89$

根据产品的特性，取 Ea 为 0.6eV，则在 75℃下做测试 1h，相当于在室温 25℃的加速倍数为：

$$Aft = \exp\left[\frac{Ea}{k} \times \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t}\right)\right] = \exp\left[\frac{0.6 \times 10^5}{8.617} \times \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{348}\right)\right] = 28.9$$

所以要求的室温下的测试时间为： $T_u = 3.89 \times 20000 = 77800\text{H}$ ；

换算后，在高温下的测试时间为： $T_t = 77800 / 28.9 = 2692\text{Hrs}$ ；

最后，测试方案就是：将 10 台设备在 75℃ 的下进行 2269.2Hrs 的测试，如果失效次数小于或等于一次，就认为此产品的 MTBF 达到了要求。

2 根据器件总的失效率来计算 MTBF

下面简单介绍几个器件的失效率的计算公式,可详见 GJB299B 和 MIL-HDBK-217F 等相关预计标准.

晶体管失效率.

$$\lambda_p = \lambda_b * \pi_Q * \pi_E$$

电解电容失效率

$$\lambda_p = \lambda_b * \pi_{CV} * \pi_Q * \pi_E$$

λ_p : 器件失效率

λ_b : 器件基本失效率

π_S : 应力系数

功率快恢复二极管失效率

$$\lambda_p = \lambda_b * \pi_T * \pi_S * \pi_C * \pi_Q * \pi_E$$

连接器 PCB 的失效率

$$\lambda_p = \lambda_b * \pi_K * \pi_P * \pi_E$$

π_Q : 质量系数

π_E : 环境系数

π_T : 温度应力系数

π_C : 结构系数

π_K : 种类系数

π_{CV} : 电容量系数.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_{\text{总}}}$$

将所有器件的失效率类加起来得到总的失效率,其倒数即为 MTBF 值,一般情况下可用 EXCEL 表格制作出 MTBF 计算表,现多用可靠性分析统计类软件来计算.

第三节、可靠性试验

可靠性试验通常分为工程试验与统计试验两大类。工程试验的目的在于暴露产品的可靠性缺陷并采取纠正措施加以排除，在试验过程中，如果产品出现可靠性缺陷，需要对失效原因进行分析，采取有效的措施予以修复或纠正，提高产品的可靠性。统计试验的目的在于确定产品的可靠性，而不是暴露产品的可靠性缺陷。当然，对于在统计试验中暴露出来的重大缺陷，承制方有责任找到原因并采取纠正措施。

一、环境试验

环境试验是由于产品在使用过程中，有不同的使用环境（有些安装在室外、有些随身携带、有些装有船上等等），会受到不同环境的应力（有些受到风吹雨湿、有些受到振动与跌落、有些受到盐雾蚀侵等等）；为了确认产品能在这些环境下正常工作，国标、行标都要求产品在环境方法模拟一些测试项目，这些测试项目包括：

- | | |
|-------------|-------------|
| 1). 高温测试; | 2). 低温测试 |
| 3). 高低温交变测试 | 4). 高温高湿测试 |
| 5). 机械振动测试 | 6). 机械冲击测试; |
| 7). 开关电测试; | 8). 电源拉偏测试; |
| 9).冷启动测试; | 10).盐雾测试; |
| 11).淋雨测试; | 12).尘砂测试; |

说明: 上面 12 项比较全面地概括了产品在实际使用过程中碰到的外界环境; 实际测试时, 因为各产品本身属性的相差较远、使用环境相差也很大, 公司可以根据产品的特点, 适当选取、增加一些项目来测试 (此产品对应的国/行标中要求的必测试项目, 当然是必须测试的); 也可以根据产品特定的使用环境与使用方法, 自行设计一些新测试项目, 以验证产品是否能长期工作。

筛选强度: 二战期间美空军调查: 由环境引起的产品损坏占52%, 其中温度占21%, 振动占14%, 潮湿占10%, 砂尘盐雾占7%。

60年代对环境试验的研究已趋成熟, 并逐步形成相应规范, 目前基础通用类主要有:

民用产品: IEC68-2/3 (GB2423/2424)

军用产品: MIL-STD-810F (GJB150)

失效机理:

- ◆ 电压加速的失效机理: 即时间相关介质击穿、栅氧化缺陷、电荷增益等 (偏压寿命试验 EIA JESD-22-A108)
- ◆ 温度循环 (EIA JESD-22-A104) 失效机理: 芯片开裂、芯片上的短路开路、钝化层开裂、芯片连接上的空隙、塑料封装开裂/裂纹、线焊焊盘凹孔、线焊金属间化合物过量、焊点不良。
- ◆ 高压蒸煮 (EIA JESD-22-A102) 失效机理: 金属化腐蚀、潮湿进入和分层。
- ◆ 温湿度偏压 (EIA JESD-22-A10) 失效机理: 电解/电池腐蚀、分层和开裂延伸。常见的失效位置包括指状引脚与封装材料、线焊、焊盘以及芯片金属化之间的接合面。
- ◆ 高加速应力试验 (EIA JESD-22-A110): 这一试验是要加速有关金属化腐蚀、材料界面处的分层、线焊失效和绝缘电阻下降的失效机理

失效机理对分析产品是如何失效的起很大的帮助作用. 其它方面详见下面的各试验对产品的影响介绍.

本节介绍常用的内置电源环境试验测试要求

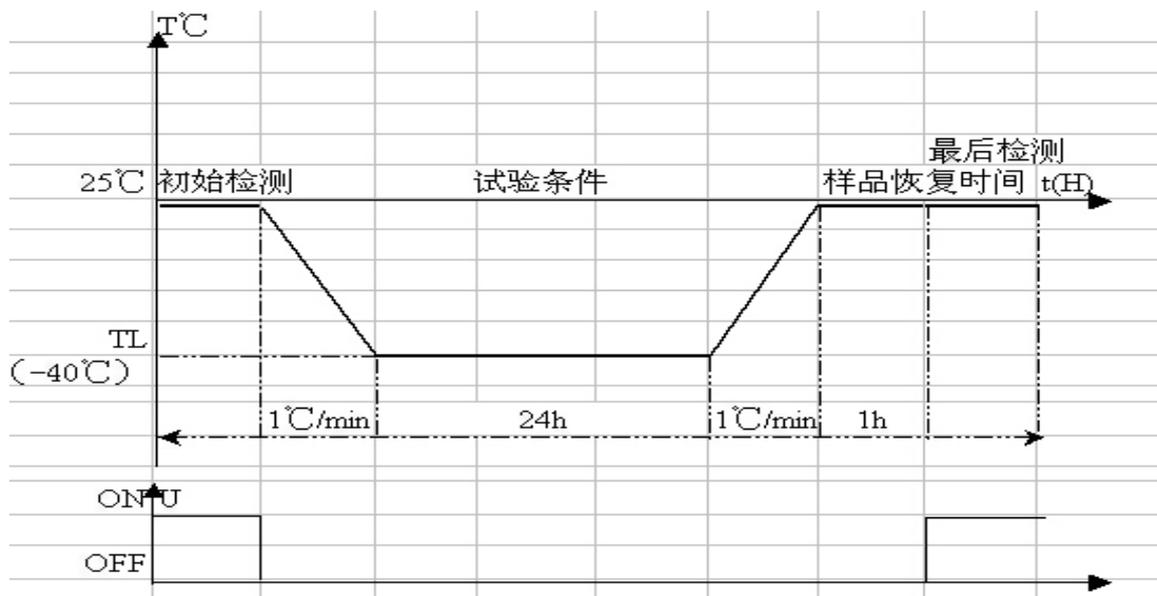
1、低温试验

1) 低温对产品的影响

- 橡胶等柔韧性材料的弹性降低, 并产生破裂;
- 金属和塑料脆性增大, 导致破裂或产生裂纹;
- 由于材料的收缩系数不同, 在温变率较大时, 会引起活动部件卡死或转动不灵;
- 润滑剂粘性增大或凝固, 活动部件之间摩擦力增大, 引起动作滞缓, 甚至停止工作;
- 元器件电参数发生变化, 影响产品的电性能;
- 结冰或结霜引起产品结构破坏或受潮等。

2) 低温贮存试验

采用标准 GB/T 2423.1-1989 试验条件/参数: -40°C, 24H
试验曲线:



