

第八章 可靠性试验

内容提要



§ 8-4 寿命试验和加速寿命试验

三、加速寿命试验的设计

§ 8-5 可靠性增长试验

一、可靠性增长试验定义与方式

二、可靠性增长试验模型

§ 8-6 抽样方法

一、两类错误及其风险

二、抽检特性曲线（OC曲线）

三、抽样数目 n 和判据 C 的确定

四、寿命试验的抽样问题

三、加速寿命试验的设计

我们主要考虑**恒定应力加速试验**，且不做定量的详细分析，大家看书上写的有关内容时，应注意使用公式的条件，而不能将其盲目地“放之四海而皆准”。

1. 加速寿命试验设计中应**考虑的问题**

(1) 加速应力类型 S 的选择：

对某一产品选什么作加速应力？是温度？是工作电流？工作电压……。

注意：其**失效机理**分析。

在估计电子元器件在常温下贮存时,一般选温度为 S 。其反应速率与 T 之间按下式计算:

$$\frac{dM}{dt} = A_0 e^{-A_E / kT} \quad (8-3)$$

式中 A_E — 失效机构激活能,单位为ev;
 k — 玻尔兹曼常数;
 T — 绝对温度;
 A_0 — 常数。

在估计电子元器件在额定工作条件下工作时,可选直流电压(或电流、功率)为 S 。其产品寿命 t 与电压 V 之间按下式计算:

$$t = \frac{1}{dV^c} \quad (8-4)$$

式中 d 、 c — 正的常数。

(2) 确定加速应力水平 (S_1, S_2, \dots, S_K) 和样品数量

- ① k 不能小于4, 但也不宜很大。
- ② S_{\max} 和 S_{\min} 之间应有较大间隔以保证试验的准确性。

③ 其中应力应接近或等于产品工作的额定值， S_{\max} 不得大于产品结构、材料和制造工艺所能承受的极限应力，以免带来新的失效机理。

④ 应力水平间隔应合适，对某情况的定量研究(见教材)。

如温度：

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_1} - \Delta; \frac{1}{T_3} = \frac{1}{T_1} - 2\Delta; \dots$$

$$\Delta = \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_k} \right) / (k - 1)$$

(8-5)

如电应力：

$$\lg V_2 = \lg V_1 + \Delta; \lg V_3 = \lg V_1 + 2\Delta; \dots$$

$$\Delta = (\lg V_k - \lg V_1) / (k - 1)$$

(8-6)

▲试验样品选择:

- ① 随机抽取。
- ② 等分 k 组, 每组样品一般不少于10只, 特殊情况不少于5只。
- (3) 确定测试周期和停试时间(见表8-3)

表 8-3

恒定应力加速寿命试验的测试时间

$\lg \tau$	0	0.33	0.67	1	1.33	1.67	2	2.33
τ/h	1	2	5	10	20	50	100	200

2. 加速寿命试验的前提条件

加速寿命试验的前提条件见教材。

恒定应力寿命试验和加速寿命试验, 产品失效分布为其他分布试验见有关标准。

§ 8-5 可靠性增长试验

可靠性增长

是指通过逐步改正产品设计与制造中的缺陷，不断提高产品可靠性的过程。

缺陷有**系统性缺陷**和**残余缺陷**。

可靠性增长就是改正产品中的缺陷。

其途径：

故障源**检测**(分析和试验) → **发现问题**
→ **反馈** → **改进**。

即“试验—分析—改进”过程。

一、可靠性增长试验的定义与方式

1.可靠性增长试验的定义

可靠性增长试验是指在**真实或模拟真实**的环境条件下对产品进行正规试验的过程。

其特点:

(1) 可靠性增长试验对象是经环境试验的样机或是生产的样品;

(2) 可靠性增长试验的剖面是真实剖面或模拟真实剖面(按有关标准);

