

# 第八章 可靠性试验

## 内 容 提 要



### § 8-1 基本概念

- 一、可靠性试验的定义
- 二、可靠性试验的分类
- 三、可靠性试验的基本方法

### § 8-2 可靠性筛选和电子元器件老炼

- 一、可靠性筛选
- 二、可靠性老炼（老化）

### § 8-3 环境适应性试验

- 一、环境条件
- 二、环境试验方法

### § 8-4 寿命试验和加速寿命试验

- 一、概述
- 二、寿命试验的设计

# 第八章 可靠性试验

## § 8-1 基本概念

### 一、可靠性试验的定义

为了评价或提高产品（包括系统、设备、元器件、原材料）可靠性而进行的试验，称可靠性试验。

### 二、可靠性试验的分类

#### 1. 可靠性测定试验

在事先没有规定产品可靠性指标的条件下，用来测定产品可靠特征量的试验。

## 2. 可靠性验证试验（鉴定、验收、考核）

确定产品的可靠性特征量（如某一可靠性指标）是否达到规定要求的试验。

以上1. 和 2. 试验是可靠性评价

## 3. 老炼、筛选、环境、可靠性增长试验

是提高可靠性试验。

### 三、可靠性试验的基本方法

**寿命试验或加速寿命试验**是可靠性试验的基本方法，而老炼、筛选、环境试验都是可靠性试验中的一项。

可靠性试验在工程实践中具有重要的意义，有关的理论和方法是十分丰富多彩的，由于篇幅有限我们本课程仅扼要地介绍产品（重点是电子元器件）的**老炼和筛选，环境应适性试验，寿命试验和加速寿命试验**，以及在可靠性试验中必须应用的**抽样方法**。

## § 8-2 可靠性筛选和电子元器件老炼

### 一、可靠性筛选

#### 1. 定义:

在产品制造过程中，将**不符合要求的产品**（包括成品、半成品）**剔除**，而将**符合要求的产品保留下来**的试验过程称为筛选。

注意在产品制造过程中，对各种工艺质量的检验，成品、半成品的性能参数测试都要进行筛选。

#### 2. 目的:

筛选目的是为**剔除早期失效的产品**。

### 3. 筛选应注意的问题：

① 可靠性筛选可以提高一批产品使用的可靠性，但并不能提高每一个产品的固有可靠性，因为筛选不能改变失效机理而延长任何单个元器件的寿命，它只是剔除早期失效的产品后使剩下产品的平均寿命比筛选前平均寿命提高了（如挑演员进行筛选）。

② 筛选不同于质量验收。质量验收是通过抽样检验判定一批产品是否合格从而决定接收或拒收，而筛选是对于合格产品100%地进行试验，以剔除早期失效产品。

③ 筛选应力要选好，不要对好产品造成损伤。

④ 虽然可靠性筛选要付出相当代价（材料、时间即金钱）但与筛选带来的好处相比，这种代价是值得的。

由表6-1可说明筛选的重要性。

表 6-1 元器件失效造成的损失 美元

设备类型	失 效 阶 段			
	元器件购进时	装在印刷板电路上	系统试验时	现场使用时
消费者产品	2	5	5	50
工业用设备	4	25	45	215
军用设备	7	50	120	1 000
航天设备	15	75	300	$2 \times 10^6$

表 6—1 元器件失效造成的损失 美元

设备类型	失 效 阶 段			
	元器件购进时	装在印刷板电路上	系统试验时	现场使用时
消费者产品	2	5	5	50
工业用设备	4	25	45	215
军用设备	7	50	120	1 000
航天设备	15	75	300	$2 \times 10^6$