低温测试的温度 TL 必须低于产品技术条件规定的低温工作温度。研发测试最低，样机测试次之，例行测试最高；通常状况下三个阶段的 TL 都取 -40°C 。

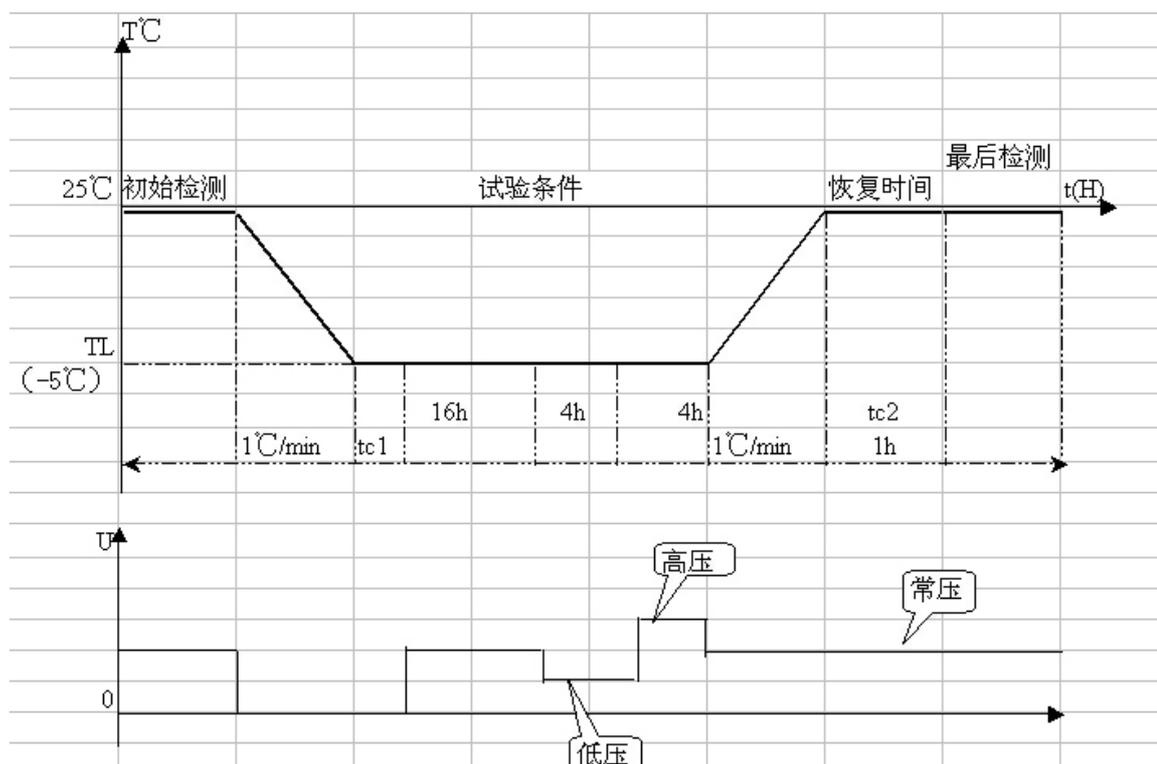
3) 低温工作试验

采用标准 GB/T 2423.1-1989 试验条件/参数： -5°C , 24h 电压范围: U1 低压~U2 常压~U3 高压, 注: 常见高、低、额定电压定义: (U1、U2 和 U3 以下类同)

- 1) 直流输入电源: U1=38.4Vdc (低压) U2=48Vdc (常压) U3=72Vdc (高压)
- 2) 交流宽输入 (90V-264Vac): U1=100Vac (低压) U2=220Vac (常压) U3=264Vac (高压)
- 3) 交流窄输入 (110Vac): U1=88Vac (低压) U2=110Vac (常压) U3=132Vac (高压)
- 4) 交流宽输入 (220Vac): U1=176Vac (低压) U2=220Vac (常压) U3=300Vac (高压)

其中 3,4 条的高低电压值可根据实际情况而定

试验曲线:



3、高温试验

1) 高温对产品的影响

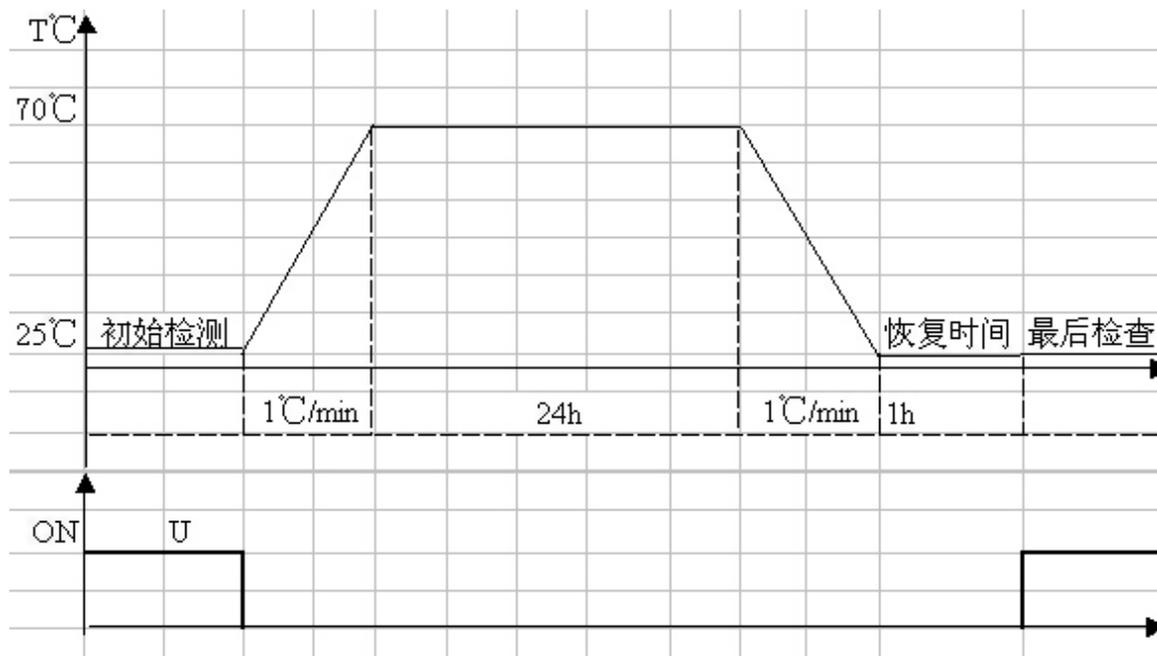
- 由于各种材料的膨胀系数不同，导致材料之间的粘结和迁移；
- 润滑剂流失或润滑性能降低，增加活动部件之间的磨损；
- 密封填料、垫圈、封口、轴承和旋转轴等的变形；
- 由于粘结引起机械失灵或完全失效；
- 元器件电参数发生变化，影响产品的电性能
- 变压器、机电组件过热；
- 易燃或易爆材料引起燃烧或爆炸；
- 密封件内部压力增高引起破裂；
- 有机材料老化、变色、起泡、破裂或产生裂纹；
- 绝缘材料的绝缘性能降低。

2) 高温存贮

采用标准 GB/T 2423.2-1989 试验条件/参数: +70°C, 24h

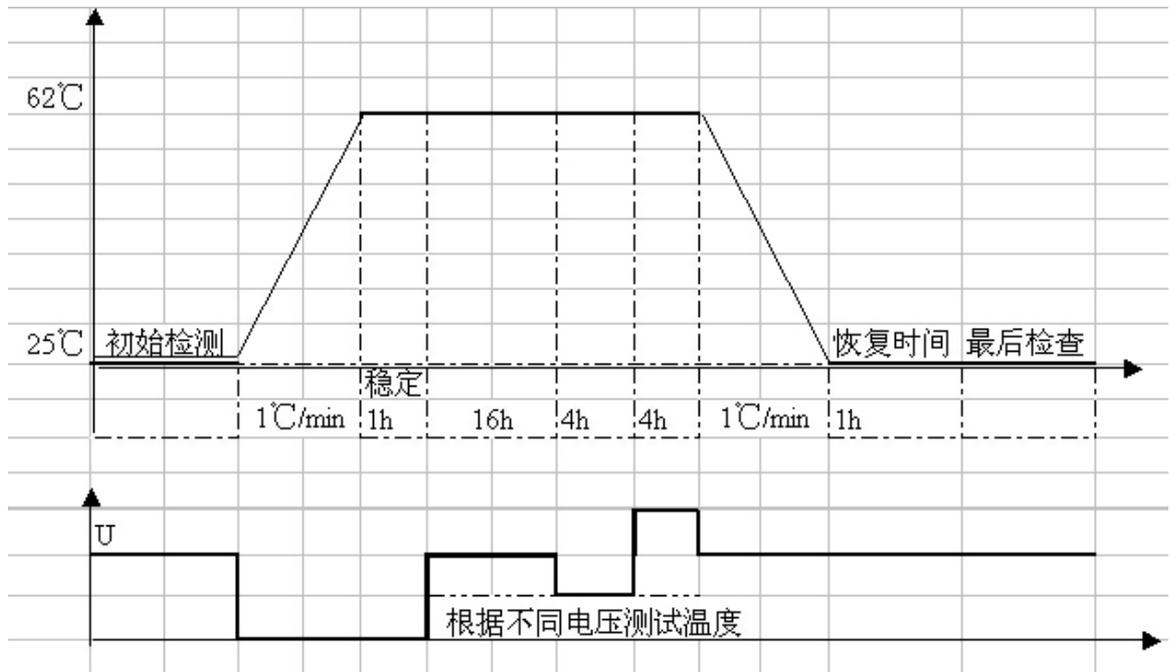
高温测试的温度 TH 必须高于 Tmax (Tmax 指产品技术条件规定的高温工作温度)。

开发测试时温度最高(一般取 Tmax+20°C)、小批量试产测试时温度次之(一般取 Tmax+15°C)、例行测试最低(一般取 Tmax+10°C)



3) 高温工作

采用标准 GB/T 2423.2-1989 试验条件/参数: +62°C, 24H 电压范围:U1 低压~U2 常压~U3 高压。



5、温度循环

1) 温度变化对产品的影响

- 元器件涂覆层脱落、灌封材料和密封化合物龟裂甚至破密封外壳开裂、填充料泄漏等，使得元器件电性能下降；
- 由不同材料构成的产品，温度变化时产品受热不均匀，导致产品变形、密封产品开裂、玻璃或玻璃器皿和光学器等破碎；
- 较大的温差，使得产品在低温时表面会产生凝露或结霜，在高温时蒸发或融化，如此反复作用的结果导致和加速产品的腐蚀。

