

可靠性技术的应用与发展

摘要：电子产品的可靠性是设计出来的，制造出来的，检测出来的，管理出来的。

Summary: The reliability of electronic products is assured by many procedures such as designing, manufacturing, testing and management.

关键词：AGREE, ESS, HALT&HASS, Arrhenius 方程, 可靠度 $R(t)$, 失效率 (λ) , 热传导, 电磁兼容性, 筛选强度。

Key Word: AGREE, ESS, HALT&HASS, Arrhenius Equation, Reliability $R(t)$, Failure rate $\lambda(t)$, Heat Exchange, EMC, Screening Strength.

中图分类法：o213.2

文献标识码：A

1、概述

AGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment) 报告于1957年7月在美国的发表, 标志着可靠性学科的诞生。从那时起, 可靠性技术在40多年的应用和发展历程中, 经历了萌生、发展、成熟的过程, 给美国的国防、工业带来了莫大的技术进步和难以估计的社会财富。

可靠性技术贯穿于电子产品的整个寿命期内, 从产品的设计、制造、安装、使用和维护的各个阶段都有可靠性技术的参与。在产品的设计和制造阶段参与可靠性技术, 为奠定产品的固有可靠性尤为重要。

电子产品在使用过程中, 会遇到各种各样的复杂环境因素, 如: 高温、低温、高湿、低气压、有害气体、霉菌、盐雾、冲击、振动、辐射、电磁干扰……。这些环境因素的存在, 将大大影响电子产品的可靠性。

只有通过可靠性设计、制造工艺可靠性、可靠性试验、可靠性管理、可靠性分析, 充分考虑产品在使用过程中将要遇到的各种环境条件, 采取耐环境设计、热设计、电磁兼容设计等各种可靠性设计手段和各种可靠性试验和分析技术, 建立各种可靠性失效分析模型, 才能保证产品在规定环境条件下的可靠性。

2、可靠性设计技术

可靠性设计在可靠性技术中占有重要地位, 产品的可靠性定量指标在设计过程中就得到了落实, 产品的设计和制造为产品的固有可靠性奠定了基础。所以, 我们一定要扭转只搞性能指标设计, 忽视可靠性设计的倾向,

在产品设计和研制阶段，认真开展可靠性设计，为产品固有可靠性奠定基础。

下面是可靠性设计技术的具体应用：

1、 降额设计

电子产品的可靠性对其电应力和温度应力比较敏感，电子产品的降额设计就是使元器件或产品所承受的工作应力适当地低于其规定的额定值，从而达到降低基本故障率，提高使用可靠性的目的。

对于各类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元器件的故障率有明显的影响，在设计上也比较容易实现，不会在设备体积、重量和成本方面付出较大的代价。

各类元器件的详细降额准则以国家军用标准GJB/Z35《元器件降额准则》和相应的行业标准为准。

2、 热设计

电子产品的故障率是随着工作温度的增加而成指数增长的。所以，热设计成为解决电子产品散热问题的关键所在。

1、 系统中元器件的热设计

元器件的热设计首先应考虑元器件的工作温度，并进行元器件自然散热的测量。从而准确的计算出元器件散热量，并进行有效的温度控制。元器件的热场计算，主要是数字分析计算和热测量。其中热测量较为准确，而BETA、Flotherm 热分析软件更方便,是目前市场上使用较多的热设计仿真平台。也是许多热设计工程师获得温度场的主要工具。

元器件的安装和布局：

其可靠性设计的原则是：

A、 散热量较大的元器件在PCB 上尽量分散安装。

发热元器件应沿冷壁均匀散开，对于工作温度低的热敏元件不能靠近热点。也就是热敏感元件不可靠近高发热元器件；热敏感元件不可安放在发热元件的正上方，要在水平面内交错安置。