2.可靠性增长试验方式

可靠性增长试验一般有以下**三种方式:**

(1) 试验 — 改进 — 再试验。

通过试验 → 暴露问题 → 分析原因 → 立即改进 → 再试验，如此反复，即**边试边改**。

增长曲线如图8-4(a)所示为平滑型。

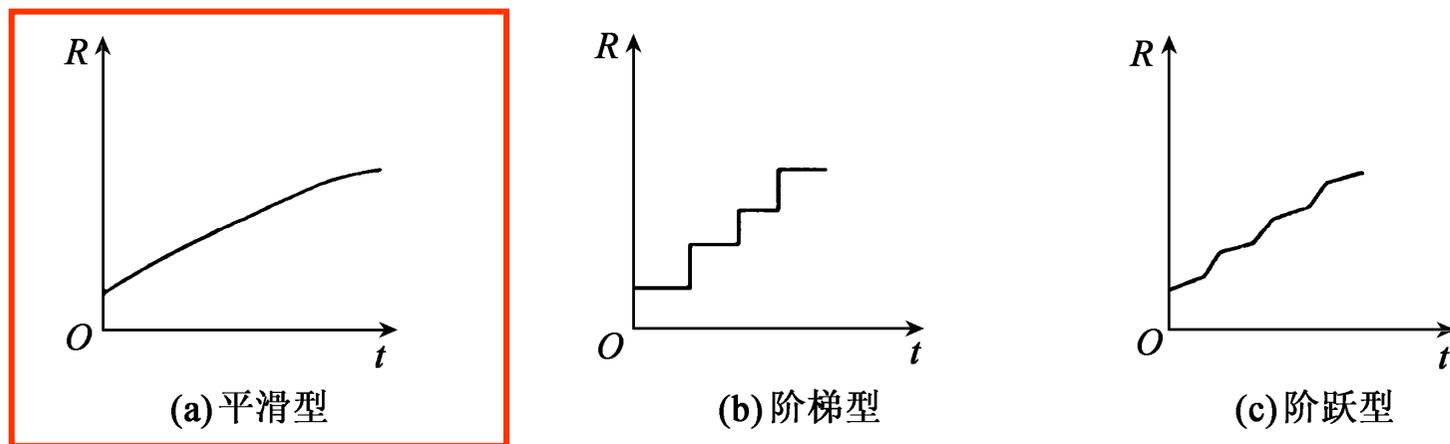


图8-4 可靠性增长试验方式

(2) 试验 — 发现问题 — 再试验。

通过试验 → 暴露问题 → **不立即**改进 →
再试验 → 再暴露问题 → **一起**改进。

增长曲线如图8-4(b)所示为**阶梯型**。

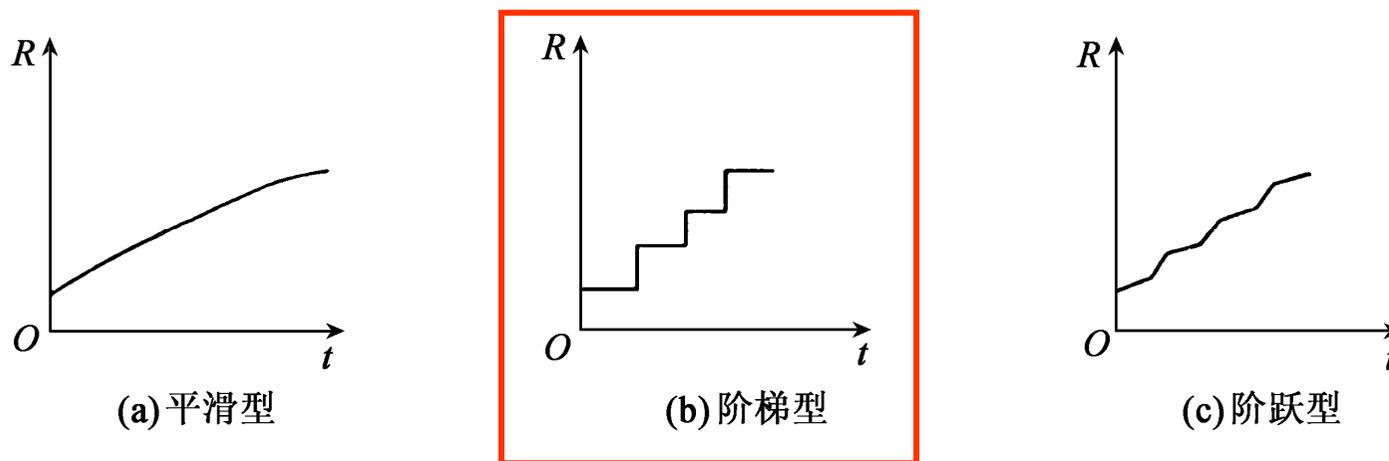


图8-4 可靠性增长试验方式

(3) 待延缓改进的试验 — 改进 — 再试验。

试验 → 暴露问题 → $\left\{ \begin{array}{l} \text{有些问题立即改进} \\ \text{有些问题延缓改进} \end{array} \right.$