2) 温度循环试验

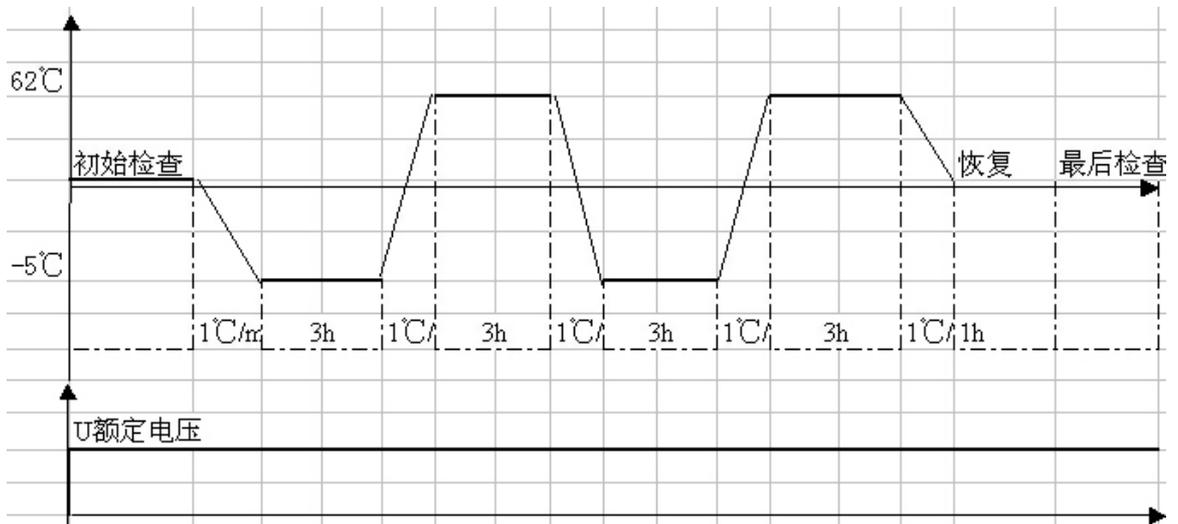
采用标准 GB/T 2423.22-1989 试验条件/参数：(-5°C~+62°C, 1°C/MIN), 极端值保持各3H, 2个循环

高温保持温度同高温测试温度；低温保持温度同低温测试温度。

温变率大于 1°C/min, 但应小于 5°C/min。

循环次数大于 2 次（开发测试）或 8 次（小批量测试）。

温度保持时间大于 0.5 小时（对无外壳单板）或 2 小时（对整机）。



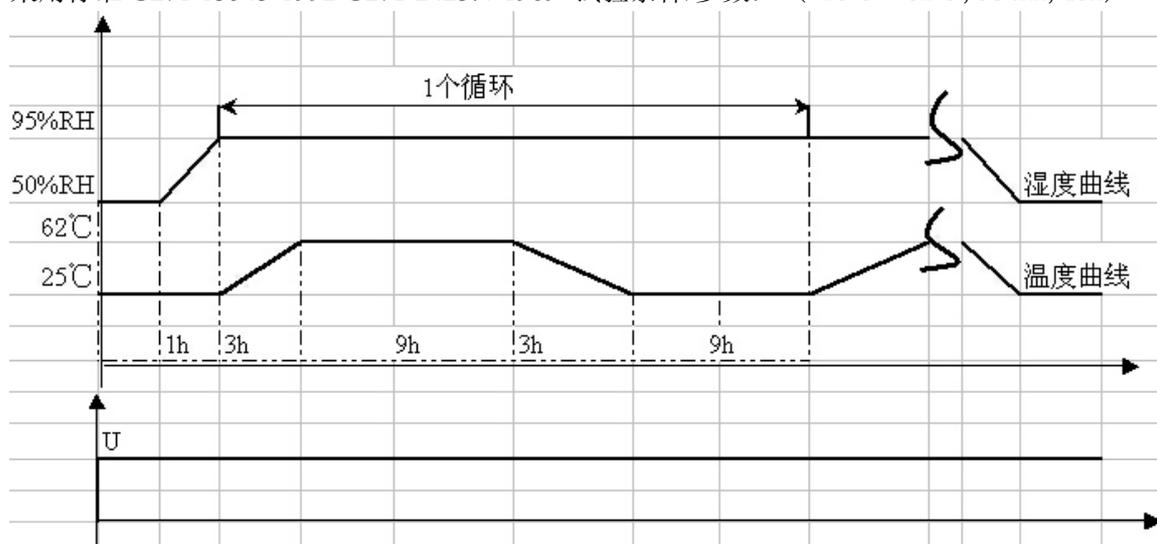
6、 交变湿热

1) 湿热对产品的影响

- 潮湿环境可以引起材料的机械性能和化学性能的变化，如体膨胀、机械强度降低等。
- 由于吸潮，使密封产品的密封性能降低或遭破坏、产品表面涂敷层剥落、产品标记模糊不清等。
- 由于凝露和吸附作用，使绝缘材料的表面绝缘电阻下降。
- 由于水分的吸收和扩散作用，使绝缘材料的体积电阻下降，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。
- 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、汗渍等污染物质而引起间接的化学和电化学腐蚀作用。
- 对于不同的金属材料、金属和非金属材料之间，即使在没有污染物质存在的条件下，只要有适宜的湿度条件或有凝露，由于化学或电化学反应的结果，也会引起不同程度的腐蚀。

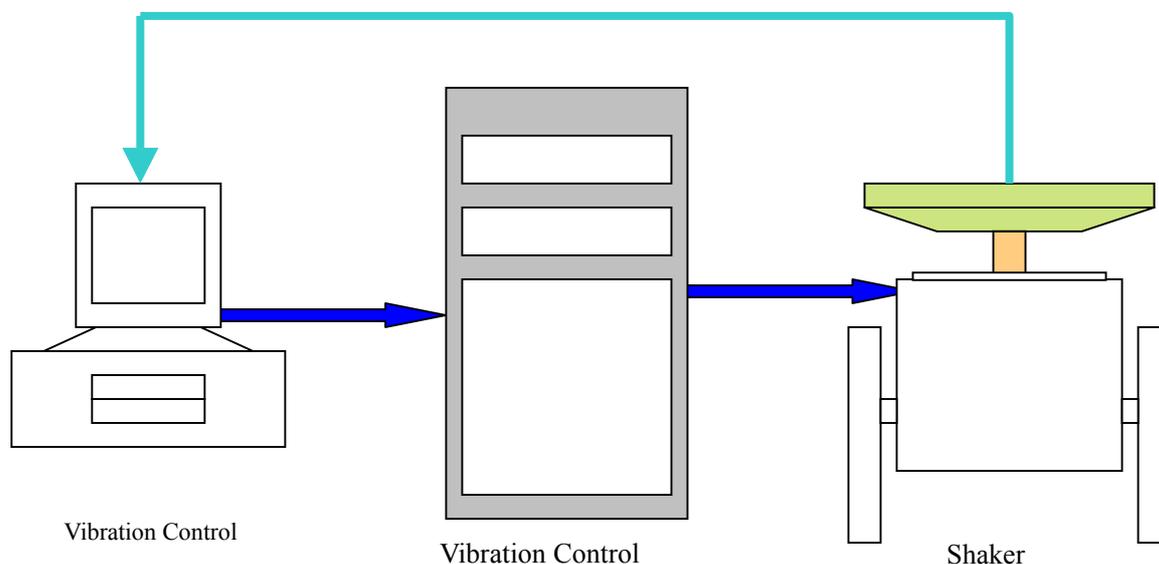
2) 交变湿热试验

采用标准 GB/T 13543-1992 GB/T 2423.4-1989 试验条件/参数： (+25℃~+62℃, 95%RH, 48H)



7、 振动试验

1) 振动试验机介绍



上图就是一个简单的振动试验系统，其动作方式为：我们先在振动控制器（Vibration Control）输入试验条件，控制器就将讯号送到放大器(Amplifier)，放大器再将讯号放大去推动

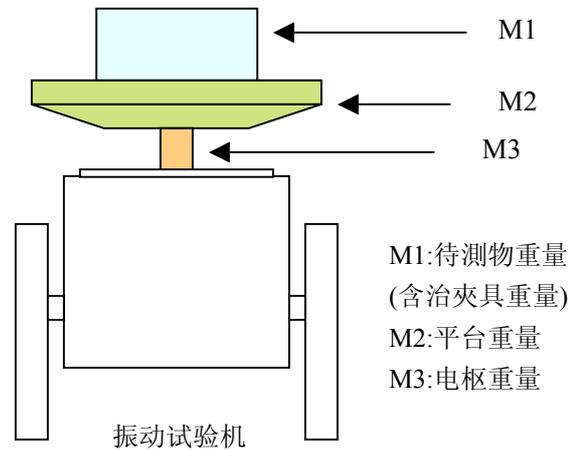
振动机(Shaker), 使振动机产生振动;

推力计算: $F=(M1+M2+M3)*a*1.3$

质量(Kg) 加速度(G) 安全欲度

以一个待测物 210Kg, 平台重量 200Kg,
电枢重量 50kg, 加速度 1.3G 做计算

$$\begin{aligned} \text{推力 } F &= (210+200+50)*1.3*1.3 \\ &= 778 \text{ Kgf} \end{aligned}$$