B、 热敏感元件应处于温度场的最低区域，应处于产品工作状态的最下放。这样可避免由于发热元件的热量自然热对流，而影响热敏感元件。

例如，热敏感元件应安放在PCB 工作状态时的下方。

C、 采用短通路，尽量减少传导热阻。加速元器件散热。

例如，直接将元器件安放在冷板上，并尽量减少元器件连接到冷板上的粘合厚度。

D、 加大安装面积，尽量减少传导热阻。

例如，把微电路芯片安装在比芯片面积大的散热片上，不要把引线作为传导散热的唯一途径。

E、 采用导热效率高的材料，尽量较少传导热阻。例如，铝、铜材料的导热系数很高，可减少热阻。

F、 加大接触面积，使传导效果更好。

2、 PCB 的热设计

PCB 的热设计是保证其良好的散热，并保证PCB 上的元器件功

能的正常工作。这是PCB 热设计的基本可靠性要求。下面是热设计的主要原则：

A、印制线的设计

设计印制线时，首先要保证印制线的载流容量，印制线的宽度必须适用于电流的传导，不能引起容许的压降和温升。这需要电路计算和温度场计算的协调。相邻线的间距应满足国标要求。

B、减少元器件引线及印制线间的热阻。利于厚度大的印制线，导热和自然对流散热。

C、采用散热效果好的PCB。

对于安装密度较高的产品，温度散热效果还不够理想时，应采用导热效果好的PCB。例如，金属基地、陶瓷基地PCB。

3、电磁兼容性设计

电磁兼容性是指：系统、分系统、设备（电路、分电路）在共同的电磁环境中能够协调地完成各自功能的共存状态。电磁兼容性是电子产品的一项重要指标。它包括系统内部和系统之间的电磁兼容两个方面。我们在产品设计时，应进行下面的抗电磁干扰的设计：

1、接地：就是两点之间建立导电通道，其中一点通常是系统的电气元件，另一点是参考点。一个好的参考点或接地是设备（产品）可靠性地抗干扰的基础。理想的接地点应该是零电位、零阻抗。

2、搭接：是指在金属表面之间建立低阻通道。搭接的目的是在结构上设法使射频电流的通路均匀，避免在金属件之间出现电位差而造成干扰。

3、屏蔽：屏蔽的机理是吸收、反射电磁波，以阻断辐射的电磁波。在电路设计中可以从以下三个方面采取屏蔽措施：

A、机箱屏蔽：金属箱是一个良好的导体，可以成为良好的屏蔽层；机箱内部可用金属板隔出“单间”放置有强干扰源的电路板，如，开关式稳压电源板等。

B、局部屏蔽：PCBA 上灵敏度较高的局部电路，可加屏蔽罩，并良好的接地；PCB 设置大面积“地”也是一种屏蔽手段。

C、滤波：滤波不如前面三种可靠，且费用也较高。一般不被采用。

以上简单介绍了电磁兼容性设计的方法，是我们广大设计人员在产品设计时都会遇到的问题，希望能给以借鉴。

4、可靠性预计技术

可靠性预计是在产品设计阶段对产品（系统）可靠性进行定量的估计。系统可靠性预计是根据组成系统的元件、部件的可靠性来估计的，是一个自下而上，从局部到整体、由小到大的一种系统综合的过程。下面重点介绍电子元器件的工作失效率的数学模型。以应力分析法为例。

(1)、元器件可靠性失效率预计。

在预计电子元器件的工作失效率时，应根据元器件的质量等级，应力水平、环境条件等因素对基本故障率进行计算。电子元器件的应力分析法已经有成熟的可靠性预计标准和手册。对于国产元器件可以采用 GJB299B-98 《电子设备可靠性预计手册》；对于进口元器件则可采用美国军用标准 MIL-HDBK-217F RELIABILITY PREDICTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT 进行预计。其计算较为繁琐。对于不同类别的元器件和集成电路有其不同的失效率模型。下面建立可靠性数学模型：

1、SRAM、DRAM、ROM 的工作失效率可靠性数学模型为：

$$\lambda_p = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V + (C_2 + C_3) \pi_E] \pi_L$$

2、PROM 工作失效率可靠性数学模型：

$$\lambda_p = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V \pi_{PT} + (C_2 + C_3) \pi_E] \pi_L$$

3、EEPROM 工作失效率可靠性数学模型：

$$\lambda_p = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V \pi_{CYC} + (C_2 + C_3) \pi_E] \pi_L$$