增长曲线如图8-4(c)所示为**阶跃型**。

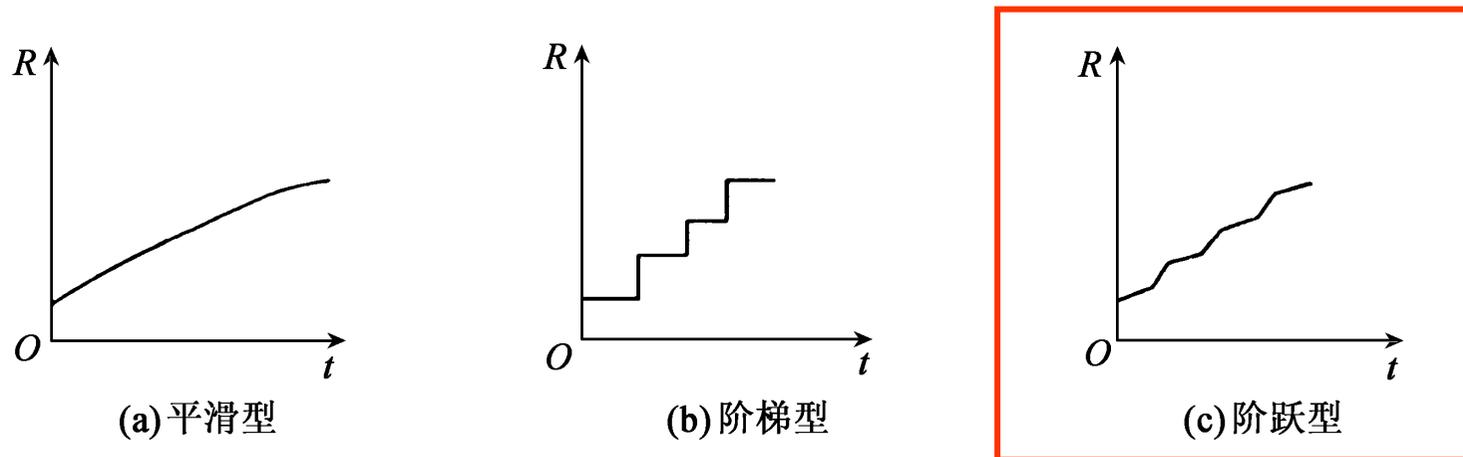


图8-4 可靠性增长试验方式

二、可靠性增长模型

为了实现可靠性增长的管理，**需用数学模型对增长速度作评估。**

常用模型很多，下面介绍三种模型。

1. Compertz 增长模型

Compertz 增长模型是时间序列分析中用来反映增长趋势的一种工具。

(1) **特点：**

这模型开始增长较快，以后逐步减慢，最后趋于一个极限。

(2) Compertz 增长模型的表达式:

$$R(N) = abc^N \quad N = 0, 1, 2, \dots \quad (8-11)$$

式中 N — 时期序号;

$R(N)$ — 时期 N 的可靠性;

a, b, c — 模型参数, $0 < a \leq 1, 0 < b < 1,$
 $0 < c < 1。$

当 $N \rightarrow \infty$ 时, $R(N) \rightarrow a$, 可见 a 为 $R(N)$ 增长上限;

当 $N \rightarrow 0$ 时, $R(N) \rightarrow ab$, 可见 ab 为 $R(N)$ 增长的初始水平;

b 反映初始水平与 $R(N)$ 增长上限的**比值**;

c 反映 $R(N)$ 增长**速度**, $c \downarrow \rightarrow$ 增长**速度** \uparrow 。

模型参数 a 、 b 、 c 的求法见教材。

在实际工程中,用**Compertz 增长模型曲线**调整管理计划、改进研究策略,使产品可靠性增长符合预期要求。

2. Duane 增长模型

Duane 增长模型是1962年美国通用电气公司(J.D.Duane)提出的。

(1) Duane 增长模型的表达式

$$\lambda_{\Sigma}(T) = kT^{-c} \quad (8-14)$$

式中 T — 累积工作时间;

$\lambda_{\Sigma}(T)$ — 到 T 为止的累积失效率;

k, c — 模型参数, k 为常数, c 为增长速率。

对式(8-14)两边取对数,可得**线性表达式**:

$$\ln \lambda_{\Sigma}(T) = \ln k - c \ln T \quad (8-15)$$

式(8-14)和式(8-15)反映了**失效率随研制阶段的进展而下降**的情况。

(2) 失效率的估计值 $\hat{\lambda}_{\Sigma}$



$$\hat{\lambda}_{\Sigma}(T) = \frac{F}{T} \quad (8-16)$$

式中 F — 到 T 时刻为止观察到的失效数。

将式(8-16)代入式(8-14)得

$$F = \hat{\lambda}_{\Sigma}(T) \times T = kT^{-c} \times T = kT^{1-c} \quad (8-17)$$

由式(8-17)得瞬时失效率:

$$\lambda(T) = \frac{dF}{dT} = (1-c)kT^{-c} \quad (8-18)$$

瞬时平均寿命:

$$\theta(T) = \frac{1}{\lambda(T)} = \frac{T^c}{(1-c)k} \quad (8-19)$$

式(8-18)、式(8-19)可用下面式子表示:

$$\lambda(T) = (1-c)\lambda_{\Sigma}(T) \quad (8-20)$$

$$\theta(T) = (1-c)^{-1}\theta_{\Sigma}(T) \quad (8-21)$$

模型参数 c 、 k 的求法见教材。

3. AMSAA 增长模型

AMSAA 增长模型是由美国物资系统分析中心L.Crow提出的，它是根据Duane 增长模型改进而来。

(1) AMSAA 增长模型的表达式

在式(8-17)中, 令 $a = k$, $b = 1 - c$, 则

$$F = aT^b \quad (8-29)$$

式中 F — 时间 T 内累积失效数的期望值;

a — 初始可靠性的函数;

b — 反映改进效果的函数。

瞬时失效率:

$$\lambda(T) = \frac{dF}{dT} = abT^{b-1} \quad (8-30)$$

瞬时平均寿命:

$$\theta(T) = \frac{1}{\lambda(T)} = \frac{1}{ab} T^{1-b} \quad (8-31)$$

(2) 模型参数 a, b 的估计值

模型参数 a, b 的最大似然估计值为:

$$\left. \begin{aligned} \hat{a} &= \frac{F}{T^b} \\ \hat{b} &= \frac{F}{\sum_{i=1}^F \ln \frac{T}{T_i}} \end{aligned} \right\} (8-32)$$