由表6-1可见，如元器件用于消费者产品，在其购进时，找到它失效且抛掉它仅损失2美元，但在现场使用时发现它失效且抛掉它就要损失50美元。前后者相差近25倍。

对航天设备上的元器件筛选的经济性显得更明显，前后者相差约13万多倍。



因此，对产品的生产进行筛选是更应引起大家重视的问题。如何评价可靠性筛选的效果下面我们来讨论之。

#### 4. 筛选效果的评价

可靠性筛选效果可用以下参量评价：

(1) 筛选剔除率  $Q$ ：

$$Q = \frac{n}{N} \times 100\%$$

其中： $n$  — 为剔除产品的数目；

$N$  — 为参与筛选产品的总数目。

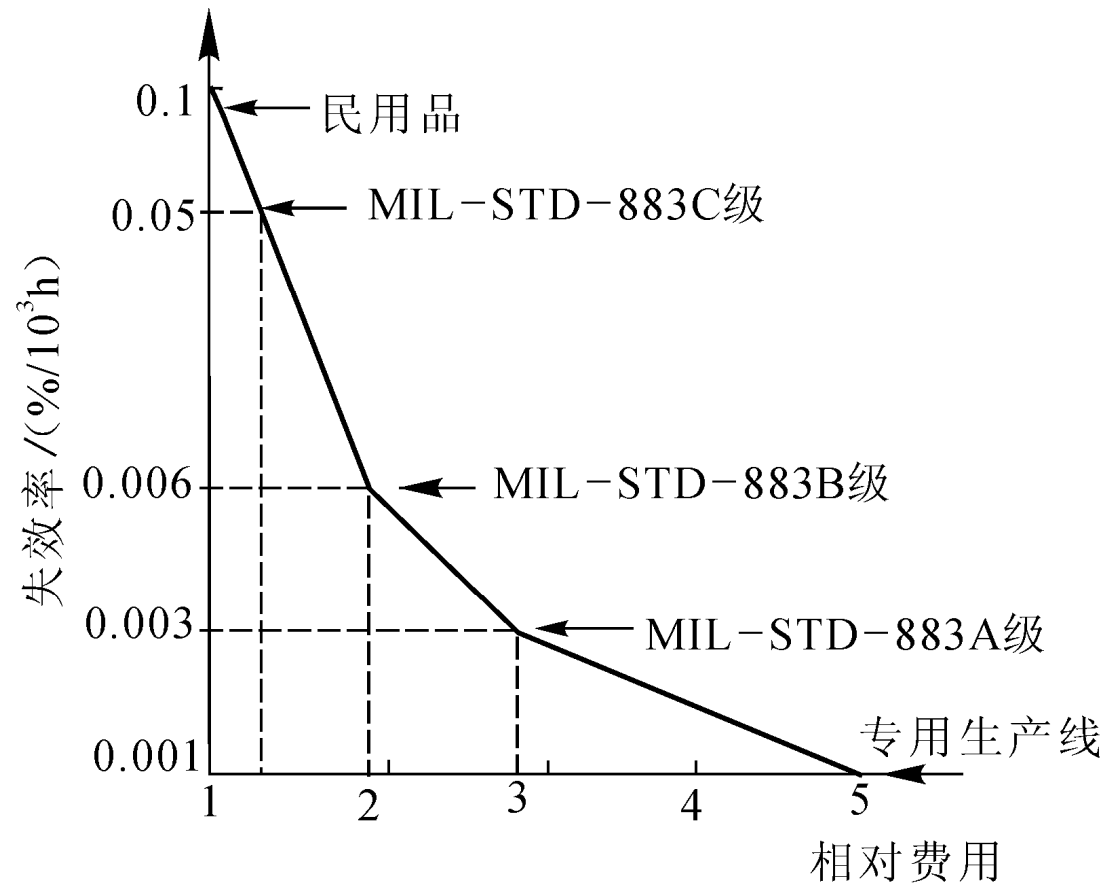
(2) 筛选效果  $\beta$  :

$$\beta = \frac{\lambda_N - \lambda_S}{\lambda_N} \times 100\%$$

其中： $\lambda_N$  — 是筛选前产品的失效率，  
 $\lambda_S$  — 是筛选后产品的失效率。

图8-1表示美国工艺水平生产的集成电路的筛选效果，筛选顺序：民用品→MIL-STD-883C级.....→专用生产线。

图8-1  
筛选效果与相对费用



评定筛选方法是否好，单看一个参量是不够的，如若**PDA (Q) 太高**，有可能是产品存在**严重缺陷**，但也可能是筛选**应力太高**，**PDA 很低**，有可能是产品**缺陷少**，也可能是筛选**应力和试验时间不足**。

