



可靠性设计概论

上无四厂

上海市电子设备工业公司

一九八一年四月

说 明

1979年，全国电视机会议决定：我国12"黑白电视机都要达到规定的可靠性指标——亦即 $MTBF \geq 1000$ 小时。电子仪器规划会议对电子仪器的可靠性作了同样的规定。此外，其它各种电子设备的可靠性，也都相继被列为重要的设计指标。因而，广大电子系统设计人员当前正面临着—项新任务——怎样设计高可靠性的电子系统？许多设计人员希望了解可靠电子系统的设计程序。

所以，现叙述可靠电子系统的设计程序。其中，也包括具体的设计计算方法和有关数据。这些内容可以应用于宇宙飞行器、导弹、电视、计算机、通信、雷达、自动化、仪器等方面的电子系统设计中（下面所说的“电子系统”，是广义的）。

这一套设计程序的特点在于：以可靠性指标为核心而考虑各项设计内容的（从电路总体方案、电路中元器件的类型和负荷率、机内温度、电路漂移考虑，直到干扰、减振、散热等物理因素的考虑都是围绕着可靠性指标来进行的）。所以，有人称这套设计程序的基本观点为“可靠性核心论”。

本文系据北京吴本炎老师的讲课及文章整理而成。未征求吴老师本人意见，故谬误之处在所难免。望同志们指正。

§ 1. 问题的引出

1. 可靠性定义

电子系统的各个技术参量，必须在所要求的时间期限内处于正常工作范围内，而不是仅仅在一个短促的时间（例如测试时刻或演示时刻）合格就够了。

这就是说，电子系统的性能指标，除了各个技术参量（例如输出功率……等等）之外，还要加上一个正常工作时间期限方面的指标。这种能力——即电子系统在一定时间内正常工作的能力，是电子系统可靠性的反映。

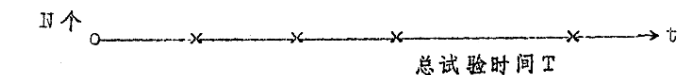
但是，还要考虑到，电子系统在一定时间内正常工作能力的大小，与电子系统的环境条件是有关的。比方说，环境条件较恶劣的话，电子系统保持正常工作的能力就较差、就容易出现故障和失效，或者说正常工作的时间期限就较短。

根据国际上通常采用的说法和我国主管部门制订的文件，可靠性的定义为：在规定环境条件下和规定时间内，完成规定功能的能力。这个定义适用于一个电子系统，也适用于一台电子设备（一台整机）或一个插入单元。

可是，往往还需要定量地描述电子系统可靠程度的高低。由于可靠与否是随机性质的事情，所以，如果采用数学语言来描述可靠性的话，那么可以用“概率”来表示。这时，电子系统可靠度（亦即可靠程度的简称）的定义为：电子系统在规定环境条件下和规定时间内完成规定功能的概率。

例如，如果对 N 个产品进行试验，每经过 Δt 时间后检查一次，每次有故障的产品数为 n_i （见图 1.1a），那么，在 t 时间内的可靠度（正常工作的概率） $R(t)$ 为：

$$R(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \left(\frac{N - \sum_{i=1}^{T/\Delta t} n_i}{N} \right)$$



$t = 0$



图 1.1a

实用上，采用近似式：

$$R(t) = \left(\frac{T / \sum_{i=1}^N n_i}{N} \right)$$

$R(t)$ 数值范围为： $0 \leq R(t) \leq 1$

$R(t)$ 值越接近于 1，则表示电子系统可靠性越高。

2 重要性及其原因：在四十年代以前，电子系统的可靠性问题是不突出的。到四十年代以后，可靠性要求越来越突出了。其原因是：

(1) 电子系统中的元器件数量增加了。而元器件数量越多，整机可靠性则越低。

比方说，整机中的元器件可靠度分别为 $R_1, R_2, R_3, \dots, R_N$ ，元器件总数为 N ，那么整机的可靠度 R 为所有元器件可靠度 R_i 的乘积：

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \dots \cdot R_N$$

设 $R_1 = R_2 = R_3, \dots = R_N = R_0$ 则可以简化为：

$$R = (R_1)^N$$

而 $0 \leq R \leq 1$ 。故 N 越大时 R 越小，即元器件数量越多时整机可靠性越低。 $R - \frac{R_1}{N}$ 曲线，如图 1.1b 所示。