(3) AMSAA 增长模型 **优度 检验**

增长试验数据是否符合AMSAA 模型?

需要进行拟合 **优度 检验**。检验统计量为:

$$C_N^2 = \frac{1}{12N} + \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{T_i}{T} \right)^{\bar{b}} - \frac{2i-1}{2N} \right]^2 \quad (8-33)$$

式中 $N = \begin{cases} F & \text{定时截尾} \\ F-1 & \text{定数截尾} \end{cases}$

$$\bar{b} = \frac{F-1}{F} \hat{b}$$

给定显著性水平 α , 查表8-5可得 C_N^2

若 $C_N^2 < C_N^2(\alpha)$ 则认为拟合良好,

数据符合AMSAA 模型。

AMSAA 模型与Duane 模型具有内在联系, 但**AMSAA 模型可以直接用试验原始数据**(试验时间与失效数), 计算较为简单。

因此,目前工程上**广泛采用AMSAA 模型**。

§ 8-6 抽样方法

抽样技术是一门新兴的学科，理论比较系统完整丰富，中国统计出版社1985年4月出版由张尧庭、吴辉翻译的美国W.G科克伦著的《抽样技术》一书约50万字。我们仅**从应用最需要的问题出发**，讲一些基本理论和基本方法，不同于一些书。

一、两类错误及其风险

在生产中为了检验某一批产品的某一质量指标是否合格，经常对该批产品的质量指标**逐一地（100%的）进行检查**。但是有时这样做是**不可能或不经济的**。

如有一批灯泡要从使用寿命这个指标来衡量它的质量，若规定寿命低于1000小时者为次废品，试确定这些灯泡的次废品率。根据概率论，设灯泡寿命为随机变量 Z ，则该批灯泡的次废品率为：

$$F(X) = F(1000) = P\{Z < 1000\}$$

可能有人会说把每个灯泡的使用寿命都测出来就行了，实际上这种办法行不通。

∴ 将每个灯泡的寿命都测出后，**所有灯泡都报销不能用了，这样的生产还有什么意义？**

又如生产的10万只晶体管，了解它的某一个指标，测该指标不会损坏合格管子，按原理可逐一测完10万晶体管，这样**就要花费大批人力物力和时间，显然也不可取。**

因此，我们研究或应用抽样检验的方法。

即从所有产品（**母体**）中**抽取一小部分**产品（**子样**）进行试验。

由**子样的特性去推断母体的质量**是否合格。

这样就**很难完全避免推断出现错误。**

由上可知母体（所有产品）的合格率越高，抽取子样合格率的可能性越大。但**不一定母体的合格率达到标（符合要求），子样的合格率就必定达标（抽样抽到的产品是坏产品分布区）**；

而**母体的合格率不达标（不符合要求），子样的合格率也不一定就一定不达标**，当抽到的子样是好产品分布区时就可以合格。这样用抽取一部分产品，检验以其检验结果判定全部产品是否合格，从而决定使用方能否接收生产方生产的全部产品，**可能出现四种结果**，见下表8-6。

表 8-6

序号	全部产品合格率达标否	抽样检验产品合格率达标否	使用方本应接受否 (根据全部产品)	使用方实际接受否 (根据子样产品)	使用者决定是否正确	枉受损失者
1	√	√	√	√	√	
2	×	×	×	×	√	
3	√	×	√	×	×	生产方
4	×	√	×	√	×	使用方

可见抽样检验可能出现两类错误，并分别使生产方和使用方承受损失（倒霉，承受风险下面分别讲之）。

1. 第一类错误：生产方风险 α

设AQL（合格质量水平）为 p_1 （AQL为合格的故障率，即为合理的不合格率）。当产品不合格率 $P \leq p_1$ 时，本来使用方应该接受产品，但由于抽样的偶然性，误判做不能接收（误废）见上表中3，给生产方带来损失，这种错误称为第一类错误。

这种误判的概率 α ，标志生产方承担风险的大小，称为生产方风险， $\alpha \uparrow$ 生产方风险越大。

2. 第二类错误：使用方风险 β

设LTPD（批允许不合格率）为 P_2 ，当产品不合格率 $P \geq P_2$ 时，使用方不应接受产品，但由于抽样的偶然性**误判做可以接受**（误收）见上表中4，**给使用方带来损失**，这种错误称为**第二类错误**。