承载重量:

一般振动试验机有其荷重上的限制, 而此荷重在大型试件上尤其重要, 通常制造商会告知振动试验机的最大荷重, 而此时所指最大荷重即为 $M1+M2$ 不可超过的重量, 例如: 一振动试验机的最大荷重为 300kg, 如平台 $M2$ 重 260kgw, 则 $M1$ 就不可超过 40kgw

位移计算:

振动试验机的位移量, 也是选择振动试验机的一个重要参数, 由以下近似的公式可计算出我们所需的位移量要多少

$$D_{p-p} (mm) \cong \frac{A}{0.002 \times f^2} \quad A: \text{加速度}(G_{\text{peak}}) \quad f: \text{频率}(Hz)$$

例.一振动试验条件为频率 10~500Hz、加速度 10 G

$$D_{p-p} (mm) \cong \frac{10}{0.002 \times 10^2} = 50mm \quad \text{故我们要选择位移量在 } 50mm \text{ 以上的振动机}$$

振动机控制器

要依照试验条件的需求, 选择控制功能

a. 共振搜寻(Resonance Search)

一般待测物上有各种零组件, 而每一个不同的零组件, 皆有其不同的共振频率, 同时会因形状、重量、固定方式不同而在振动发生时产生不同的共振频率及放大倍率, 因此需对特定零组件搜寻它的共振特性, 再依其特性执行共振点的加振试验。

一般情况下, 可根据共振搜索, 找出共振点, 然后再定频振动, 最后再作扫频振动 (正弦或随机) 试验。

b. 正弦振动(Sine) 最好能有多点控制

- 频率范围: 依实际规定。
 - *频率 (Hz): 每秒钟的振动次数。
- 振动量: 通常以加速度(G)或位移(mm)来表示。
 - *加速度单位为: G 或 m/s^2 , $1G=9.8 m/s^2$ 。
 - *位移单位: mm。
- 扫描方式(SWEEP MODE): 一般采用对数扫描, 也有部分试验采用线性扫描
- 扫描速度(SWEEP SPEED): 指从最低频率扫描到最高频率的速度
 - *Oct/min: 每分钟多少倍频 $Oct=\log_2(f2/f1)$
例: 若扫描速度为 1 Oct/min; 表示 5-10Hz需 1 min, 而 10-20Hz同样为 1min
 - *Dca/min(极少使用): 每分钟多少 10 倍频 $Dca=\log(f2/f1)$
 - *min: 从最低频率扫描到最高频率多少分钟
- 振动时间或次数: 总测试时间或扫描次数来表示, 其中扫描次数又可分为单次扫描次数(例: 5-500Hz 算一次)及来回扫描(例: 5-500-5 Hz 算一次)。
- 振动方向: 通常分为前后、上下、或左右方向的振动。

例如：条件如下，则依条件设定后可得一图形

5Hz 到 15.76Hz	定振幅 10 mm
15.76Hz 到 100Hz	定加速度 5 G
100Hz 到 200Hz	定加速度 3 G
200Hz 到 500Hz	定加速度 2 G
500Hz 到 2000Hz	定加速度 1 G

c. 随机振动(Random)

- 频率范围：振动的频率产生的范围。
- 功率频谱密度（Power Spectrum Density缩写PSD）：单位为 G^2/Hz 。
- 加速度谱密度（Acceleration Spectrum Density 缩写ASD）：单位为 m^2/s^3
- 测试时间：执行测试所需时间，单位为 min 或 hr。

例如：试验条件 5-2000Hz，每轴 10min，频谱如下

5Hz 到 50Hz	以斜率 12dB/Oct 上升
50Hz	PSD为 $0.1 G^2/Hz$
100Hz	PSD为 $0.1 G^2/Hz$
200Hz	PSD为 $0.2 G^2/Hz$
300Hz	PSD为 $0.2 G^2/Hz$
300Hz 到 2000Hz	以斜率-36dB/Oct 下降

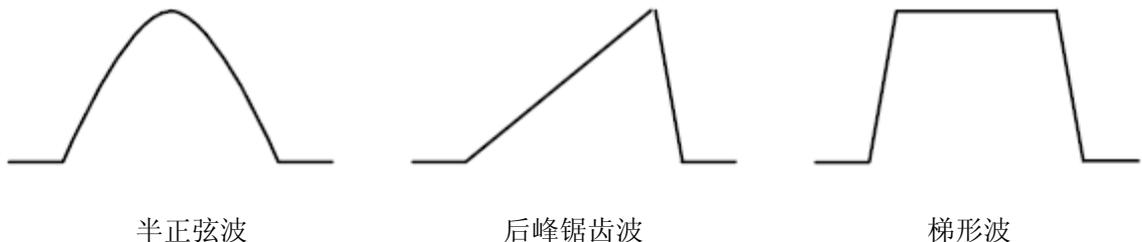
d. 冲击(Shock)

加速度： m/s^2 ， 脉宽： ms ； 冲击强度g

冲击试验主要是用来确定元器件、设备和其他产品在使用和运输过程中经受非多次重复的机械冲击的适应性，以及评价结构的完好性，可用于元器件的内强度试验。产品在使用和运输过程中所经受的冲击主要是车辆的紧急制动和撞击。产品受冲击所产生的损坏，不同于累积损伤效应所造成的破坏，而属于相对于产品结构强度来说是极限应力的峰值破坏。这种峰值破坏造成结构变形，安装松动，产生裂纹甚至断裂，还会使电气连接松接触不良，造成时断时通，使产品工作不稳定。这种峰值破坏还能产品内部各单元的相对位置发生变化，造成性能下降或超差，甚至冲断元器件或部件，使其无法工作。冲击试验通常采用等效损伤原理，使用规定的标称冲击脉冲波形

如常用开关电源包装冲击试验：冲击波形:半正弦波;峰值加速:300m/s²;脉冲宽度:6ms;冲击轴向:3 轴向;冲击次数:每个轴向正反 3 次

附:常见冲击类型:



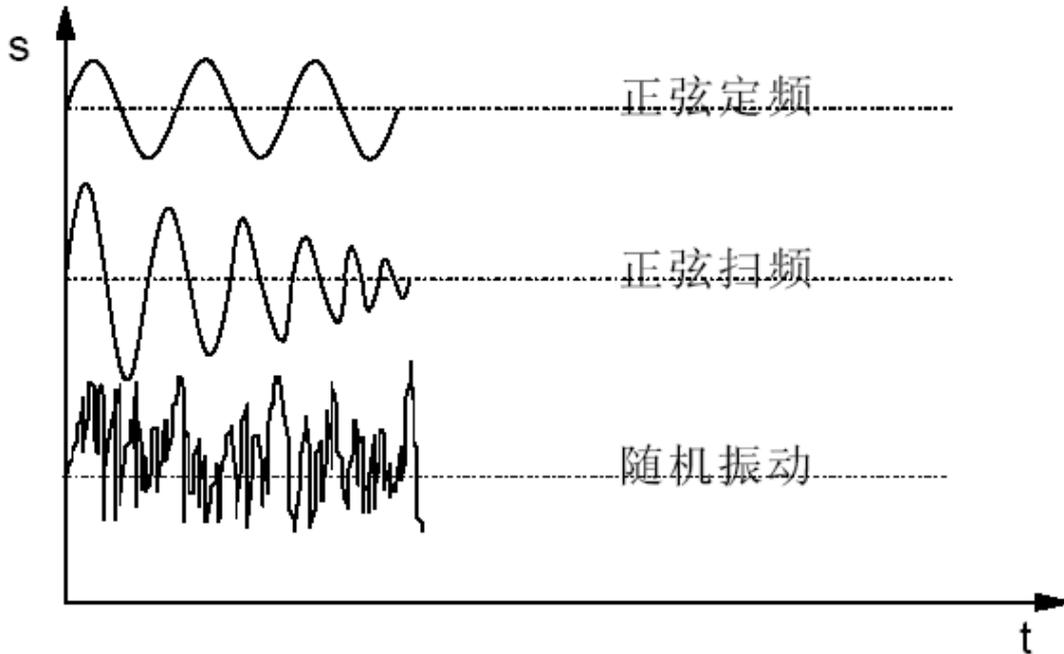
2) 振动试验对产品的影响

- 对结构的影响主要是指变形、弯曲、产生裂纹、断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；
- 裂和造成部件之间的相互撞击等；对工作性能的影响主要是指振动使运动部件动作不对工作性能的影响主要是指振动使运动部件动作不正常、触点接触不良、带电元件相互接触或短路、正常、触点接触不良、带电元件相互接触或短路、继电器产生误动作、产生强电噪声、指示灯闪烁、继电器产生误动作、产生强电

噪声、指示灯闪烁、导线摩擦或断裂等，从而导致工作不正常、不稳导线摩擦或断裂等，从而导致工作不正常、不稳定，甚至失灵、不能工作等；定，甚至失灵、不能工作等；

- 对工艺性能的影响主要是指紧固件松动、连接件和对工艺性能的影响主要是指紧固件松动、连接件和焊点脱开等

3) 振动试验类型



详细方法可参考 GB/T 2423.10/11/12/13/14 等标准。

8、包装自由跌落试验

相关跌落次数高度等参数，可参考 GB/T 2423.8

下表是开关电源常用的跌落参数：

重量范围	跌落高度
50~100kg	30cm
40~50kg	40cm
30~40kg	50cm
20~30kg	60cm
15~20kg	80cm
≤15kg	100cm

跌落面数:6 个面;跌落次数:每个面各 1 次,包装最易损伤的那个角跌落 1 次.有时可归纳为 1 角 3 棱 6 面,共 10 次.