因此在评价筛选方法时，应将剔除率和筛选效果结合起来才较全面，当取**同样Q值时**， **$\beta \uparrow$  筛选方法越优**，

反言之，当 **$\beta$  表现相同时**， **$Q \downarrow$  筛选方法越优**。

## 5. 常用筛选方法:

### (1) 初始参数筛选和慢漂移参数筛选

筛选方法的目的是为了得到符合要求的产品，剔除那些超出容差极限的产品。

见图8-2所示。

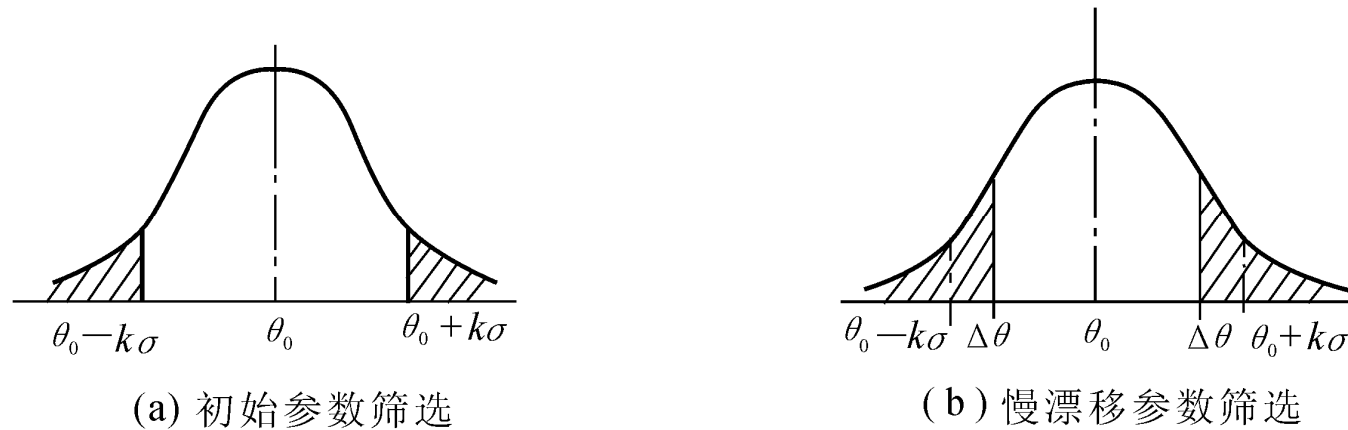


图 8-2 初始参数筛选和慢漂移参数筛选

- (2) 检查筛选
- (3) 密封性筛选
- (4) 环境应力筛选：包括振动，离心加速度，冲击，温度循环等。

如航天部有些单位采用了高效应力筛选，把有效性最高的温度循环和随机振动结合起来取得了很好的效果。

- (5) 寿命筛选：如用高温贮存促使早期失效，产品提前失效等。
- (6) 线性判别筛选。

## 6. 筛选的项目和条件的确定

不同类型的元器件，不同的生产厂家，由于结构不同，使用的材料和工艺不同，早期失效和偶然失效的分界点不同。

所以必须进行可靠性摸底试验来掌握产品的失效机理和失效分布，失效机理和筛选项目、应力和时间的关系，从而来制订筛选条件。

关于有关标准和其他厂家的经验必须参考，但不能机械照搬，以免造成漏项及条件偏松偏严的理象。

## 二、可靠性老炼（老化）

### 老炼的目的

在元器件投入使用前，先把使用后可能发生的**参数漂移消除掉**，从而达到稳定的目的。

### 老炼的规范（老炼的条件和时间等）

由**产品本身和对产品稳定性的要求**定之。

例如用作高精度稳压电源电压基准的标准稳压管，要在正常工作状态下老炼几个月。

但是老炼是在产品的制造厂家进行，不在使用单位进行。



从可靠性角度考虑，某种元件是否需要老炼，主要看这种元件**参数的漂移是否影响使用可靠性**，若影响则必须进行之。

**老炼和筛选的关系：**

两者**目的**不同

**筛选**为剔除早期产品。

**老炼**消除产品参数漂移。

但都可提高使用可靠性，**经常可合二为一进行**，如寿命筛选对于正常产品也是在起老炼作用，而老炼过程对早期失效的产品也起了筛选作用。

## § 8-3 环境适应性试验

众所周知，产品的使用环境对其可靠性影响很大，所以要进行环境适应性试验。

首先应了解环境条件。

### 一、环境条件

#### 1. 环境条件定义

产品在贮存、运输和工作过程中可能遇到的一切外界影响因素（产品在生产厂家内、外）。

#### 2. 环境条件分类

## (1) 气候环境条件



温 湿 气 风 雨 雪 水 露 霜 沙 盐 油 游 等  
 度 度 压 雪 尘 雾 雾 离  
 气  
 体

## (2) 机械环境条件

振 冲 离 碰 跌 摇 静 失 声 爆 冲 等  
 动 击 心 撞 落 摆 力 重 振 炸 击  
 负 荷 波

(3) 辐射条件	太阳 辐射	核 辐射	紫 外 线 辐 射	宇 宙 线 辐 射	等	
(4) 生物条件	昆 虫	霉 菌	啮 齿 动 物	等		
(5) 电磁条件:	电 场	磁 场	闪 电	雷 击	电 晕	放 电 等