这种误判的概率 β ，标志着使用者承担风险的大小，故称为使用方风险， $\beta \uparrow$ **使用方风险越大**。

而在优先规定 P_2 和 β 的抽样检验中，常称 $(1 - \beta)$ 为置信度（因为置信是站在消费者的立场上，应置信度 \uparrow ，越可靠）。

可以看生产方风险 α 越小，使用方风险 β 越大，反之也成立，即使用方风险 β 越小。

因此，应该在实际工作中应**双方（生产、使用方）协商一个可接受的 α 、 β 作制定抽样方案的依据。**

二、抽检特性曲线（OC曲线）

抽检特性曲线OC是一条表示抽检方案特征的曲线。现代的任何抽样方案都必须带有抽检特性曲线，没有抽检特性曲线的抽样方案是不完整的，或者是不能接收的。

因此，本课首先讲授这条曲线。

1. OC曲线的获得

设一批产品的总件数为 N ，其不合格率为 p ，抽样检验的产品数目 n ，在 n 件产品中检验出的不合格产品的数目为 J ， c 为一个规定的定值，即当 $J \leq c$ 时，则判做全部产品合格，由使用方所接收。

由于随机变量 J 是超几何分布，根据概率论理论可知，被使用方所接受的概率为：

$$P_a(p, N, n, J \leq c) = \frac{\sum_{J=0}^c C_{N \cdot p}^J \cdot C_{N(1-p)}^J}{C_N^n} \quad (8-34)$$