9、其它试验

包括：高/低温极限试验，盐雾试验，淋雨，尘砂试验等

二、EMC 试验

随着电子产品越来越多地采用低功耗、高速度、高集成度的 LSI 电路，使得这些系统比以往任何时候更容易受到电磁干扰的威胁。而与此同时，大功率设备及移动通讯和无线寻呼的广泛应用等，又大大增加了电磁骚扰的发生源，因此我们应提高产品本身抗干扰能力，即要求产品必须具备在一定的电磁环境下能正常工作的能力。某些产品在 EMC 方面的测试是国家强制要求进行的。通常状况下，EMC 需要测试如下项目：

传导发射；辐射发射；静电抗扰性测试；
电快速脉冲串抗扰性测试；浪涌抗扰性测试；
射频辐射抗扰性；传导抗扰性；电源跌落抗扰性；
工频磁场抗扰性；电力线接触；电力线感应；

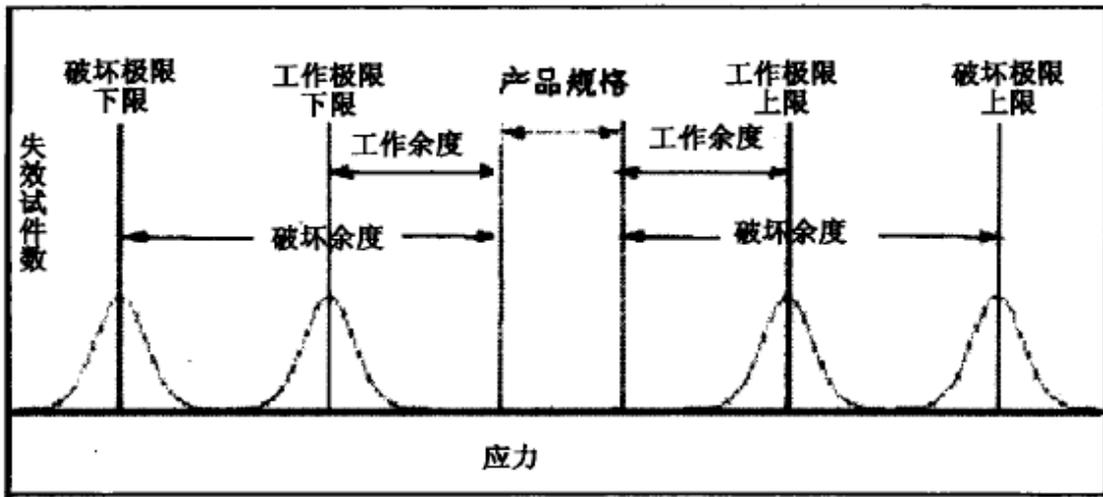
三、HALT 和 HASS 试验

1、什么是 HALT 试验

HALT (Highly Accelerated Life Test) 的全称是高加速寿命试验，是一种试验方法（思想），采用的环境应力比加速试验更加严酷。主要应用于产品开发阶段，它能以较短的时间促使产品的设计和工艺缺陷暴露出来，从而为我们做设计改进，提升产品可靠性提供依据。

2、HALT 的常用的概念

UDL -Upper Destruct Limit (temp and vibration)破坏限上限值
UOL -Upper Operating Limit (temp and vibration)运行限上限值
LOL -Lower Operating Limit (temperature)运行限下限值
LDL -Lower Destruct Limit (temperature)破坏限下限值
FLT -Fundamental Limit of Technology根本技术限制
Margin -余度，即产品设计限与运行(破坏)限的差值



3、HALT 试验步骤

下面简单介绍一下开关电源的 HALT 试验常用的步骤。由于 HALT 试验根据不同公司的情况，不同的产品，试验方法不一而定。

1) 低温加速测试:

序号	温度	工作电压下限	额定工作电压	最高工作电压	备注
1	-10℃				
2	-20℃				
3	-30℃				
4	-40℃				
5	-50℃				
6	-60℃				

- 试验样品不上电，将试验样品放置试验箱，通电检测其性能。
- 开始降温，待温度在-10℃稳定后十分钟，分别加额定工作电压、最高工作电压、工作电压下限，进行上下电启机测试，测试三个循环。
- 试验启机正常，输出正常，降温至-20℃，待温度稳定 20 分钟后，重复第一点所作的测试。
- 以此类推以步进为 10℃降温重复测试，直至不能启机，或启机后，输出性能不能满足产品规格书电性能要求，将温度回复到常温，如果产品启机和输出功能正常，将故障前温度记为 LOL。如果不能恢复，记为 LDL。

2) 高温加速测试

序号	温度	工作电压下限	额定工作电压	最高工作电压	备注
1	60℃				
2	70℃				
3	80℃				
4	90℃				
5	100℃				
6	110℃				
6	120℃				

- 试验样品不上电，将试验样品放置试验箱，通电检测其性能。

- 开始升温，待温度在 60℃ 稳定后十分钟，分别测试额定工作电压、最高工作电压、工作电压下限，试验样品工作状态，分别进行三个循环测试。
- 试验样机正常，输出正常，升温至 70℃，待温度稳定后 20 分钟后，重复第一点所作测试
- 以此类推以步进为 10℃ 升温重复测试，直至不能启机，或启机后，输出性能不能满足产品规格书电性能要求，将温度降低到常温，如果产品启机和输出功能正常，则将故障前的温度作为产品的 UOL 记录。如果不能恢复，极为 UDL。

3) 高低温循环测试

- 在室温下测试样品，记录数据确保样机工作正常。
- 设定温度转换点，低温位 LOL90%℃, 高温为 UOL90%℃。
- 在此两温度点循环五次，每个温度驻留时间为 20 分钟，温度变化不小于 60℃/分钟。
- 全程施加额定电压监测产品工作状态。

4) 振动加速试验

- 试验前对样品进行性能测试。
- 起始振动加速度为 10G, 驻留时间为 15 分钟。对样品进行性能测试。
- 加速度步进值为 10G, 每次驻留时间为 15 分钟。重复第二点测试。
- 当加速度超过 40G 时，步进改为 5G, 当样品不能正常工作，改进继续测试，直到当前无法改进提高，记录 UDL 值。

5) 温度与振动综合环境实验

将(3)高低温循环测试和(4)振动加速试验合并，高温操作（或破坏）界限和低温操作（或破坏）界限*90%作为温度变化的上下限，并逐步施加振动应力，每次增加之应力为：振动操作极限值*90%/5，在每个循环之最高及最低温度持续 30 分钟（此期间内如高低温循环一样，输入电压分别为输入高、低压及输入额定电压各 10 分钟），待温度稳定后进行开关机三次及功能测试，如此重复进行 5 个循环，直至达到可操作界限及破坏界限为止。

6) 失效处理

在前四项试验中，试验出现故障时，应遵循以下处理。

- 暂停试验，记录失效模式和应力水平
- 采用适当的隔离方法定位失效部分
- 记录失效位置
- 分析根本失效原因(可能需进行深入的调查和失效分析)
- 进行暂时性修复
- 继续 HALT 暴露其它问题

7) HALT 后续工作

- 记录整理所有未定位的问题；
- 与开发者一同讨论试验中的问题，确定问题纠正责任人。
- 问题修正后，再次 HALT 以验证措施的有效性并且没有引入新的失效；
- 周期性的对产品进行评估。

8) 将试验结果归档

HALT 试验作为产品改进和提高可靠性的依据，要整理和归档。

4、什么是 HASS 试验

HASS (Highly Accelerated Stress Screening) 的全称是高加速应力筛选试验;制造工艺也是决定电子产品可靠性的一个重要因素, HASS 试验就是专为清除生产制造过程中引入产品缺陷而设计的。

5、什么样的产品要做 HASS

不是所有的产品都能通过 HASS 筛选过程受益的, 毕竟 HASS 的实现和完成是非常昂贵的, 并且经过设计、制造和 HALT 试验的产品其可靠性已经满足或超出要求了, 所以实际生产过程中, 应尽量减少 HASS 试验。一般在下列情况下可考虑利用 HASS 对产品进行筛选区:

- 产品本身是一个低可靠性的产品。
- 对于没有历史数据的新产品, 又没有相近产品作为参考预计该产品的可靠性。
- 产品不同部件供应商变更需要验证器件性能。
- 复杂程度比较高的产品要求进行环境筛选以满足可靠性要求。

6、筛选方法

HASS 试验剖面的选择主要依据 HALT 的试验结果以及产品性能测试所需要时间、产品试验过程中所施加的特殊应力和产品产量等等。一般 HASS 试验剖面图是由数个在两个极限温度之间的振动和温度等环境应力综合作用的循环周期构成的。剖面参数包括: 上下限极限温度、端点温度滞留时间、温变率、振动量级、振动时间等构成。这些参数的选择一般参照下面的方法:

- 温度循环: 端点温度取工作极限的 80%, 滞留时间取样品温度平衡和测试所需的时间
- 随机振动: 振动量极限取工作极限的 50%, 如超过工作极限, 则取工作极限的 80%。