其中： λ_p ---工作失效率， $10^{-6}/h$

π_E ---环境系数

π_Q ---质量系数

π_L ---成熟系数

π_T ---温度应力系数，其值取决于电路的工艺。

π_V ---电压应力系数

π_{PT} ---PROM 电路的可编程序工艺系数

π_{CYC} ---EEPROM 电路的读/写循环率系数

C_1 和 C_2 电路复杂度失效率

C_3 封装复杂度失效率

(2)、系统可靠性预计。

系统可靠性预计是以元器件和零部件的可靠性预计为基础的，并确认他们的功能和他们之间的关系。系统可靠性预计的数学模型主要有：串联系统、并联系统、串并联系统、表决系统等。下面只介绍串联系统的可靠性数学模型。

串联系统的可靠性数学建模：假设一个系统由若干个独立的单元组成，并且每个单元的失效都会引起系统的失效，则系统的可靠性关系图为：



假如第 i 个单元的寿命为 t_i ，可靠度为 $R_i(t_i)$ ， $i=1, 2, 3, \dots, n$

那么系统的可靠度为：

n

$$R_s(t) = R_1(t_1) \cdot R_2(t_2) \cdot R_3(t_3) \cdots R_n(t_n) = \prod R_i(t_i)$$

$i=1$

如果各个单元的失效率服从指数分布，即

$$R_i = \exp\{-\lambda_i \cdot t_i\}$$

则系统的可靠度为：

n

$$R_s(t) = \prod e^{-\lambda_i t_i} = \exp\{-\sum \lambda_i t_i\}$$

$i=1$

如果各个系统的工作时间相同时，

即： $t_1=t_2=t_3=\dots=t_i=\dots=t_n=t$ ，

n

$$\text{则， } R_s(t) = \exp(-t \sum \lambda_i)$$

$i=1$

$$\text{又， } R_s(t) = \exp(-t \lambda_s)$$

这里， λ_s ——系统失效率

$R_1 R_2 R_3 R_n$

6

故系统的失效率为：

n

$$\lambda_s = \sum \lambda_i$$

$i=1$

而系统的平均寿命为：

$$MTBF = \theta_s = 1 / \lambda_s$$

例，有一个系统有4个互相串联的独立元器件组成，各个单元的可靠度分别为， $R_1=0.96$ ， $R_2=0.97$ ， $R_3=0.98$ ， $R_4=0.98$ ，求系统的可靠度是多少？

解：系统的可靠度为，

$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 = 0.96 \times 0.97 \times 0.98 \times 0.98 = 0.894$$

由上面可以看出，可靠性预计的目的是：

- (1)、评价产品是否达到要求的可靠性指标；
 - (2)、在方案论证阶段，通过可靠性预计，可对不同方案的可靠性水平进行比较，为最优方案的选择及方案优化提供依据；
 - (3)、在设计中，通过可靠性预计，发现影响产品（系统）可靠性的主要因素，找出薄弱环节，采取设计措施，提高系统可靠性；
- 可靠性预计的主要价值在于，它可以作为设计手段，为设计决策提供依据。

3、可靠性试验技术

1、集成电路的加速寿命试验模型

加速寿命试验已经被广泛的应用到评价微电路的可靠性试验中。下面分别描述其数学模型：

1、Arrhenius Model

Arrhenius 方程在产品的加速寿命试验中得到了最广泛的应用。由此建立的电子产品的高温加速寿命试验的加速因子计算模型为：

$$AF_{(t)} = \exp \left\{ (E_a/k) \cdot (1/T_{use} - 1/T_{stress}) \right\}$$

AF——(t) 温度加速因子

E_a ——析出故障的耗费能量 (activation energy=0.3ev—1.2ev)

k——Boltzmann 常数= $8.617 \times 10^{-5} \text{ev}/^\circ\text{k}$

T_{use} ——产品正常工作的温度

T_{stress} ——产品施加应力的温度

以上是产品在高温应力条件下的加速因子计算的数学模型。

2、电压加速因子 (Voltage Acceleration Factor) 的计算模型

$$AF_{(v)} = \exp \left\{ z \cdot | V_{stress} - V_{use} | \right\}$$

$AF_{(v)}$ ——电压加速因子

z——电压加速常数 (typically, $0.5 < z < 1.0$)