设接收产品总数 N ，抽检数 n ，抽样合格判据中标准 C ，分别为某一定值，则

$$P_a = f(p)$$

可以 p 为横坐标，以 P_a 为纵坐标画出相应曲线。此曲线称为**OC曲线**，图8-5。

这条曲线称抽检特性曲线可称OC曲线。

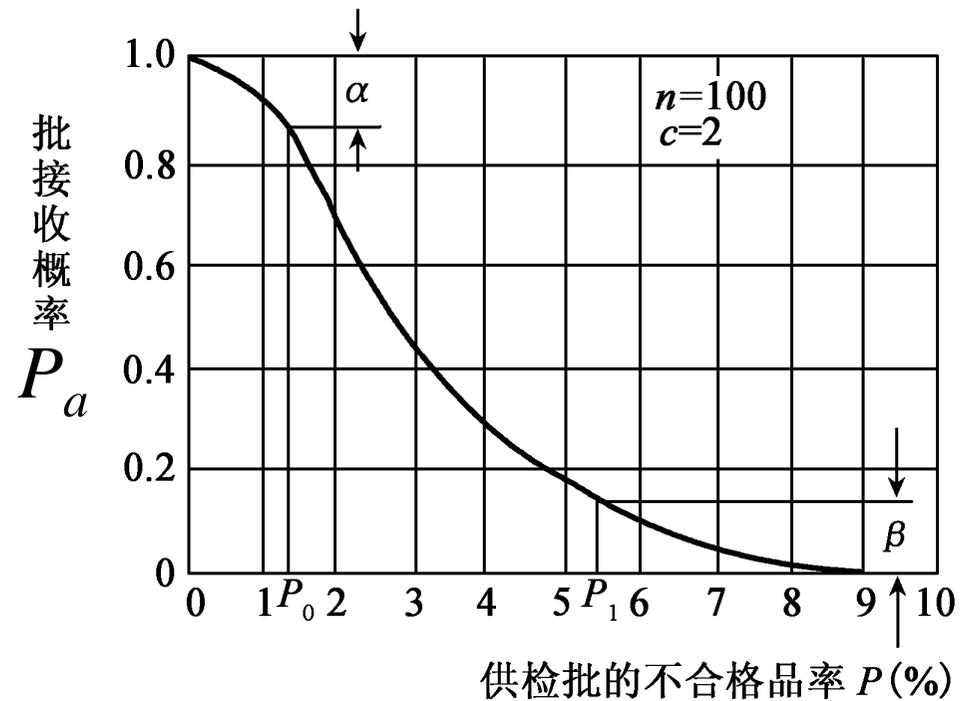


图8-5抽样特性曲线

2. OC曲线的性质

大家注意到OC曲线的**自变量**为全部接收产品的**不合格率** p ，**应变量**是使用方的**接受概率**：

$$P_a(p, N, n, J \leq c)$$

因此该曲线的形状是受 N, n, c 的影响的，下面我们分别讨论 **N, n 和 c** 对OC曲线的影响。

研究方法：用实例画出曲线对比之。

- (1) n 和 c 固定，批量 N 对 OC 曲线的影响
当 $n = 28$ 和 $c = 2$ 时， N 的变化对曲线的影响，见图 8-6。

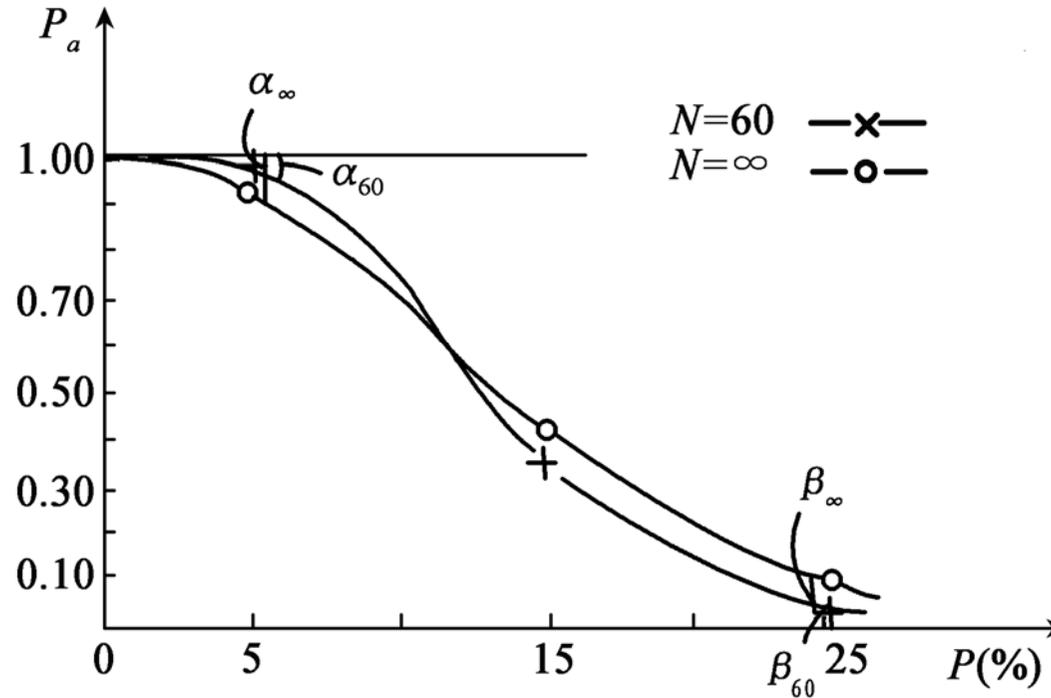


图8-6 N 的变化对抽样特性曲线的影响($n=28, C=2$)

由图8-6可见， N 的变化对抽检特性曲线变化的影响不大，特别是当 N 比较大时， N 对OC的影响更小。

(2) N 和 C 固定, n 变化对OC曲线的影响

设取 $c = 2$, 因为 N 的变化对曲线的影响不大, 故不定它。 n 取不同值: $n = 30, 50, 100$ 和 200 分别画出四条曲线, 见图 8-7。

可见 n 的变化对OC曲线的影响是比较大的, $n \uparrow$ OC曲线越陡, 接受概率越小, 抽检越严格。

对使用方,
欢迎什么样的OC
曲线?

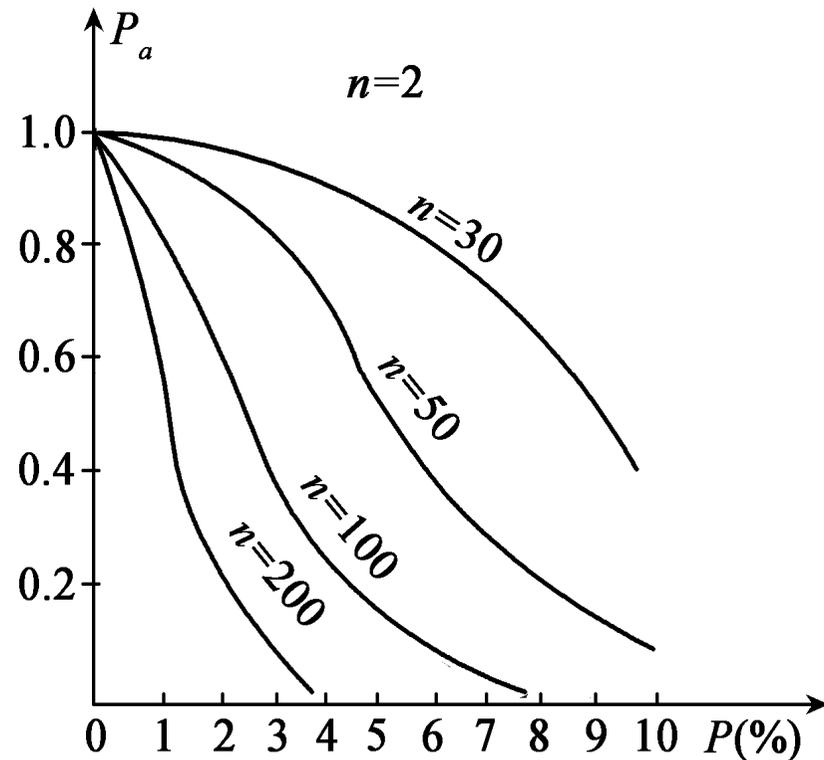


图8-7 n 对OC曲线的影响

(3) N 和 n 固定, c 变化对OC曲线的影响
 设取 $N = 1000$, $n = 30$ 。 C 取不同值:
 1和5分别画出两条曲线, 见图 8-8。