四、验证试验

可靠性验证试验包括可靠性鉴定试验及可靠性验收试验, 均属统计试验。

- **可靠性鉴定试验**是为了验证产品的设计是否达到了规定的最低可接收的可靠性要求。一般是应订购方的要求在系统级进行。
适用范围: 新设计的产品; 经过重大修改的产品; 在一定的环境条件下不能满足系统分配的可靠性要求的那些产品。
- **可靠性验收试验**是为了验证产品的可靠性不随生产期间工艺、工装、工作流程、零部件质量的变化而降低是对交付的某些产品或生产批进行可靠性评价。

1、基本定义

- MTBF验证区间demonstrated MTBF interval (θ_L, θ_U)
- MTBF 的检验下限 lower test MTBF (θ_1):拒收的 MTBF 值。
- MTBF 的检验上限 upper test MTBF (θ_0):接收的 MTBF 值。
- 使用方风险 consumer's risk(β)
- 生产方风险 producer's risk(α)

- 鉴别比 discrimination ratio(d) 是 MTBF 的检验上限与下限的比值。D= θ_0 / θ_1

2、序贯试验方案

截尾序贯试验:在试验期间,对受试设备进行连续地或短间隔地监测并将累积的相关试验时间和相关失效数与确定是否接收,拒收或继续试验的判据进行比较。

3、定时截尾试验方案

定时或定数试验:在试验期间,对受试设备进行连续地或短间隔地监测,累积的相关试验时间直到或超过预定的相关试验时间(接收)或发生了预定的相关失效数(拒收)

1) 定时截尾接收 MTBF 估计

例:规定的置信度 C=80%,试验到 920 台时时到达接收判决,试验中出现 7 个责任故障,对 MTBF 进行估计:

即 T=920 台时 C=80% r=7 个

$$\hat{\theta} = \frac{T}{r} = \frac{920}{7} = 131.4 \text{ 小时}$$

则 MTBF 的观测值(点估计值)

$$C' = (1+C)/2 = (1+0.8)/2 = 0.9$$

用 EXCEL 计算公式为: =2*7/CHIINV((1-0.8)/2,2*7+2)=0.5946

$$\theta_L(C', r) = \frac{2r}{\chi^2\left(\frac{1-C}{2}, 2r+2\right)} = \frac{2*7}{\chi^2\left(\frac{1-0.8}{2}, 2*7+2\right)} = 0.5946$$

$$\theta_U(C', r) = \frac{2r}{\chi^2\left(1-\frac{1-C}{2}, 2r\right)} = \frac{2*7}{\chi^2\left(1-\frac{1-0.8}{2}, 2*7\right)} = 1.797$$

用 EXCEL 计算公式为: =2*7/CHIINV(1-(1-0.8)/2,2*7)=1.797

所以置信上下限为:

$$\theta_L = \theta_L(C', r) * \hat{\theta} = 0.5946 * 131.4 = 78.2 \text{ h}$$

$$\theta_U = \theta_U(C', r) * \hat{\theta} = 1.797 * 131.4 = 236.2 \text{ h}$$

2) 定时截尾拒收 MTBF 估计

例:规定的置信度 C=80%,试验到 820 台时时因出现第 7 个责任故障而作出拒收判决,对 MTBF 进行估计:

T=820 台时 C=80% r=7 个

$$\hat{\theta} = \frac{T}{r} = \frac{820}{7} = 117.1 \text{ 小时}$$

$$\theta_L(C', r) = \frac{2r}{\chi^2\left(\frac{1-C}{2}, 2r\right)} = \frac{2*7}{\chi^2\left(\frac{1-0.8}{2}, 2*7\right)} = 0.6646$$

用 EXCEL 计算公式为: =2*7/CHIINV((1-0.8)/2,2*7)=0.6646

$$\theta_u(C', r) = \frac{2r}{\chi^2(1 - \frac{1-c}{2}, 2r)} = \frac{2 * 7}{\chi^2(1 - \frac{1-0.8}{2}, 2 * 7)} = 1.797$$

用 EXCEL 计算公式为: =2*7/CHIINV (1-(1-0.8)/2,2*7)=1.797

所以置信上下限为:

$$\theta_L = \theta_L(C', r) * \theta = 0.6646 * 117.1 = 77.8h$$

$$\theta_U = \theta_U(C', r) * \theta = 1.797 * 117.1 = 210.5h$$

这说明 MTBF 的真值落在这个区间的概率至少为 80%,或者说 MTBF 的真值大于或等于 77.8H 的概率为 90%, 而 MTBF 的真值大于或等于 210.5H 的概率也为 90%.

下表为置信限公式:

置信限类型	定数 r*	定时 t*
单侧	$(\frac{2r}{\chi^2(\alpha, 2r)}, \infty)$	$(\frac{2r}{\chi^2(\alpha, 2r+2)}, \infty)$
双侧	$(\frac{2r}{\chi^2(\frac{\alpha}{2}, 2r)}, \frac{2r}{\chi^2(1-\frac{\alpha}{2}, 2r)})$	$(\frac{2r}{\chi^2(\frac{\alpha}{2}, 2r+2)}, \frac{2r}{\chi^2(1-\frac{\alpha}{2}, 2r)})$

上表公式分子可直接代为 2T,则计算出来的即为 MTBF 的上下限值,

4、全数试验方案

五、可靠性增长试验

1、可靠性增长试验的定义及目的。

有计划地激发失效、分析失效原因和改进设计,并证明改进措施的有效性而进行的试验,称为可靠性增长试验(Reliability growth)。可靠性增长的目的就是通过试验-分析-改进-再试验(test, analyze and fix 简称 TAAF),解决设计缺陷,提高可靠性。

2、可靠性增长的试验方法

一般来说,一个刚完成开发的产品,可靠性较低,其内部隐藏着大量的故障隐患,包括元器件的质量、设计上的失误、不成熟的制造工艺,以及生产管理上的差错造成的问题等,必须在批生产前得以解决。当产品经过一定时间的环境应力筛选,“早期故障”被基本排除后,就可进入可靠性增长试验阶段。其基本工作步骤如下:

1) 制定试验计划。

开展可靠性增长试验工作之前,首先驱者了解产品当前的可靠性水平,以及产品预期要达到的目标,由此根据可投入的资源,包括样品、试验设备、试验经费和时间、人力等等,制订出工作计划。

2) 可靠性增长试验

试验以诱发产品实际使用条件下可能发生的故障隐患为目的,科学合理地选择试验条件和项目。目前常用于产品可靠性增长的试验手段是采用温度+湿度+振动的综合环境,它已被证明为

可有效地激发产品的故障模式。当然也可结合其它类型的试验一起进行。

2) 故障分析与改进

对试验中产品暴露出来的故障进行定位与失效机理分析。

3) 再试验

经过改进的产品，仍需开展进一步的试验。一是为验证改进措施的有效性，二是继续暴露产品尚存的故障隐患，开展进一步的可靠性增长，直至达到预定的可靠性目标为止。

3、增长的模型

1)增长趋势有效性检验

确认产品经过不断地设计和制造工艺等方面的改进后,其可靠性是否已有明显的提高.

- 根据 IEC60605-6 或 GB5080.6 的关于恒定失效率假设的有效性检验方法.

$$\chi = \sum_{i=1}^m \text{Ln}\left(\frac{T}{T_i}\right) \quad m=r-1 \text{ 当 } T=T_r \text{ 时(定数截尾)} \quad \text{或 } m=r \text{ 当 } T>T_r \text{ 时(定时截尾)}$$

选取检验显著性水平 $\alpha = 1-C$,如 $\chi > f(c,m)$ 则认为该产品具有显著的可靠性增长趋势,否则不能确认有增长趋势.

χ :检验用统计量 n : 试验产品总数 T_i :为发生第 i 个产品的总累积时间 T :为试验中止时所有受试产品的总累积试验时间.当第 R 个故障发生时试验立即中止,有 $T=T_r$, 否则其它时间中止,有 $T>T_r$
 C :为置信度,常取 90%或 95%. $f(c,m)=0.5*CHINV(1-C,2m)$

- 在 MIL-HDBK-781 和 GJB 1407 中推荐一种确认产品可靠性增长趋势的 U 检验,

$$U = \frac{\sum_{i=1}^m T_i - \frac{mT}{2}}{T \sqrt{\frac{m}{12}}}$$

若 $U < U(\alpha, m)$ 则认为产品可靠性有显著的增长趋势,否则不确认.

例: 某产品进行可靠性增长试验,试验总累积时间 T 达到 1200 小时,其间共发生故障 30 次,具体故障时间及对应的产品累积 MTBF 值见下表.

I	T _i	$\theta_{\Sigma}(T_i)$	I	T _i	$\theta_{\Sigma}(T_i)$	I	T _i	$\theta_{\Sigma}(T_i)$
1	2.8	2.8	11	156	14.2	21	570	27.1
2	5.2	2.6	12	194	16.2	22	630	28.6
3	9.5	3.2	13	200	15.4	23	670	29.1
4	15	3.75	14	222	15.9	24	700	29.2
5	20.5	4.1	15	290	19.3	25	804	32.2
6	28.5	4.75	16	360	22.5	26	890	34.2
7	39.5	5.6	17	375	22.1	27	951	35.2
8	75	9.4	18	435	24.2	28	998	35.6
9	95	10.6	19	529	27.8	29	1025	35.3
10	130	13	20	535	26.75	30	1150	38.3

由于试验截尾时间 $T=1200$ 小时 $> T_{30}=1150$ 小时,故取 $m=r=30$

$$\chi = \sum_{i=1}^m \text{Ln}\left(\frac{T}{T_i}\right) = 57.8$$

$Ln(\frac{T}{T_i})$ 计算每个的对数值: $=LN(1200/2.8)=6.06$, $=LN(1200/5.2)=5.44$ 将 30 个对数值累积得出 x 的统计值.

