中华人民共和国国家标准

设备可靠性试验 可靠性测定试验的点估计和区间估计方法（指数分布）

UDC 621.3—192.001.4
:001.5:519.25
GB 5080.4—85

Equipment reliability testing
Procedure for point estimates and confidence intervals from reliability determination tests
(Exponental distribution)

1 用途

本标准规定了寿命服从指数分布，或近似服从指数分布的产品的可靠性测定试验的点估计、置信限的数值法和图估法。

本方法适用于任何时间或任何试验次数以后的可靠性试验。在数据处理中，更多的信息对得到较高精度的置信限和估计是有用的。本方法可以使用以往试验的现存数据或现场数据，假若提供的这种数据是充分完整的，便能很好地确定产品的可靠性。本方法对不同原始资料汇集起来的数据（例如来自不同试验条件下的原始数据）不适用。

本标准中用到“时间”单位的地方，可以用距离、周期或其他适用的量来代替。

受试产品可以是可修复的，也可以是不可修复的产品。但是图估法不适用于首次失效后经修复再投入试验的产品。

若要对成功率进行测定试验，可以用第6章的方法。这些方法是建立在试验次数或受试样品数的基础上的。由于成功率试验是按成功与失败进行分类，因此使用这种方法依赖失效或失败的次数。

2 引证文件

GB 3187—82《可靠性基本名词术语及定义》；
GB 2689.1～2689.4—81《寿命试验和加速寿命试验方法》；
GB 3358—82《统计学名词及符号》。

3 点估计和置信限的含意

一个点估计值是单个数值，用于表示一个统计参数的未知真值。例如，失效率、平均无故障时间。这里的点估计一般是指“观测”值。

置信限规定了在估计值周围的置信区间，这个区间以确定的概率（即置信水平）包含着被估计参数的真值。

当使用的信息量较大时，有较窄的置信区间。使用的信息是有关试验时间和失效数的累计值，试验产品数或试验次数，或建立在试验基础上的试用成败次数。

置信区间可以是单边的或双边的。对于单边置信区间给出置信下限或置信上限；对于双边置信区间则应同时给出下限和上限。

国家标准局 1985－04－17 发布　　　　1986－01－01 实施

本标准推荐采用90%的置信水平。按照这里推荐的置信水平，将有90%的概率包含特征量的真值。

4 符号及定义

本标准使用下列符号。“观测点”是指规定的试验截止时间或规定的试验截止次数或试验中的失效数，并在测定点上来确定其估计值或置信限。

$f(t)$ =失效时间的概率密度函数。

$F(t)$ =失效时间的累积分布，在时间 t 内的失效概率。

$F_p(v_1, v_2)$ =自由度分别为 v_1 和 v_2 的 F 分布的 p 分位数的理论值。

i=基于失效时间（t_i）的失效次序数。

m=平均无故障时间的真值。

$\hat{m}$ =平均无故障时间的点估计（观测值）。

m_F=平均首次失效时间的真值（MTTF）。

$\hat{m}_F$=平均首次失效时间的点估计（观测值）。

$m(0, t_0)$ =在（0，t_0）时间内的平均无故障时间的真值。

$\hat{m}(0, t_0)$ =在（0，t_0）时间内的平均无故障时间的点估计值（观测值）。

n=受试样品数或试验（试用）次数。

$P_{0.50}(t_i)$ =t_i 的50%中位秩（见表4）。

r=在测定试验中相关失效的总数。

R=成功率真值。

$\hat{R}$ =成功率的点估计值（观测值）。

$R(t)=1-F(t)$ =成功概率。

t=时间（距离、周期次数或其他适当的量）。

t_m^*=第 m 个产品预定的试验时间。

t_i=按失效的顺序，第 i 个失效所对应的相关试验时间。

$t_p(v)$ =自由度为 v 的 t 分布的 p 分位数的理论值。

T^*=到规定的截止时间所累积的相关试验时间。

T_r=到规定失效数所累积的相关试验时间。

λ=恒定失效率真值。

$\hat{\lambda}$ =恒定失效率点估计值（观测值）。

$x_p^2(v)$ =自由度为 v 的 x^2 分布的 p 分位数理论值。

5 数据处理方法

对失效率和平均无故障时间（对可修复产品）或平均首次失效时间（对不可修复产品）的估计，以下的数值方法和图估法可同时用于“可修复”和“不可修复”的情况。这些估计依赖于到测定点的全部相关失效数和累积的相关试验时间。