由图可见, C 的变化对OC曲线的影响也是较大, c 越小, 接受的概率越小, 抽检越严格。

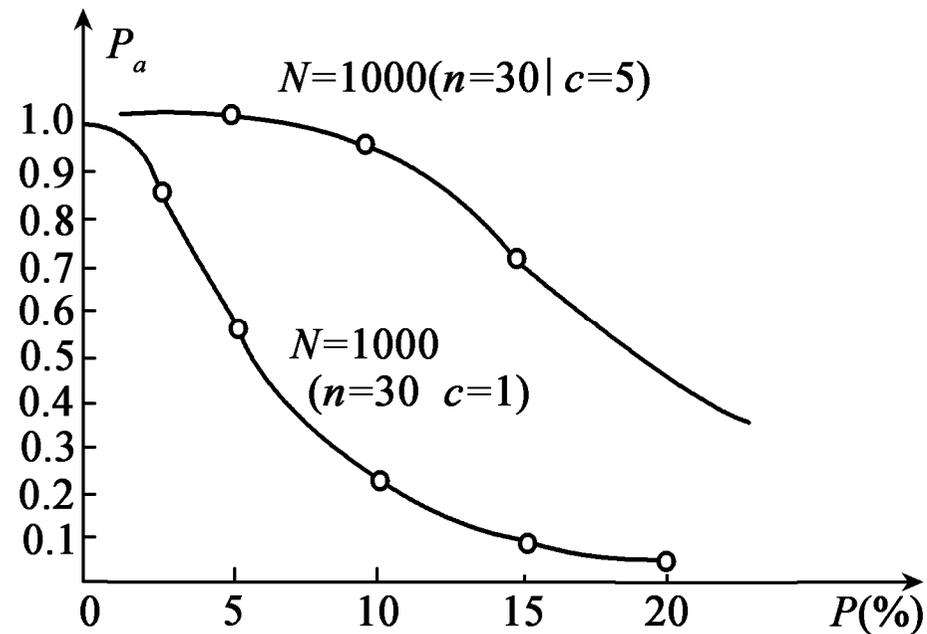


图8-6 C 的变化对抽样特性曲线的影响($N=1000, n=30$)