取显著水平 $\alpha = 0.1$, 得 $f(0.9, 30) = 0.5 * CHIINV(0.1, 2 * 30) = 37.22 < x = 57.8$, 则认为在显著水平为 0.1 下该产品具有明显的可靠性增长趋势.

若按 U 检验法统计 $U = -0.3107$ (先求出 T_i 累积和为 12105, 再根据公式求出 U:)

$$U = \frac{\sum_{i=1}^m T_i - \frac{mT}{2}}{T \sqrt{\frac{m}{12}}} = (12105 - 30 * 1200 / 2) / (1200 * \text{SQRT}(30/12)) = -0.3107$$

查表 $U(0.1, 30) = 1.65$ 因此 $U < -U(0.1, 30)$, 认为在显著水平 $\alpha = 0.1$ 下该产品有明显的增长趋势.

2) AMSAA 可靠性增长模型

AMSAA (army materiel system analysis activity) 美国陆军装备系统分析中心认为产品进行可靠性增长试验截止时间 T 时, 其具有的 MTBF 点估计值为:

$$\theta(T) = \frac{1}{abT^{b-1}}, \text{其中 } a = \frac{m}{T^b}, b = \frac{m-1}{\chi}$$

接上例: 尺度参数 $a = 30/1200^{0.508} = 0.818$ 形状参数 $b = (30-1)/57.07 = 0.508$ 因此产品在增长试验结束 $T = 1200$ 小时, MTBF 点估计值为: 78.8 小时.

$$\theta(T) = \frac{1}{abT^{b-1}} = 78.8 \quad \text{即为 } 1 / (0.508 * 0.817 * (1200^{(0.508-1)}))$$

在 80% 的置信区间上、下限估计值, 可由下式, 先查得系数 $\pi_1 = 0.687$ $\pi_2 = 1.426$

时间截尾 $\theta L(T) = \pi_1 \theta(T) = 0.687 * 78.8 = 54.1$ 小时 $\theta U(T) = \pi_2 \theta(T) = 1.426 * 78.8 = 112.4$ 小时
即该产品经过 1200 小时的可靠性增长试验后, 我们有 80% 把握断言其 MTBF 达到 54.1~112.4 小时之间. 另附: 定数截尾公式: $\theta L(T) = \rho_1 \theta(T)$ $\theta U(T) = \rho_2 \theta(T)$

第四节、可靠性设计

一、可靠性模型

可靠性模型包括可靠性方框图和可靠性数学模型

可靠性方框图(RBD-RELIABILITY BLOCK DIAGRAMS)通常用于表示系统的可靠性结构。RBD是一种简单地表示所有可能的功能结构以及故障的单元对系统功能影响的图形方法。可靠性框图通常由表示基本的系统组成单元的方框组成。方框图通常都有一个起点和一个终点。其中至少要有一条从起点到终点的路径是通的, 且没有通过一个故障的单元, 系统才是正常的。以下是最常见的基本结构(串、并联)RBD 示例。

在这里请注意可靠性方框图和原理图的区别: 可靠性框图——表示产品中各单元之间的逻辑功能关系; 原理图——表示产品中各单元之间的物理关系

(1) m 个系统串联 (Simple Series RBDs 只要有一个单元失效, 整个系统就失效)



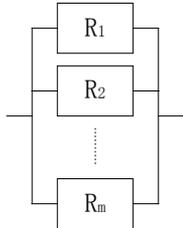
$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \frac{1}{\theta}$$

即总的系统可靠度RS为各单元可靠度的乘积，系统故障率为各单元故障率的和。

例：设R1=0.7 R2=0.8 R3=0.9 则RS=?

RS与R1、R2或R3比较大小，说明了什么呢？

(2) m个系统并联 (Simple Parallel RBDs只要有一个单元工作，整个系统就工作)：



$$F_s = F_1 \cdot F_2 \wedge F_i \wedge F_m = \prod_{i=1}^m F_m$$

即系统的不可靠度FS为各单元不可靠度的乘积，则根据可靠度与不可靠度的关系：

$$R_s = 1 - F_s = 1 - \prod_{i=1}^m F_m = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \dots (1 - R_m)$$

系统的MTBF为

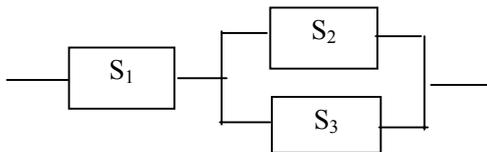
$$MTBF_S = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \dots + \frac{1}{m\lambda}$$

例：有3个并联系统，各单元的可靠度R1,R2和R3均为0.63,问系统可靠度为多少？

$$R_s = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) = 1 - (1 - 0.63)(1 - 0.63) = 0.94$$

RS与R1、R2或R3比较大小，说明了什么呢？

(3) 复杂混联系统



$$R_{S4} = 1 - (1 - R_{S2})(1 - R_{S3})$$

$$R_S = R_{S1} \cdot R_{S4} = R_{S1} [1 - (1 - R_{S2})(1 - R_{S3})]$$

(4) r/n系统:组成系统的n个单元中，不故障的单元数不少于r(r为介于1和n之间的某个数)，系统就不会故障，这样的系统称r/n系统。

系统的可靠度为：

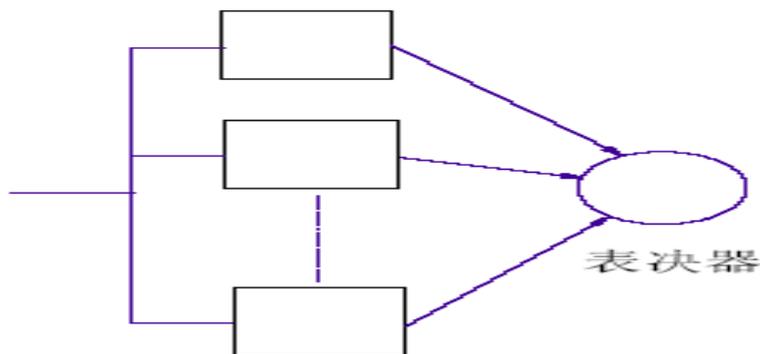
$$R_s(t) = R^n(t) + C_n^1 R^{n-1}(t) \cdot [1 - R(t)] + C_n^2 R^{n-2}(t) \cdot [1 - R(t)]^2 + \dots + C_n^{n-r} R^r(t) \cdot [1 - R(t)]^{n-r}$$

系统的MTBF为：

$$MTBF_S = \frac{1}{n\lambda} + \frac{1}{(n-1)\lambda} + \frac{1}{(n-2)\lambda} + \dots + \frac{1}{r\lambda}$$

(5)多数表决系统:

一个系统将三个以上(必须是奇数)并联单元的输出进行比较,把多数单元出现相同的输出作为系统的输出,这样的系统称多数表决系统



注:对于复杂结构模型,如果是简单的串并或并串的混联结构,其建模和数学模型的计算较简单.对很难转换为简单的串并结构模型的分析需采用其他方法,常用的有布尔真值法、概率展开分析法、贝叶斯法等;这里不作叙述。

产品的可靠性框图表示产品中各单元之间的功能逻辑关系,产品原理图表示产品各单元的物理关系,两者不能混淆如,某振荡器由电感和电容器组成,从原理图(图 A)上看两者是并联关系,但从可靠性关系上看,两者只要其中一个发生故障,振荡器都不能工作,因此是串联模型(图 B)。

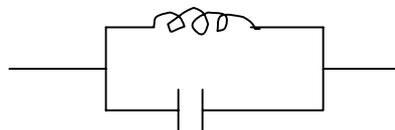


图 A

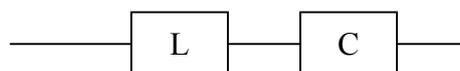


图 B

二、可靠性分配

在产品的设计阶段,就要把要求的 MTBF “设计进” 产品里.当产品的结构复杂时,将可靠性指标自上而下逐级地分配到各个简单的结构.它是一个由整体到局部,由上到下的分解过程,即将整个系统的可靠性要求转换为每一个分系统的可靠性要求.这个过程就叫做可靠性分配.可靠性分配有许多方法,如等分配法、AGREE 分配法、航空无线电公司分配法、目标可行性法、最小工作量算法和动态规划法等。

1、等分配法 Equal Apportionment Technique

等分配法假设 n 个系统串联,其中每一个分系统分配同样的可靠性指标.这种方法主要的缺点是不按达到这些指标的难易程度来分配系统指标.方法模型如下:

$$R = \prod_{i=1}^n R_i \quad R_i = (R)^{1/n} \text{ 当 } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

例:设有一个计划中的通讯系统,由3个分系统组成,其中每一分系统都必须工作,系统才能工作.这些分系统都是分别研制的,假设每一分系统的研发费用相等.试问:要满足 0.729 的系统可靠度要求给每一系统分配的可靠度为多少?

$$R_i = (R)^{1/n} = \sqrt[3]{0.729} = 0.9$$

2、目标可行性法 (Feasibility-Of-Objectives Technique)