在计算点估计和置信限以前，应该对恒定失效率假设的有效性作出检验。

平均无故障时间可用 MTBF=m；

平均的首次失效时间可用 MTTF=m_F；

$m_F=m$，以下统称平均寿命；

失效率 $\lambda=\frac{1}{m}$。

5.1 定时试验

测定点的累积相关试验时间 T^* 按照附录 A 确定。下列公式对有替换或无替换、可修复或不可修复的产品同样适用。公式中 r 为计算到测定点为止的相关失效总数。

5.1.1　点估计

失效率的点估计是：

$$\hat{\lambda}=\frac{r}{T^*}$$

平均寿命的点估计是：

$$\hat{m}=\frac{T^*}{r}$$

如果到测定点没有观测到失效，即 $r=0$，失效率点估计的推荐公式为：

$$\hat{\lambda}=\frac{1}{3T^*}$$

5.1.2　置信区间

a.　置信水平为90%的失效率的置信限表达式如下（x^2 分布的数值见表1）：

单边置信区间，上限：

$$\lambda<\hat{\lambda}\ \frac{x^2_{0.90}\ (2r+2)}{2r} \text{或} \quad \lambda<\frac{x^2_{0.90}\ (2r+2)}{2T^*}$$

双边置信区间：

$$\hat{\lambda}\ \frac{x^2_{0.05}\ (2r)}{2r}<\lambda<\hat{\lambda}\ \frac{x^2_{0.95}\ (2r+2)}{2r}$$

或

$$\frac{x^2_{0.05}\ (2r)}{2T^*}<\lambda<\frac{x^2_{0.95}\ (2r+2)}{2T^*}$$

如果没有观测到失效，仅能确定单边置信上限，而且不能使用基于 $\hat{\lambda}$ 的计算公式。

b.　置信水平为90%的平均寿命的置信限表达式如下（x^2 分布的数值见表1）：

单边置信区间，下限

$$m>\hat{m}\ \frac{2r}{x^2_{0.90}\ (2r+2)} \text{或} \ m>\frac{2T^*}{x^2_{0.90}\ (2r+2)}$$

双边置信区间：

$$\hat{m}\ \frac{2r}{x^2_{0.95}\ (2r+2)}<m<\hat{m}\ \frac{2r}{x^2_{0.05}\ (2r)}$$