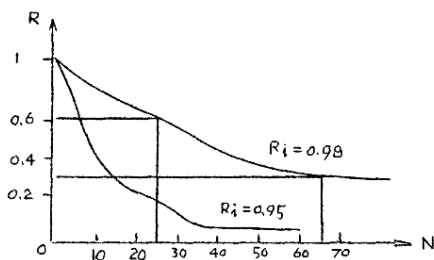


图 1.1 b

图中 1.1 a, 当 $N = 24$ 时, $R = 0.6$;

当 $N = 68$ 时, $R = 0.3$, 减小一半。

所以, $R \sim \frac{1}{N}$ 曲线表明: 当元器件数量 N 增加时, 整机可靠度 R 降低。

而现代的电子系统中, 元器件的数量 N 已经越来越多, 到几十万、百万的数量级, 如表 1-1 所示。

电子系统名称	元器件数量
收音机	10^2 ——1百
电视接收机	10^3 ——1千
台式计算机	10^4 ——1万
通信卫星	10^4 ——1万
中型电子计算机	10^5 ——10万
大型电子计算机	10^6 ——100万
阿波罗宇宙飞船	700万

(2) 电子系统的使用环境条件变得复杂和恶劣了。

环境条件包括高频电磁干扰、高温、高湿、高动态载荷(振动冲击)和低温等因素。而电子设备本身功率增大、小型化, 使失效可能性大大增加。

例如，月球上白天的温度高达 $+127^{\circ}\text{C}$ ，而晚上的温度低达 -137°C ，温度差为 264°C 。所以登月后使用的电视摄像机和各种电子机器，都要求在如此大的温差条件下保证工作可靠性。这种环境条件比一般地面电子设备的环境条件要复杂和恶劣得多。

(3) 电子系统的用途越来越重要，对于可靠性的要求也就越来越高。

最典型的例子是人造卫星、宇宙飞船、导弹的电子设备，它们要求相当高的可靠性指标。人造卫星准确返回地面、原子弹和氢弹爆炸成功，都与电子设备的可靠性有密切关系。

例如，英国电气工程师学会发表的论文指出，在英国国防部为其军队提供军事通信的“天网卫星系统”设计研制中，中心课题首先是可靠性。

又例如，美国阿波罗宇宙飞船设计中，最主要的要求是各个设备必须有高度的可靠性，电子系统的可靠性对于登月飞行起着决定性的作用。因为宇宙飞船脱离地球轨道而飞行，远离地球38万公里，如果发生危险，需要三天时间才能返回地球，所以抢救是困难的。阿波罗12号发射后不久，电源系统和导航系统因被雷电击中而断路；阿波罗14号登月舱向月球表面降落时，舱内的主计算机突然出现假信号，差一点不能登上月球；阿波罗13号因一个小小的开关未能保证可靠性而造成大爆炸，致使登月失败。

由于上述几方面原因，近三十年中许多国家化了很大力量来解决电子系统的可靠性。

3. 电子系统可靠性与设计的关系：——

关于电子系统（或整机）的设计对于可靠性的意义，是不能忽视的。有人把电子系统的可靠性完全归结为元器件可靠性和焊接工艺，而没有看到电子系统（或整机）设计对于可靠性的作用，这样就没有发挥设计方面提高电子系统（或整机）可靠性的潜力。

据美国海军电子实验室的统计，整机出现故障的原因及它们所占的百分比，如表1-2所示。

表 1 - 2

故 障 原 因	占总失效数的%
(1) 设计上的原因	40%
(2) 元器件质量上的原因	30%
(3) 操作和维护上的原因	20%
(4) 制造上的原因	10%

其实，第(2)方面的部分原因也是设计方面的，因为它与设计人员选用的元器件类型和质量级别，以及负荷率、额定值有关。

日本电视机厂都认为整机设计是保证质量最主要的因素，从比例上说，设计占80%之多，另部件质量占15%，制造工艺方面造成质量不良的因素只占5%，所以他们都以十分认真的态度来进行新产品的的设计试制工作。

所以，对于电子系统（或整机）的设计人员来说，必须把可靠性列为首要的设计要求，必须十分重视整机的可靠性设计工作，并且采取足够的可靠性措施。——这是整机设计人员在设计之初就应当明确建立的重要概念。