V_{stress} ——应力电压 (Stress voltage)

V_{use} ——使用电压 (Operating voltage)

3、Hallberg-Peck Model

湿度加速因子由Hallberg 和Peck 推算出：

$$AF_{(RH)} = [RH_{stress}/RH_{use}]^n$$

$AF_{(RH)}$ --- 湿度加速因子

RH_{stress} --- 应力条件下的相对湿度

RH_{use} --- 使用条件下的相对湿度

n --- 湿度的加速率常数介于2~3 之间

4、Coffin-Manson Model (科芬·曼森模型)

温度循环的加速因子数学模型为:

$$AF_{(tc)} = \left\{ \frac{[T_{stress(hot)} - T_{stress(cold)}]}{[T_{use(hot)} - T_{use(cold)}]} \right\}^{\beta}$$

$AF_{(tc)}$ --- 温度循环加速因子

$T_{stress(hot/cold)}$ --- 应力温度

$T_{use(hot/cold)}$ --- 使用温度

β --- 温度变化的加速率常数介于4~8 之间

5、综合加速因子

$$AF = AF_{(t)} \times AF_{(RH)} \times AF_{(v)}$$

6、Failure Rate Estimating

$$\lambda = \frac{X^2_{((1-\alpha), (2n+2))} \times 10^9}{2 \cdot AF \cdot DH}$$

λ --- 失效率 (FIT)