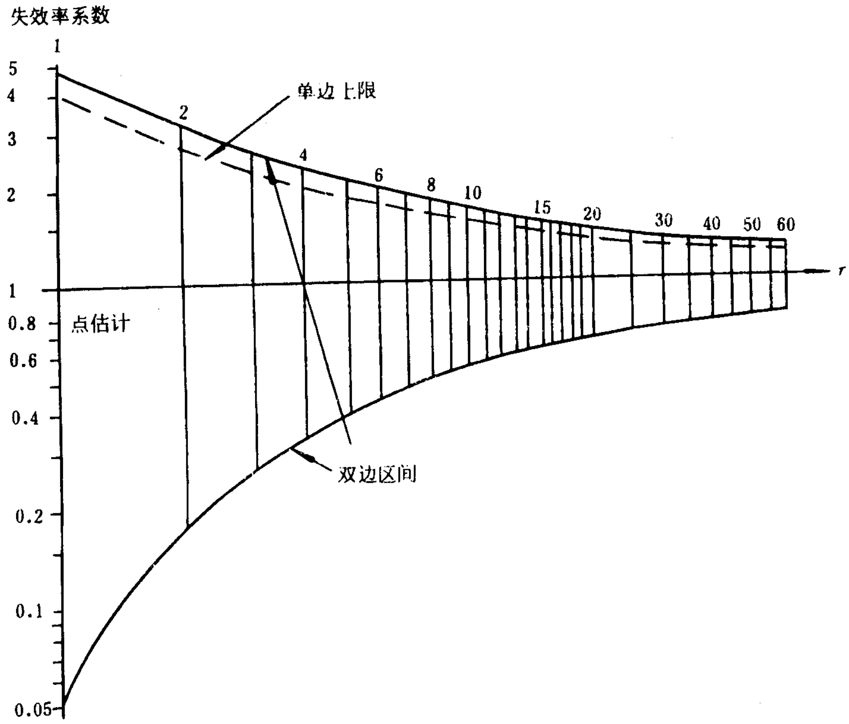
或

$$\frac{2T^*}{x^2_{0.95}\ (2r+2)}<m<\frac{2T^*}{x^2_{0.05}\ (2r)}$$

如果无失效，仅能确定置信下限。

90%的置信限是失效数 r 的函数，在图1和表5中表示出来。置信限在这里表示成点估计 $\hat{\lambda}$ 或 $\hat{m}$ 乘以适当的系数。

注：对于给定的估计精度，可以利用表6，近似地得到所需要的失效数 r，根据所需失效数 r，可以近似地求得所需累积试验时间 $T^*=\frac{r}{\lambda}$。其中失效率 λ 是根据以往经验假设的。