因而，这里专门研究电子系统可靠性的设计程序，对于保证电子系统可靠性具有一定的意义。

4. 电子系统可靠性指标

欲使电子系统具有一定的可靠性，那么在开始设计的时候，第一步首先要制订电子系统的可靠性指标。

有些产品在检验阶段有可靠性检验要求，而设计阶段却没有可靠性设计指标。显然，这样是难以保证产品可靠性的。

国际上，常用的电子系统可靠性指标表示形式有：可靠度 $R(t)$ ，平均无故障工作时间MTBF，失效率 λ ，平均修复时间MTTR，有效度 A 。

这五个可靠性特征量中，前三个都是直接从可靠程度的高低来描述电子系统可靠性，第四个特征量则是从维修的角度来描述的，而第

五个特征量是把可靠程度与维修性能联系在一起而描述的。这就是说，它们是从三种不同的角度来较全面地描述电子系统的可靠性。这三种角度用它们的英文名词的第一个字母来表示的话，它们分别为R、S、A三个字母。所以，人们常常用“RAS”的符号作为电子系统可靠性指标的简称。

关于这五个可靠性特征量的定义和参考数据，叙述如下：

1. 可靠度 $R(t)$

可靠度 $R(t)$ 的定义，详见前面第一节。

可靠度 $R(t)$ 的参考数据：——

电 子 系 统 名 称	$R(t)$
国际通信卫星Ⅲ号	
地面站	99.7%
天 线	93.5%
电 源	94.2%
决定卫星姿态的电路感触器	96.3%
电气系统配线	98.2%
远地点马达	98.0%
通信遥测及指挥	73.0%
结构及热控制	100%
国际通信卫星Ⅳ号转发器电子设备	
连续工作两个月时	99.9%
连续工作超过七年后	79.0%
×××号导弹的制导计算机	99.5%
供电系统国际水平	99.95%~99.98%

2. 平均无故障工作时间MTBF

电子系统平均无故障工作时间MTBF的定义为：电子系统无故障工作时间的平均值。其数学表示式为：

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \text{ (小时)}$$

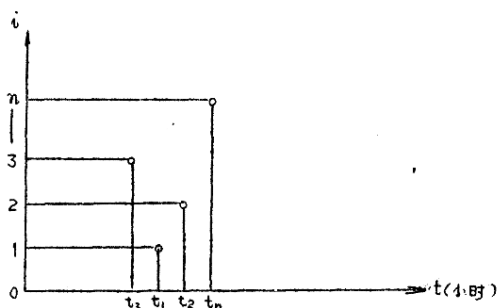


图 3.1

如图 3.1 所示，式中

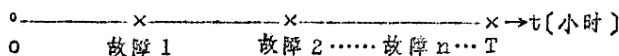
t_i ——第 i 个电子系统的无故障工作时间，〔小时〕，

n ——电子系统的数量，

MTBF 数值越大，则表示该电子系统的可靠性越高。

上述 MTBF 定义是对于一批（ n 台）电子系统或整机而言的。

一台整机的 MTBF 定义为：一台整机，在试验时，总的试验时间为 T ，其中出现的故障数为 n ，每次故障是修复的，然后整机继续试验。修理时间不包括在总试验时间 T 内。示意图，如图 3.2 所示。



其 MTBF 为：

$$MTBF = \frac{T}{n} \text{ (小时)}$$

计算举例：一台整机总的试验时间为1950小时，试验中出现6次故障，则

$$MTBF = \frac{T}{n} = \frac{1950}{6} = 325 \text{ (小时)}$$

MTBF的参考数据：——

电 子 系 统 名 称	MTBF (小时)
我国12"黑白电视接收机(1979年要求指标)	
一 般 品	1000
优 质 品	5000
我国II类数字仪器	1000
1978年集成电路电视接收机(国际水平)	20000
阿波罗宇宙飞船电子计算机	$2 \sim 2.5 \times 10^4$
英国天网卫星系统	1000
八十年代SPY-1型船载相控阵 雷达(美国无线电公司制造)	1000
美海军陆战队用的TPS-59型全固态战术对空监视 三座标相控阵雷达(美国通用电气公司年交付使 用)	1000
SPS-35型高可靠固态组体的海岸与舰对空监视雷 达(加拿大电子公司1975年制造)	1200
美国2100型双线示波器	5000
Simods数字频率合成器	10万
日本岩通SS-052P型示波器	7000
日本岩通SS-4200M型示波器	5500
日本日立V-053型示波器	4500
较好的晶体管收音机	5000
美国“泰康”远程导航设备	150
美国F-114B飞机上的AWG-9雷达系统	