在产品的可靠性数据缺乏的情况下,可以请熟悉产品、有工程实际经验的专家,按照影响产品可靠性的几种主要因素(如:复杂度、技术成熟度、重要度及环境条件)进行评分(每一种因素的分值在1~10之间,难度越高评分越高),然后根据评分的结果给各分系统或部件分配可靠性指标。例如某个系统(要求的MTBF为500h)由A/B/C/D四个部件组成,各部件评分如下表:

部件	复杂度	技术成熟度	重要度	环境条件	各部件评分	各部件评分系数 Ci	分配给各部件的故障率	分配给各部件的 MTBF
A	8	9	6	8	3456	0.462279	0.00092456	1081.597
B	5	7	6	8	1680	0.224719	0.00044944	2225
C	5	6	6	5	900	0.120385	0.00024077	4153.333
D	6	6	8	5	1440	0.192616	0.00038523	2595.833
合计					7476	1	0.002	500

说明: (1) 对四个部件(A/B/C/D)按四种因素评分后,填入上表(兰色字迹部份);

(2) 对A部份而言,最后评分为 $8*9*6*8=3456$; B的评分为 $5*7*6*8=1680$;同理C的评分为900、D的评分为1440;最后四部分总分为:7476;紫红色字迹部份。

(3) 对A部份而言,评分系数为 $3456/7476=0.46$; B的评分系数为 $1680/7476=0.22$; C的评分系数为0.12; D的评分系数为0.19;浅紫色部份。

(4) 对整个系统而言,失效率为 $1/500=0.002$;

所以分配给A的失效率为: $0.46*0.002=0.0009$,对应的MTBF为1081.6H;

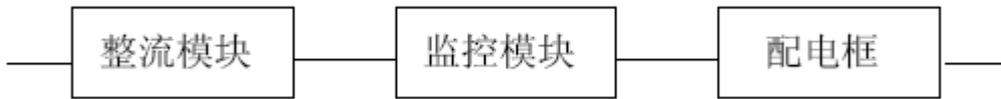
同理得B/C/D的失效率和MTBF,红色字迹部份。

3、例举我司开关电源的一个实例。



(1) 电源基本概述: A216 系统目标 MTBF 为 150000 小时, 有整流模块、监控模块和配电柜组成。

基本可靠性模型框图为:



整机失效率:

$$\lambda_s = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{150000} \times 1000000000 = 6666.67 FITs$$

整机年返修率为

$$F = \lambda t = \frac{6666.67 \times 8760}{1000000000} = 5.84\% / \text{年}$$

根据上面介绍的评分原则, 由开发专家组成员对该电源采用重要度、复杂度、成熟度和环境因子4个属性进行评分, 并对它们分别评分如下:

模块名称	重要度	复杂度	成熟度	环境条件
整流模块	10	10	7	10
监控模块	1	7	10	2
配电柜	10	1	1	1

(2) 基本可靠性: 是指产品在规定的条件下无故障的概率。它要考虑所有的寿命历程和所有的故障。它反映对产品约束条件和维修资源的要求

单元名称	配置数量	重要度因子	归一化因子	复杂度因子	归一化因子	成熟度因子	归一化因子	环境因子	归一化因子	各因子乘积	分配的返修率
整流模块	3	10	0.243	10	0.263	7	0.2188	10	0.3030	0.00425475	5.72%
监控模块	1	1	0.024	7	0.184	10	0.3125	2	0.0606	8.509E-05	0.11%
配电柜	1	10	0.243	1	0.026	1	0.0313	1	0.0303	6.078E-06	0.01%
总计:	5									0.0043458	

归一化因子分母 (各模块均相等): 是各模块其配置数量和相应的因子乘积这和, 如为 $3 \times 10 + 1 \times 1 + 1 \times 10 = 41$

归一化: 相应的因子比上其归一化分母。如整流模块归一化重要度: 重要度因子/重要度归一化因子分母 = $10/41 = 0.243$

各因子乘积: 归一化: 重要度*归一化: 复杂度*归一化: 成熟度*归一化: 环境 = $0.243 \times 0.263 \times 0.2188 \times 0.3030 = 0.004$

分配的返修率:

$$\text{整机年返修率} \times \frac{\text{各因子乘积}}{\text{各因子乘积的累积和}} \%$$

如整流模块分配的返修率为 $5.84\% \times (0.004254/0.004345) = 5.72\%$

所以最后得出各模块分配的返修率为:

单元名称	配置数量	分配的返修率
整流模块	3	1.91%
监控模块	1	0.11%
配电柜	1	0.08%

(3)任务可靠性: 是指产品在规定的任务剖面中完成规定功能的能力。

单元名称	数量	重要度		复杂度		成熟度		B-- 归		环境归一化:		乘积	故障率		
		子	母	子	母	子	母	子	母	子	母				
整流模块	1	10	20	0.5	5	7	0.7143	7	10	0.7	10	17	0.5882	0.1471	5952.4
配电柜	1	10	20	0.5	2	7	0.2857	3	10	0.3	7	17	0.4117	0.0176	714.29
总计															0.16476666.67

注意上表中与基本可靠性表中的不同, 整流模块配置数量在任务工作时只需1台, 其它各因子打分也不同于上表基本可靠性.

分配的故障率:

$$\text{分配的故障率} = \text{整机故障率} \times \frac{\text{各因子乘积}}{\text{各因子乘积的累积和}} \%$$

如整流模块的故障率为: $6666.67\text{FITs} \times (0.1471/0.1647) = 5952.4\text{FITs}$

所以最后得出各模块分配的结果如下表:

单元名称	配置数量	分配的故障率	单板 MTBF (hrs)	单板 MTBF (yrs)
整流模块	3	5952.4	168000	19.2
配电柜	1	714.3	1400000	159.8

三、可靠性预计

1、可靠性预计的意义

- 预先控制产品因硬件失效导致的单板返修率;
- 预先估计产品投入市场使用时的系统年停机时间;
- 进行应力分析, 发现薄弱环节, 提高产品可靠性;
- 为维护费用、备件数等的计算提供依据;

2、可靠性常用的预计方法

$$\text{公式: } \lambda_{ssi} = \lambda_{Gi} \times \pi_{Qi} \times \pi_{Si} \times \pi_{Ti}$$

当单元内为串联模型时, 单元的总失效率为

$$\lambda_{ss} = \pi E \times \sum_{i=1}^n N_i \times \lambda_{ssi}$$

λ_{Gi} : 器件固有失效率 π_{Qi} : 质量等级因子 π_{E} : 环境因子 π_{T} : 温度应力因子

通常情况下简化公式:

$$\text{计数法: } \lambda_{ss} = \sum_{i=1}^n N_i \times \lambda_{Gi}$$

$$\text{应力法: } \lambda_{ss} = \sum_{i=1}^n N_i \times \lambda_{Gi} \times \pi_{Si} \times \pi_{Ti}$$

1) 元器件计数法 (Bellcore (TR-332)方法 1 情况 1 和情况 2)



计数法: $\pi_{S}=1$ $\pi_{T}=1$

- 情况1: 单元/系统的老化时间 ≤ 1 小时, 且无器件级老化的黑盒预计。器件假设工作在 40°C 的温度和 50% 的电应力下。
- 情况2: 单元/系统老化时间 > 1 小时, 但无器件级老化的黑盒选项。器件假设工作在 40°C 的温度和 50% 的电应力下。

2) 有限应力法 (Bellcore (TR-332)方法 1 情况 3)

•情况 3：一般情况—所有其它的环境条件。这种情况用于供应商希望进行器件级老化的或者当供应商或用户希望得到在除 40℃和 50%的应力条件以外的情况下的可靠性预计结果时。以下称这些预计为“有限应力”预计。

四、降额设计

降额设计，为了提升电子设备的可靠性而常用的一种设计方法，主要是指构成电子设备的元器件使用中所承受的应力（电应力和温度应力）低于元器件本身的额定值，以达到延缓其参数退化，增加工作寿命，提高使用可靠性的目的。

在降额设计中，“降”得越多，要选用的元器件在性能就应该越好，成本也就越高，所以在降额设计过程中，要综合考虑。电子产品发展到今天，人们已经总结出“降额”的通用准则，详见《GJB/Z 35-1993 元器件降额准则》，也可参见公司内部的《WI-TE-006 元器件降额准则》。并不所有的电子产品都可以“降额”，在实现设计过程时，应该注意：

- A、不应将标准所推荐的降额量值绝对化，应该根据产品的特殊性适当调整；
- B、应注意到，有些元器件参数不能降额；
- C、一般说来，对于电子元器件，其应用应力越低越能提高其使用可靠性，但却不尽然。如聚苯乙烯电容器，降额太大易产生低电平失效；
- D、为了降低元器件的失效率，提高设备可靠性而大幅值降低其应用应力，按其功能往往需要增加元器件数量和接点，反而降低了设备可靠性；
- E、对器件进行降额应用时，不能将所承受的各种应力孤立看待，应进行综合权衡；
- F、不能用降额补偿的方法解决低质量元器件的使用问题，低质量产品要慎重使用；

1、降额等级的划分

I 级降额是最大的降额，对元器件使用可靠性的改善最大。超过它的更大降额，通常对元器件可靠性的提高有限，且可能使设备设计难以实现

II 级降额是中等降额,对元器件使用可靠性有明显改善。II 级降额在设计上较 I 级降额易于实现。

III 级降额是最小的降额，对元器件使用可靠性改善的相对效益最大，但可靠性改善的绝对效果不如 I 级和 II 级降额。III 级降额在设计上最易实现。

未完等续..