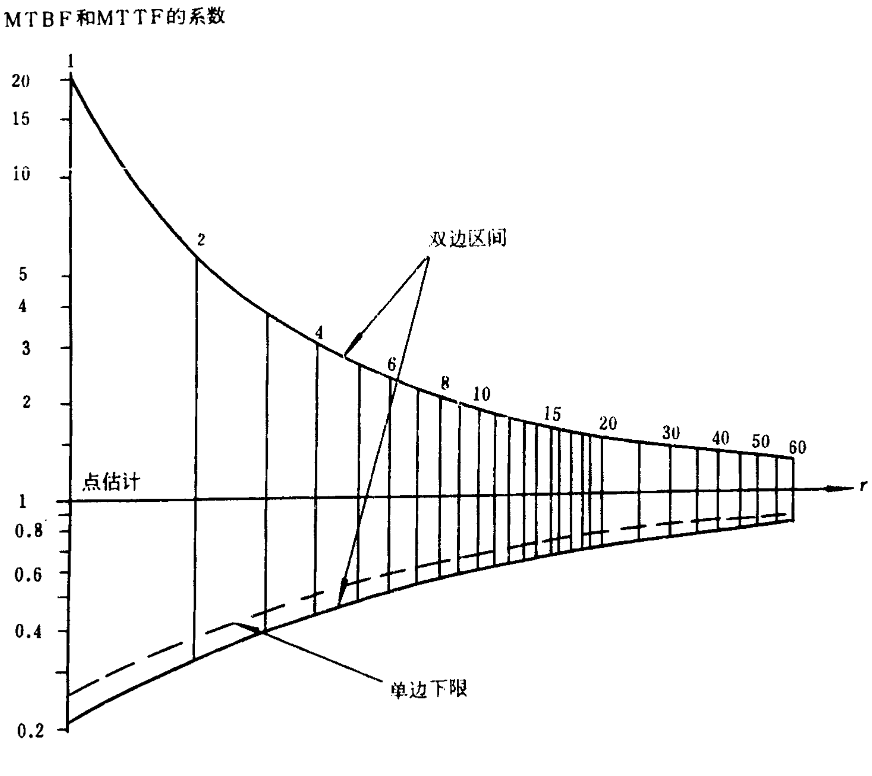


图1　90%的置信限（定时试验）

5.2 定数试验

到测定点的累积试验时间 T_r 按附录 A 确定。下列公式对有替换或无替换，可修复或不可修复的产品同样适用。

5.2.1 点估计

失效率的点估计是：

$$\hat{\lambda}=\frac{r}{T_r}$$

平均寿命的点估计是：

$$\hat{m}=\frac{T_r}{r}$$

由于失效数很小的估计不很可靠，应尽量避免使用。在制订试验计划时应注意使 T_r 充分大于期望的平均寿命。

5.2.2 置信区间

置信水平为 90% 的失效率置信限表达式如下（x^2 分布数值见表 1）：

单边置信区间，其上限为：

$$\lambda<\hat{\lambda}\ \frac{x^2_{0.90}\ (2r)}{2r}\text{或}\ \lambda<\frac{x^2_{0.90}\ (2r)}{2T_r}$$

双边置信区间：

$$\hat{\lambda}\ \frac{x^2_{0.05}\ (2r)}{2r}<\lambda<\hat{\lambda}\ \frac{x^2_{0.95}\ (2r)}{2r}$$

或

$$\frac{x^2_{0.05}\ (2r)}{2T_r}<\lambda<\frac{x^2_{0.95}\ (2r)}{2T_r}$$

置信水平为 90% 的平均寿命的置信限表达式如下（x^2 分布的数值见表 1）：

单边置信区间，其下限为：

$$m>\hat{m}\ \frac{2r}{x^2_{0.90}\ (2r)}\text{或}\ m>\frac{2T_r}{x^2_{0.90}\ (2r)}$$

双边置信区间：

$$\hat{m}\ \frac{2r}{x^2_{0.95}\ (2r)}<m<\hat{m}\ \frac{2r}{x^2_{0.05}\ (2r)}$$

或

$$\frac{2T_r}{x^2_{0.95}\ (2r)}<m<\frac{2T_r}{x^2_{0.05}\ (2r)}$$

5.3 图估法

本方法使用单边对数纸来估计失效率和平均寿命。

寿命试验不必进行到所有样品失效，截尾试验也是适用的。

用单边对数纸给出点估计，仅适用于首次失效时间和失效数至少为 4 的情况。图估法给出点估计，还可以表示偏离恒定失效率的迹象。

受试产品数为 n，观察到的失效数为 r，对于每个失效产品，记录相关试验时间 t_i。

按失效时间的顺序排列得

$$t_1<t_2<\cdots<t_r$$

在单边对数纸上，t_i 值是按线性刻度点在横轴上，而 $\dfrac{1}{1-\dfrac{P_{0.50}\ (t_i)}{100}}$ 按对数刻度点在纵坐标

上。其中 $P_{0.50}(t_i)/100$ 是中位秩，其数值可以查表 4。如果恒定失效率的假设成立，则这些点与通过 $t_i=0$，比例为 1 的直线拟合得较好。见图 2 在画直线时，主要根据中间的一些点决定斜率。若这些点在直线附近，那么，平均寿命的估计是纵轴为 2.72 所对应的时间坐标 t。失效率的估计是 t 值的倒数。

如果所描绘的各点不能拟合成一条直线，则失效率可能不是恒定的。对非恒定失效率的情况见 GB 2689.2—81。

6 成功率

成功率是指一个产品在规定条件下完成规定功能的概率，或在规定条件下试验成功的概率。在测定受试产品或试验的成功率时，把受试产品或试验分为成功或失败两种情况。在相邻两次成功的试验之间，受试设备必须恢复到试验开始时同样的状态和性能，成功率的点估计（成功率观测值）和置信区间与试验的结束方式无关，它们可以是固定试验次数，固定成功次数或固定失败次数。