(续上表)

电 子 系 统 名 称	MTBF (小时)
天 线	20~100
发 射 机	40~80
接 收 机	900~1800
数 字 计 算 机	900~1800
电 源 系 统	400~800
北京卫星地面站	
系 统	3953
大功率放大器	10000
小功率放大器	10000
升频变换器	14250
降频变换器	18500
参量放大器	20000
跟踪放大器	30000
微型计算机及其外部设备	
微型计算机	5000~8000
打印机(碰撞的)	400~800
纸带阅读器	2000
纸带穿孔机	1000
卡片阅读器	1000
卡片穿孔机	200
显示器(阴极射线管)	3000~5000
键盘打印机(非碰撞的)	3000~5000
键盘打印机(碰撞的)	300~1600
固定头的鼓	3000~10000
可动头的鼓	1000~5000
磁带装置	1500~20000

(续上表)

电 子 系 统 名 称	MTBF〔小时〕
调制——解调器	10000~20000
外部接口	20000

注：上列微型计算机及其外部设备的MTBF数据是这样求得的：
对100台以上的装置进行试验，试验时间为1年以上的连续工作时间
(即整年工作8760小时，每天连续工作24小时)，求出100台装
置的MTBF平均值，而其中每一台的MTBF，按照下列计算式求出：

$$MTBF = \frac{T}{n}$$

式中，T——整年连续工作时间8760小时。

n——T试验时间内出现的故障次数。

例如，T = 8760小时内，出现10次故障 (n = 10)，

则
$$MTBF = \frac{8760}{10} \text{〔小时〕}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{876} \text{〔故障次数/小时〕}$$

3. 失效率λ

失效率λ定义：——

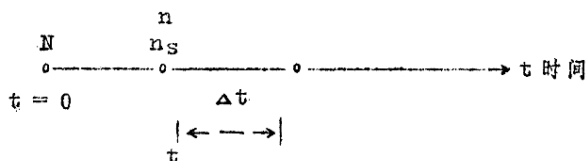


图 3.3

如图 3·3 所示，对于一批试验样品（整机或元器件），总试验样品为 N 个，试验一定时间 t 后，出现故障的样品数为 n 个，正常工作的样品数为 n_s ，则这一批样品在单位时间 Δt 内出现故障样品数为 Δn 时，该批样品的失效率为 λ ；

$$\lambda = \frac{dn}{dt}$$

一种产品失效率 λ 的定义为：该种产品在单位时间内的故障数。

因为正常工作的样品数（即时间 t 时的试验样品数）为 n_s 个，所以相对于每一个正常工作的样品来说，其失效率 λ 为：

$$\lambda = \frac{dn}{dt} / n_s = \frac{1}{n_s} \cdot \frac{dn}{dt}$$

工程上，采用近似式。如果在一定时间间隔 $(t_1 - t_2)$ 内，试验开始时的正常工作样品数为 n_s 个，而经过 $(t_1 - t_2)$ 时间间隔后出现的故障样品数为 n 个，则这一批样品中对于一个正常样品的失效率 λ 为：

$$\lambda = \frac{n}{n_s \cdot (t_1 - t_2)}$$

失效率 λ 的数值越小，则表示可靠性越高。

失效率 λ ，可以作为电子系统或整机的可靠性特征量，也可以作为元器件和接点的可靠性特征量。但是，前一种情况较少，后一种情况较多。

如果以 $[1/\text{小时}]$ 作为失效率 λ 的量纲，那么 λ 数值是极小的。所以，国际上常用 $[1/10^6 \text{ 小时}]$ 作为 λ 的量纲，而 $[1/10^6 \text{ 小时}]$ 称为 $[\text{fit}]$ 、或 $[\text{菲特}]$ 。