(6) 人为因素    使用    维护    包装    保管    等

### 3. 环境条件对产品的影响

#### (1) 气候条件

对产品的主要影响是：导致电性能改变，材料腐蚀和机械损伤。

#### (2) 力学条件（即机械环境条件）

对产品的主要影响是：结构损伤、材料断裂或疲劳，引线断开。

#### (3) 辐射条件

对产品的主要影响是：太阳紫外辐射引起的材料老化，核爆炸的中子辐射引起永久性损伤，辐射引起瞬时效应，可使电子元器件损坏。

#### (4) 生物条件

**生物条件**的影响是：霉菌使用有机材料和部分无机材料强度降低，介质损耗增大，金属腐蚀。

白蚁、木蜂、老鼠会咬坏电缆，排出的粪便引起短路。

#### (5) 电磁条件

**电磁条件**引起电子设备内、外部的电磁干扰。等等不可胜举。

## 二、环境试验方法

### 1. 现场使用试验

当一些产品在样机研制完成之后，必须经过一段时间的**现场使用考验**，才能大批生产。

这个现场使用试验取得的数据可真实地反映产品在实际使用条件下的可靠性，但是**周期长，花费大**，故有一定局限性，用于重要产品。

### 2. 天然暴露试验

把样品长期**暴露于天然环境**，样品可处于工作负荷状态或贮存状态，通过定期观测去取得产品各参数，性能和外观的变化。

### 3. 人工模拟试验

**人工模拟试验**是人工控制条件下的试验，是在试验箱内或试验台上进行的。

这种方法经常应用于产品制造厂家，具体试验方法**参照有关(GB、GJB等)标准**。

**环境模拟试验**的设计者应对产品的实际使用的环境有确切的了解，以使正确地规定试验条件和合理地安排试验顺序，为取得准确数据，特别应注意试验设备要合格应定期标定。



## § 8-4 寿命试验和加速寿命试验

### 一、概述

#### 1. 寿命试验的定义

**评价分析产品寿命特征的试验。**产品的失效率、平均寿命等可靠性特征量反映了产品的寿命特征。

#### 2. 寿命试验的作用

**了解产品寿命分布**的统计规律以作为可靠性分析的基础，作为制定筛选条件和改进产品质量的依据。

### 3. 寿命试验的分类

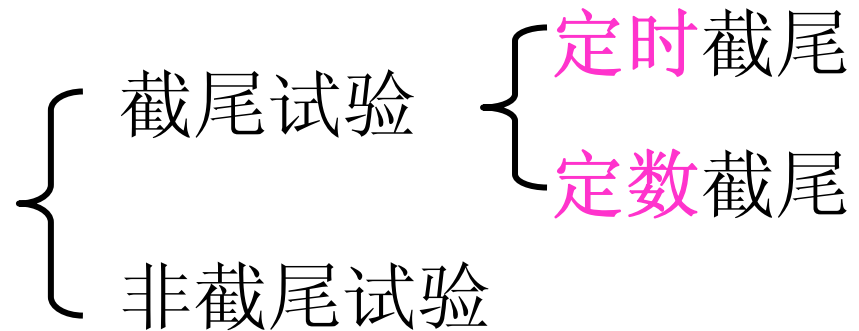