6.1 点估计

成功率的点估计是：

$$\hat{R}=\frac{n-r}{n}$$

式中：n——总试验次数或受试产品数。

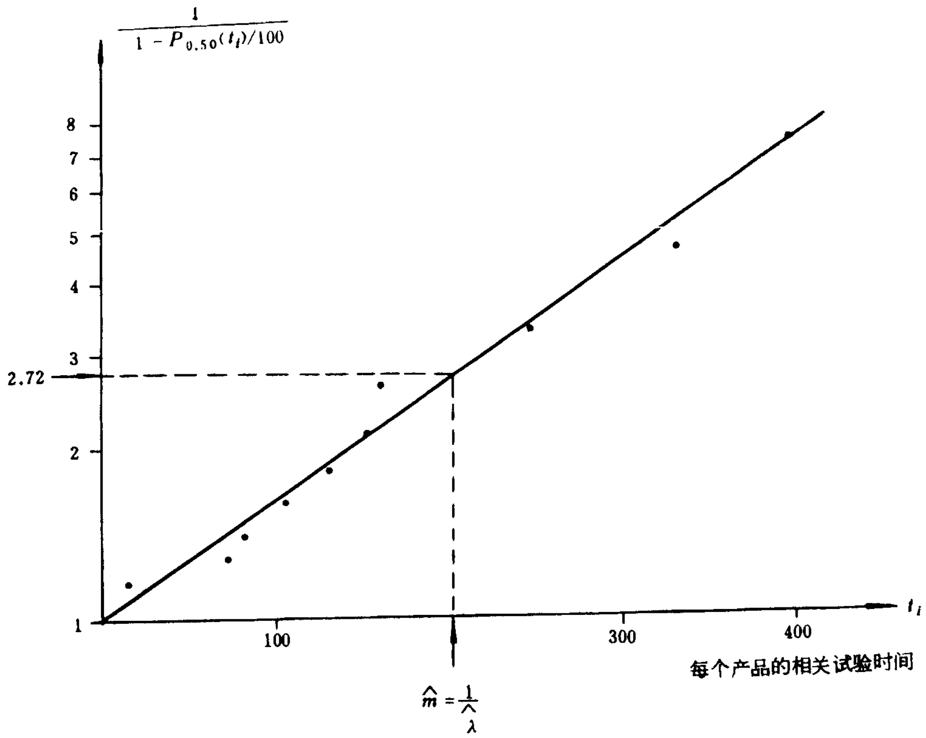


图 2 使用单边对数纸估计 λ 和 m

6.2　置信区间

置信水平为90%的成功率R的置信区间是根据二项分布得到的，表示如下（F分布表见表2和表3）。

单边置信区间下限：

$$R > \frac{n-r}{n-r+(r+1)F_{0.90}(v_1, v_2)}$$

式中：$v_1=2(r+1)$和$v_2=2(n-r)$。

双边置信区间：

$$\frac{n-r}{n-r+(r+1)F_{0.95}(v_1, v_2)} < R < \frac{(n-r+1)F_{0.95}(v_1, v_2)}{r+(n-r+1)F_{0.95}(v_1, v_2)}$$

式中：对于下限，$v_1=2(r+1)$，$v_2=2(n-r)$

对于上限，$v_1=2(n-r+1)$，$v_2=2r$。

6.3　诺模图

用诺模图来确定成功率的单边和双边置信区间时，可参见图3和图4，诺模图是根据受试产品数或试验次数n和观测到的失效总数r建立起来的。

过诺模图横轴上的$\frac{r}{n}$点作垂线与标有失效数r的曲线相交，然后由此交点引水平线与纵轴相交，便可读出失效率Q的置信限。成功率的置信限可由$R=1-Q$得到。