计算举例：如果一种元件在每 2000 小时中有一次故障，则它的失效率 λ 为：

$$\lambda = \frac{1}{2000} = 0.005 \text{ [故障数/小时]}$$

或 $\lambda = 50 \text{ [}\%1000 \text{ 小时]}$

或 $\lambda = 500 \text{ [故障数/} 10^6 \text{ 小时]}$

或 $\lambda = 500000 = 5 \times 10^5 \text{ [fit]}$

失效率 λ 的参考数据：——

元 器 件 名 称	$\lambda \text{ [fit]}$
日本 1 号卫星的元器件 (一年内)	0.3
美国“民兵”洲际导弹的金属膜电阻	4
阿波罗宇宙飞船的元器件	0.3
日本 CS-36M 海底电缆中	
增音机	30~60
晶体二极管	0.2
晶体三极管	1
日本 C-12MTY 中同轴 12 兆赫	
晶体管化载波系统, 在 2500 公里	
内的各种增音机总失效率	6.8×10^3
日本锡焊接点	0.02
美国 L5 同轴电缆载波系统	
一台增音机	900
其中的元器件	<10
我国 300 路地下通信电缆无人增音的	
晶体三极管	
大功率管 负荷率 30%	250
小功率管 负荷率 20%	250
电阻器 (负荷率为 25%)	10
纸介电容器 (负荷率为 20%)	5
云母电容器 (负荷率为 50%)	5

4. 平均修复时间 MTTR

整机的维修性 S，常用“平均修复时间 MTTR”来量度。

MTTR 的数学表示式为：

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n} \text{ [小时]}$$

式中， Δt_i ——第 i 次修复时间，[小时]，

n——修复次数，

MTTR 值越小越好。甚至希望不停机情况下脱机修理。

计算举例：一台整机，修复 5 次。各次修复时间分别为 $\Delta t_1 = 5$ 小时、 $\Delta t_2 = 6$ 小时、 $\Delta t_3 = 4$ 小时、 $\Delta t_4 = 6.5$ 小时、 $\Delta t_5 = 3.5$ 小时，则其 MTTR 为：

$$MTTR = \frac{5+6+4+6.5+3.5}{5} = 5 \text{ [小时]}$$

MTTR 的参考数据——

电 子 系 统 名 称	MTTR [分钟]
TYS-59 型雷达 (美国通用电气公司制造)	4 0
RAT-31S 型移动式三座标雷达 (意大利塞来尼亚公司 1975 年展出)	2 2

5. 有效度 A

一台整机，在一段时间内，有一部份时间是在运行工作，但是另一部份时间可能用于修理，那么，怎样表示这一段时间内整机的有效工作程度呢？

设一台整机的平均无故障工作时间 MTBF 和平均修复时间 MTTR 是一定数值。则它的有效度为 A 为：

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

A 值越大越好。A 值越大，则表示整机有效工作程度越高，修理时间越少。所以有效性 A 也是整机可靠性大小的一个标志。

A 的参考数据：——

电 子 系 统 名 称	A (%)
国际通信卫星 II 号的地面站	99.3
日本茨城卫星地面站	> 99.8 (详见图 3-5)
英国 60 兆赫同轴电缆载波系统	99.99
美国 L5 同轴电缆载波系统	99.948~99.986

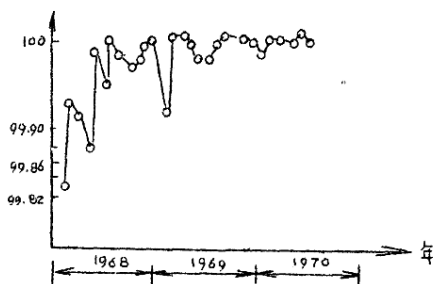


图 3-4

6. $R(t)$ - $MTBF$ - λ 三者之间的关系

推导：

根据 $R(t)$ 定义，一批 (N 个) 样品在 t 时间内出现故障的样品

数为 $n = \left(\frac{t}{\Delta t} \sum_{i=1}^n \right)$ 个，剩下的正常样品数为 $n_s = (N - n)$ 个，则可靠

度 $R(t)$ 为：

$$R(t) = N - \frac{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N} = \frac{N-n}{N} = 1 - \frac{n}{N} = \frac{n_s}{N}$$

取微分，

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{N} \cdot \frac{dn}{dt}$$

于是 $\frac{dn}{dt} = -N \cdot \frac{dR(t)}{dt}$

又根据 λ 定义，

$$\lambda = \frac{1}{n_s} \cdot \frac{dn}{dt}$$

$$\therefore \lambda = \frac{1}{n_s} \cdot \left(-N \cdot \frac{dR(t)}{dt} \right) = -\frac{N}{n_s} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$$

$$\therefore R(t) = \frac{n_s}{N}$$

$$\therefore \lambda = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$$

即 $\lambda dt = -\frac{1}{R(t)} \cdot dR(t)$

取积分，

$$\int_0^t \lambda dt = -\int_1^R \frac{dR(t)}{dR(t)} = -\ln R(t)$$

(其中， $t=0$ 时， $R=1$)