3. 生产方风险 α 、使用方风险 β 和OC曲线的关系

α 、 β
和OC曲线
的关系如图
8-9所示。

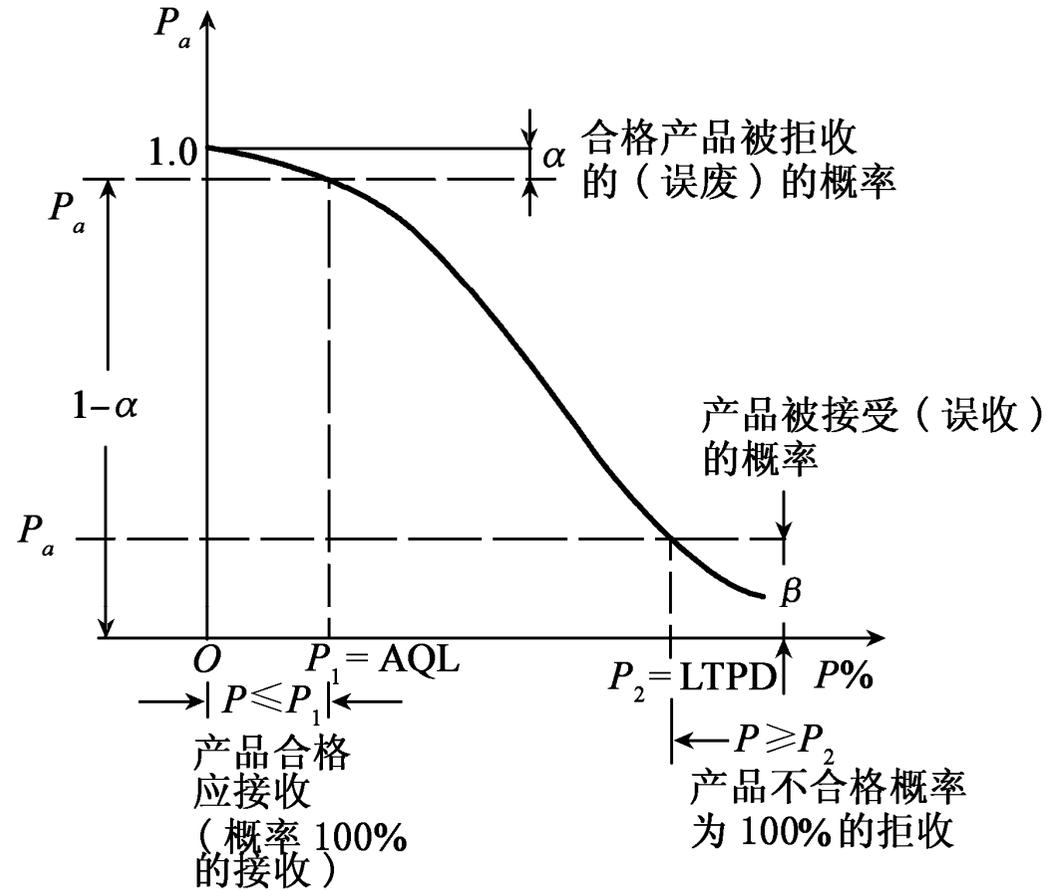


图8-9

由图8-9可知： $0 \leq p \leq p_1$ 段内的产品合格，应100%被使用方接受，考虑临界 $p = p_1$ 的产品，可以看出只有概率 $P_a(p, N, n, J \leq c)$ 的可能被接受。

而 $p \leq p_1$ 时，最多有 $1 - P_a(p_1, N, n, J \leq c)$ 被误废了。

因而生产方风险 $\alpha = 1 - P_a(p_1, N, n, J \leq C)$

即 图8-9中所标：

$$P_a(p_1, N, n, J \leq c) = 1 - \alpha \quad (8-35)$$

使用方风险为：

$$\beta = P_a(p_2, N, n, J \leq c) \quad (8-36)$$

三、抽样数目 n 和判据 c 的确定

根据抽样曲线和生产方、使用方协商确定的 α , β , 确定抽样数目 n 和判据标准 C 。

从式 (8-35) 、 (8-36) 可知 , 当 N, P_1, R_2, β 确定时, 解联立两式可以求出抽样数 n 和判据标准 c 。

注意：

(1) 从推导式 (8-34) 时，大家知道，随机变量 J 不同分布函数时， $P_a(p, N, n, J \leq c)$ 的数学式也不同，故应特别注意。因此，示式(8-34)不是放之“四海而皆准”。

$\left\{ \begin{array}{l} (8-35) \\ (8-36) \end{array} \right.$ 方程组的形式是多种多样的。

(2) 工程为了减少计算量，使大家方便的使用上述理论，针对各种分布，国家标准(GB/T2828和GB/T2829)编了很多表，大家应会查表，以确定抽检方案(n, c)。

(3) “百分比”抽样的不合理性

“百分比”抽样是按批量的确定比例抽取样本。即 n / N 为常数,而规定样本中不允许有不合格品($c = 0$)。

由于对批量大的批抽取较大的样本,因而抽样方案太严;反之太松。

因此,这种抽样方法在数学上没有根据,很不合理,以后避免使用。

四、寿命试验的抽样问题

上述的抽样方法同样适用于产品寿命试验。

仅是用可接收的失效率 λ (记作AFR)去代替 AQL(p_1); 用极限失效率 λ_1 (记作LFR)去代替 LTPD (p_2), 去计算 n 和 c 。

关于可靠性试验, 我们应讲到这里, 希望能了解这方面的理论, 使用这方面的标准。在将来的工作中, 无论是作为生产方还是使用者不要主观意想、糊里糊涂地损害自己的利益。

习题八 答案

1. (1) 求

$F(t_i)$ 分别为2%,6%,12%,24%,48%时 t_i / θ 的值。

由表8-1得 t_i / θ 的值分别为:

0.02, 0.06, 0.13, 0.27, 0.65。

(2) 对于300°C的储存试验, $\because \theta = 8\text{h}$

当 $F(t_i) = 2\%$ 时, $t_i / \theta = 0.02$

$\therefore t_i = 0.02 \times 8 = 0.16\text{h}$

同理可得 $F(t_i) = 6\%, 12\%, 24\%, 48\%$ 的
测试时间为: 0.48h, 1.04h, 2.16h, 5.2h。

对于 200°C , 100°C 的储存试验, 根据它们的寿命 θ 为50h、400h。同理可求出测试时间, 见下表:

温度 \ 时间 (h) $F(t)\%$	2	6	12	24	48
300°C	0.16	0.48	1.04	2.16	5.2
200°C	1	3	6.5	13.5	32.5
100°C	8	24	52	108	260

2. 解：由式（8-1）求出150°下寿命试验的截止时间为

$$\begin{aligned} t &= \theta \ln \frac{1}{1-F(t)} = 5000 \ln \frac{1}{1-0.2} \\ &= 1116(\text{h}) \end{aligned}$$

由式（8-2）求出试验投样品数目为

$$n = \frac{r}{F(t)} = \frac{5}{20\%} = 25(\text{个})。$$



中国可靠性网

<http://www.kekaoxing.com>

感谢 [kingdoodoo](#) 分享