(1) 按试验进行的**时间**分：

⎧	长期寿命试验	(一般情况简称寿命试验)
		<b>试验应力不大于工作应力</b>
⎨	加速寿命试验	<b>试验应力 &gt; 工作应力</b>

(2) 按欲测定各阶段**可靠性**可分为：

⎧	贮存寿命试验	保证产品 <b>贮存寿命</b>
	⎨	工作寿命试验

(3) 按进行试验的截尾方式可分为：



#### 4. 各类寿命试验的定义或含义

##### (1) 长期寿命试验：

模仿正常工作应力进行的寿命试验，该试验需要较长的时间，

如要求某种产品在某一工作应力下，应保工作100000h，则按该工作应力试验，实验人员三班倒工作( $100000\text{h} \div 24\text{h}$ )4167天，看其工作有无故障。

因此可知，长期寿命试验需要的时间是比较长的。

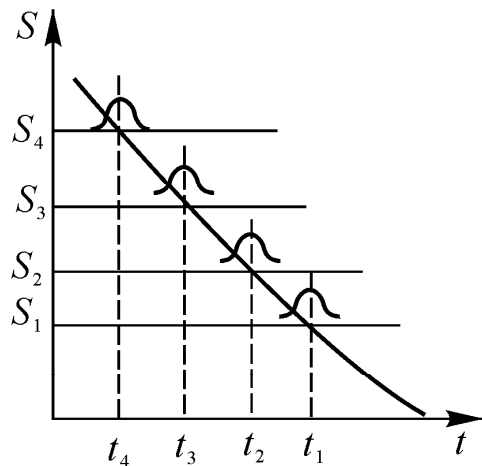
## (2) 加速寿命试验：

是在既不改变产品的失效机理又不增加新的失效因子的前提下，提高试验应力，加速产品失效进程的一种试验试法。

这种试验可以用较短的时间快速的评价产品的可靠性。

如钟表发条的拉平试验就是一种加速试验（因为它试验中施加的**应力远远大于正常工作时承受的应力**，任何钟表工作中发条都不会出现被拉成直线的状态）。

① 恒定应力加速寿命试验(图8-3a)



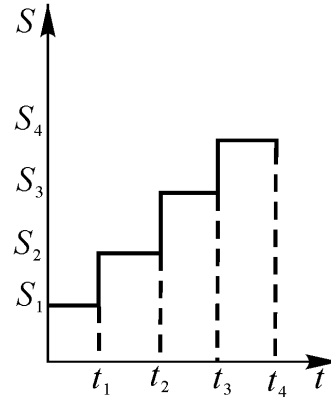
(a) 恒定应力法

在试验过程中**应力保持不变**的试验。

**特点：**数据容易处理,外推准确性较高,但试验时间较长。

## ② 步进应力加速寿命试验(图8-3b)

试验过程中应力随时间分阶段逐步增强的试验。



(b)步进应力法

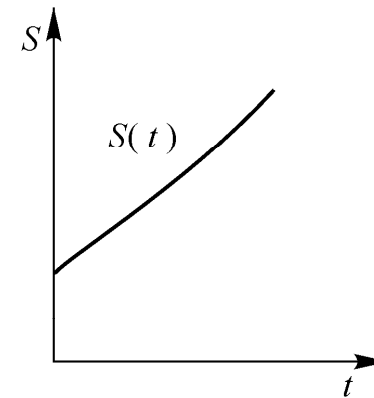
### 特点:

预计精确性低（因为这种方法忽略了低一级应力试验对高一级应力试验的影响，这是不符合实际情况的）。

但其试验周期短，故常用于定性分析场合（行否？好、坏）。

### ③ 序进应力加速寿命试验(图8-3c)

试验过程中应力随时间**等速连续增强**的试验。



(c) 序进应力法

**特点:**

试验周期短，但需要有**专门的程序控制**设备，数据处理复杂。

### (3) 贮存寿命试验:

产品在规定的环境条件下进行**非工作状态**的存放试验。

<问: 试验中要不要加工作应力? 不要!  
∴非工作状态>

通过贮存试验可以了解产品在特定环境条件下的**贮存可靠性**。如解决贮存期间的参数变化规律, 能否保持原有的可靠性指标, 贮存期可多长等。



## 注意：

① **贮存条件**根据产品的实际贮存情况可有室内，棚下、露天、坑道等。

② 由于贮存试验样品处于非工作状态，失效率较低，通常要**选择较多**的样品做较长期的观察测量。

### (4) 工作寿命试验

对产品有规定条件下（保证工作状态）**作加负荷的试验。**

### (5) 非截尾寿命试验

试验一直进行到**全部试验样品都失效**才截止的试验。

## (6) 截尾寿命试验:

试验没有进行到全部试验样品都失效就截止的试验。

### ① 定时截尾:

试验进行到规定的时间就结束。

### ② 定数截尾:

试验进行到规定的失效数就结束。

我们讲以上概念，主要是为了使大家会应用之设计寿命试验，以保证产品的可靠性。

因此下面我们讲寿命试验和加速寿命试验的设计问题。

## 二、寿命试验的设计

### 1. 寿命试验设计需要考虑的问题

#### ① 试验目的：

目的不同，试验样品、应力、时间的要求不同，分析方法不同。

寿命试验主要有以下三种用途：

#### ( i ) 可靠性测定：

即确定产品的寿命分布、失效率、平均寿命等参数。

#### (ii) 可靠性验证：

判断某批产品是否符合规定的可靠性要求。

(iii) 可靠性鉴定：

鉴定产品的设计和生产工艺是否能生产出符合可靠性要求的产品。

它们都应该按着相应的试验标准和方法来进行。

② 试验条件及失效判据标准的确定。

③ 试验样品的选取及其抽样数。

注意：

寿命试验样品必须在经过筛选试验和例行试验后的合格批产品中抽取。

- ④ 试验的测试项目及测试设备。
- ⑤ 试验的测试周期及截止时间的确定。
- ⑥ 试验结果的数据处理方法。

总而言之进行一次寿命试验要化费大量的人力物力和时间。因此，在试验未进行前应周密确定好以上六方面问题。

## 2. 寿命试验的设计

由于时间关系，我们仅举例讨论产品的寿命分布服从参数为  $\frac{t}{\theta}$ （其中 $t$ 为测试时间， $\theta$ 为被测试产品的平均寿命粗略估值）的指数分布的测试周期，投试样品数量及试验截止时间进行设计确定。

例 8-1 某种开关管寿命分布服从参数为  $\frac{t}{\theta}$  的指数分布，从摸底试验知其 在  $300^{\circ}\text{C}$  下的平均寿命约 80 小时，在  $250^{\circ}\text{C}$  下约为 300 小时，在  $200^{\circ}\text{C}$  下约为 3000 小时。现作  $300^{\circ}\text{C}$ 、 $250^{\circ}\text{C}$ 、 $200^{\circ}\text{C}$  下的贮存试验，要求在测试过程中得到的累积失效概率分别为 4%、10%、2%、40%、60%，求测试时间安排（测试周期）。

解：

(1) 求测试时间  $t$  和累积失效概率的  $F(t)$  的关系式。

∵ 该产品寿命分布服从参数为  $\frac{t}{\theta}$  的指数分布，则产品累积失效分布函数有：

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\theta}}$$

故有： $e^{-\frac{t}{\theta}} = 1 - F(t) \therefore e^{\frac{t}{\theta}} = \frac{1}{1 - F(t)}$

两边取对数（自然对数）：

$$\frac{t}{\theta} = \ln \frac{1}{1 - F(t)}$$

$$\therefore t = \theta \ln \frac{1}{1 - F(t)}$$

(8-1)



为了工程使用方便，我们分别取 $F(t)$ 为2%，4%，6%.....70%等值，求出相应的 $\frac{t}{\theta}$ 的值，见表8-1。

表8-1 测试时间选择表

$F(t_i)/(\%)$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
$t_i/\theta$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.13	0.15	0.17	0.20	0.22	0.25	0.27	0.30	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45
$F(t_i)/(\%)$	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	
$t_i/\theta$	0.48	0.51	0.55	0.58	0.61	0.65	0.69	0.73	0.78	0.82	0.87	0.92	0.97	1.02	1.08	1.14	1.20	