X^2 --- 失效估计 (可查表得) x^2 分布函数

α --- 置信度

n --- 产品失效数

DH --- 被试验产品总的累加工作时间=样品数×总的工作时间

2、ESS (Environment stress screen) 环境应力筛选技术

环境应力筛选被广泛的应用于产品研制和制造阶段。在进行试验设计时首先要进行筛选度的计算, 这样才能更有效的把产品潜在的缺陷加速变成故障, 并检验排除。

下面介绍筛选度的数学模型：

1、温度循环筛选度

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

式中：R——温度循环的变化范围（℃）

V——温变率（℃/min）

N——温度循环次数

美国国防部DODD4245.7-M 的推荐条件是：

温变率为10℃/min

温度变化范围是： $T_U=60^{\circ}\text{C}$ $T_L=-40^{\circ}\text{C}$

即 $R=T_U-T_L=100^{\circ}\text{C}$

温度循环次数 $N=15$

e取值为1.0

所以，

$$SS=1-\exp \{-0.0017(100+0.6)^{0.6}[\ln(e+10)]^3 \times 15\}$$

$$=99.6\%$$

可见其筛选度是相当高的，产品的潜在缺陷在此设计试验条件下是可以被析出的。

2、随机振动的筛选度

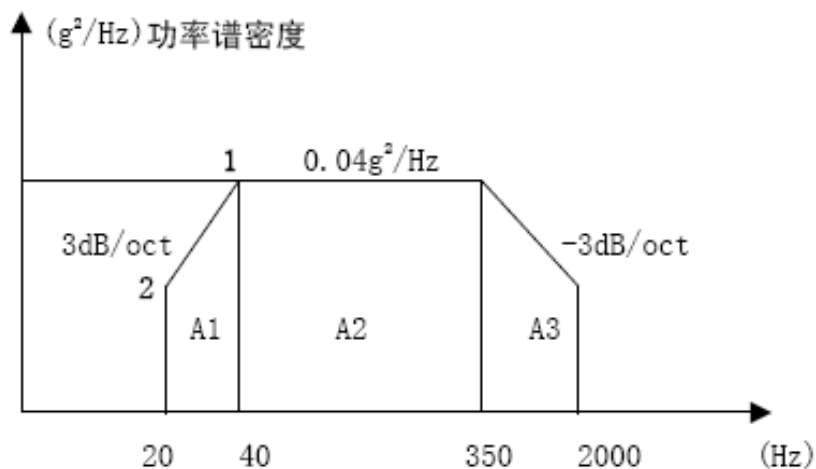
随机振动的筛选度，在优选方法上仅仅次于温度循环。它的数学模型是：

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

式中：t 为振动时间（min）

G_{rms} ——单位g

美国国防部DODD4245.7-M 的推荐条件是：



分析：如果已知某一点的功率谱密度（ PSD_1 ）和斜率（K），可求出另一点的功率谱密度（ PSD_2 ）。

即，

$$PSD_2 = PSD_1 \cdot 10^{0.1K \cdot \{\log_2 (f_2/f_1)\}}$$

这里，K——是斜率

f1, f2——对应的频率点

由以上模型可得出， G_{rms}

$$G_{rms} = (A_1 + A_2 + A_3)^{1/2}$$

其中： $G_{rms} = 6.06g$

t=20min

筛选度为：

$$ss = 1 - \exp \{-0.0046 (6.06)^{1.71} \cdot 20\}$$

$$= 1 - \exp \{-0.0046 \times 21.7785 \times 20\}$$

$$= 86.5\%$$

以上为ESS 试验时应考虑的筛选强度的计算，为了我们在工作中设计出更好的更有效的试验模型，从而最有效的把产品故障屏蔽掉，可极大的提高产品的可靠度。

3、HALT&HASS 测试技术

10

HALT (Highly Accelerated Life Testing) 和HASS(Highly Accelerated Stress Screening)是高加速寿命试验和高加速应力筛选试验。在国际大的知名公司被广泛采用。HALT 工作较为复杂，不单单是操作设备进行试验就能获得效果，要想得到满意的效果，得到准确可信的数据，对于试验技术、失效模型分析和确定问题后改善设计技术，都有环环相扣的关系。

HALT 技术的主要性能指标为：

1、温度指标可达：-100℃~+200℃；温变率>60℃/min。

2、振动指标为： 随机振动，3 轴6 自由度；>60Grms;2Hz~10KHz。

测试原理是：Thermal Step Stress Test(以步进应力找高低温极限点)；

2、Rapid Thermal Transitions Stress Test(以60℃/min 进行快速温变)；

3、Vibration Step Stress Test(以步进应力寻找振动极限点)；

4、Combined Environment Stress Test(综合第二、第三步寻找综合应力极限点)。

HALT 应用于产品开发设计阶段，对以后的可靠性试验可节省大量的资源。这种新的可靠性试验方法是由美国HOBBS 工程公司的

Gregg. k. Hobbs 博士研究提出的。这种分析技术对于飞行器、导弹部件、通信产品等高可靠性系统是必不可少的，可在设计阶段极大地改善并提高产品的耐环境设计能力。HALT 是产品研制的工具，HASS 是筛选的工具。它们常常结合使用，分别应用于产品设计阶段和制造阶段，是一种较新的

非常先进的可靠性测试技术。

总之，HALT 技术在美国，已经广泛地应用到电子产品的可靠性分析中，它已经成为很先进的产品耐环境设计工具。

4、结论

可靠性是质量的一个重要组成部分，要把可靠性管理贯穿到可靠性工程中去。要在产品的设计阶段加强可靠性技术的管理。产品设计的每个层次和阶段都应参与。生产部门为了保证设计的可靠性指标得以实现，要在元器件、原材料、外购件、生产工艺、环境、人员培训、检验、生产质量控制各个方面采用相应的可靠性措施加以保证。在产品投放市场后，要有一套培训、维护、修理、备件供应等措施加以配合，这样才能保证产品在使用中的可靠性。因此，在产品的立项、开发、生产到使用服务的全过程各个阶段，都要贯彻可靠性为中心的质量管理。

现代社会的电子产品越来越复杂，任何一个部门的一项小的环节都有可能导致重大的不可靠事故的发生。例如，美国挑战者号航天飞机由于后侧助推火箭密封圈的不可靠，导致燃料泄露，使整个发射失败，损失惨重。因此，产品的高质量、高可靠性，要求现代企业中的各个部门相互协作共同努力才能做到。

参考文献:

- 1、《系统可靠性设计与分析教程》北京航空航天大学出版社 2001.1 曾声圭等
- 2、《EIA ENGINEERING BULLETIN 》 DMSMS Conference 2000 Henry Livingston
- 3、《MILITARY HANDBOOK》 MIL- HDBK-217F 2 December 1991

—