## (2) 计算测试时间

求在300℃下贮存试验的累积失效率为4%时的测试时间。

查表8-1得，当该产品 $F(t)=4\%$ 时，

$$t_{300}/\theta = 0.04。$$

$$\begin{aligned} \therefore t_{300} &= 0.04 \times \theta = 0.04 \times 80 \quad (\theta = 80 \text{ 见已知}) \\ &= 3.2 \text{ 小时} \end{aligned}$$

同理求出各种温度下贮存试验的累积失效率为要求各种情况的测试时间得表8-2。

例8-1测试时间安排

表8-2

$F(t_i) / (\%)$	4	10	20	40	60
300°C	3.2	8	17.6	41	73.6
250°C	12	30	66	153	276
200°C	120	300	666	1 530	2 760

(3) 结论：各种情况的测试时间见表8-2。

例 8-2 已知上述产品平均寿命约为3000小时，希望在1000小时试验中观察到  $r = 20$  个失效，求应投入试验的样品数目。

解：

(1) 求投样数 $n$ 和累积失效概率 $F(t)$ 的关系式：

据标准有：
$$n = r / F(t) \quad (8-2)$$

其中  $n > 20$

$r$ —结束试验时的失效数， $F(t)$ 见上。

(2) 求 $F(t)$  累积失效概率

$$\therefore \frac{t}{\theta} = \frac{1000}{3000} = 0.33$$

查表8-1得： $F(t) = 28\%$

(3) 求投入试验的样品数

由式 (8-2)

$$n = r / F(t) = 20 / 0.28 = 71$$

$\because n = 71 > 20$ ，用式 (8-2) 正确

(4) 结论：应投入试验的样品数为71个。

例 8-3 已知上述产品投入贮存寿命试验。从摸底试验知：其产品 $300^{\circ}\text{C}$ 、 $250^{\circ}\text{C}$ 和 $200^{\circ}\text{C}$ 下的平均寿命分别约为80小时、300小时和3000小时（同例1），求使累积失效概率达到60%时，上述各温度下贮存寿命试验的截止时间。

解：（1）求 $300^{\circ}\text{C}$ 时的截止时间

由公式（8-1）：

$$t = \theta \ln \frac{1}{1-F(t)} = 80 \ln \frac{1}{1-0.6} = 73.3 \text{小时}$$

(2) 求250℃时的截止时间

由公式 (8-1) :

$$t = \theta \ln \frac{1}{1-F(t)} = 300 \ln \frac{1}{1-0.6} = 274.9 \text{小时}$$

(3) 求200℃时的截止时间

由公式 (8-1) 得

$$t = \theta \ln \frac{1}{1-F(t)} = 3000 \ln \frac{1}{1-0.6} = 2749 \text{小时}$$

- (4) 结论：300℃的截尾时间为73.3小时；  
250℃的截尾时间为274.9小时；  
200℃的截尾时间为2749小时。

书上表8-2最后一纵行与我们计算答案不符，这是由于他计算太不精确之故，主要不精是由于表8-1不精引起的。

① 以上所用公式（8-1）并不适用于一切产品，各种不同寿命分布的产品有各自的公式，这些公式是根据各自的寿命分布函数进行数学推导。

② 以上所用公式（8-2）也并不是放之四海而皆准的，它要根据不同的适合各种产品的标准文献来选定，因此大家要学会选用和使用标准。

③ 对其他寿命试验设计需要考虑的问题，都不是凭主观意断而确定的，均根据相应的标准应用数学来确定之。



从例 8-3 我们可以清楚地看出：当产品在 200°C 温度下试验时需近四个月（三班倒），需 2749 小时，可达到 60% 产品失效。

而在 250°C 同样达 60% 产品失效只要近 11 天半（三班倒）274.9 小时。

而上升到 300°C，同样效果仅需 3 天（三班倒）73.3 小时。

因此，为了用较短的时间评价产品的可靠性，我们要研究和[使用加速寿命试验](#)。



中国可靠性网

<http://www.kekaoxing.com>

感谢 [kingdoodoo](#) 分享