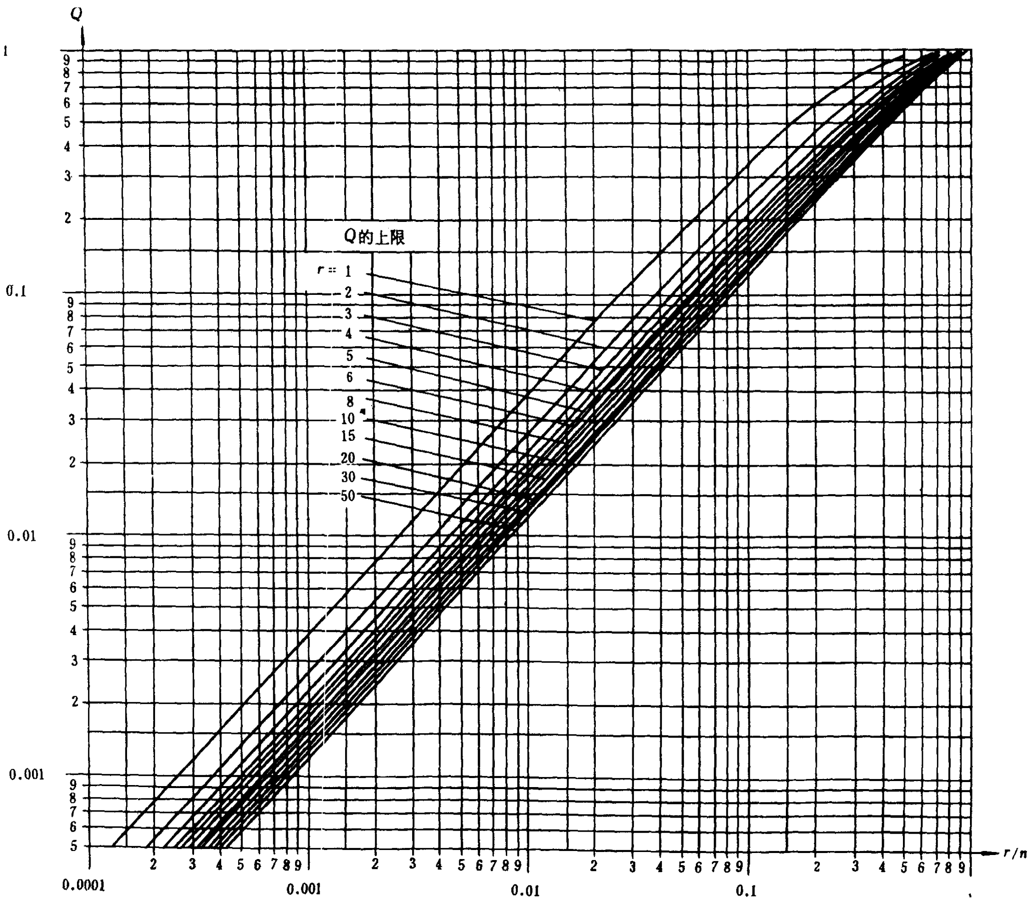


图 3 诺模图

〔由 Q 的上限确定成功率 R（$=1-Q$）的 90%置信下限〕

r=失效数；n=受试样品数或试验次数；r/n=失效率；Q=失效率的置信限

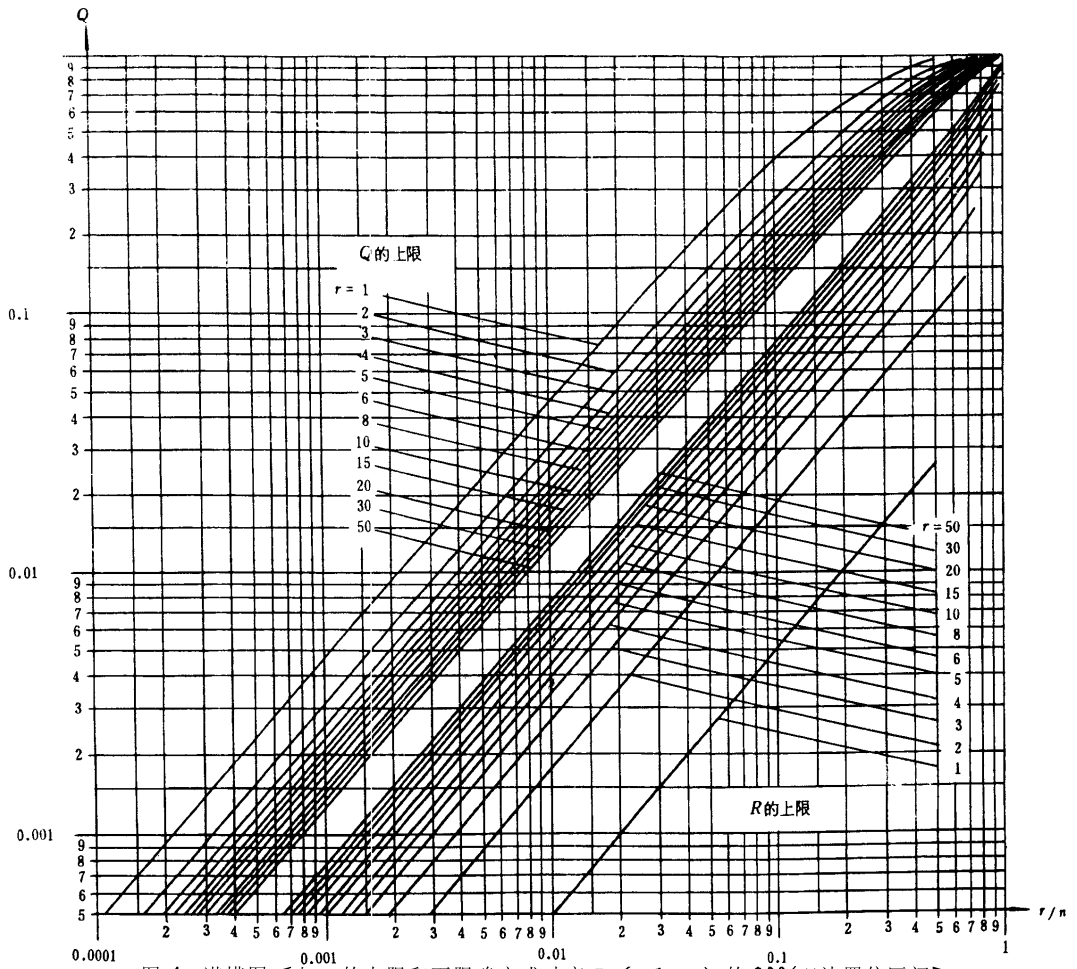


图 4 诺模图〔由 Q 的上限和下限确定成功率 R（$=1-Q$）的 90% 双边置信区间〕

r=失效数；n=受试样品数或试验次数；r/n=失效率；Q=失效率的置信限

7 数值表

本章给出标准中用的 x^2 分布表、F 分布表、中位秩分布表和置信限系数表。

表 1 x^2 分布分位数表

自 由 度 v	$x^2_{0.05}(v)$	$x^2_{0.90}(v)$	$x^2_{0.95}(v)$
2	.103	4.605	5.991
4	.711	7.779	9.488
6	1.635	10.65	12.59
8	2.733	13.36	15.51
10	3.94	15.98	18.31
12	5.226	18.55	21.03
14	6.571	21.06	23.69
16	7.962	23.54	26.3
18	9.39	25.99	28.87
20	10.85	28.41	31.41
22	12.34	30.81	33.92
24	13.85	33.2	36.42
26	15.38	35.56	38.89
28	16.92	37.92	41.34
30	18.49	40.26	43.77
32	20.09	42.57	46.17
34	21.7	44.8	48.57
36	23.3	47.19	50.96
38	24.91	49.5	53.36
40	26.51	51.81	55.76
42	28.16	54.08	58.11
50	34.76	63.17	67.51
52	36.45	65.42	69.82
60	43.19	74.4	79.08
62	44.9	76.63	81.37
70	51.74	85.53	90.53
72	53.47	87.74	92.8
80	60.39	96.58	101.88
82	62.14	98.78	104.13
90	69.13	107.57	113.15
92	70.89	109.76	115.39
100	77.93	118.5	124.34
102	79.74	120.65	126.53
110	86.96	129.25	135.3
112	88.77	131.4	137.5
120	96	140	146.27
122	97.81	142.15	148.46
200	168.28	226.02	233.99
*z=	+1.64	+1.28	+1.64

* 对较高的自由度使用下面的公式：

$$x^2_p(v)=(z+\sqrt{2v-1})^2/2$$

这里 z 是标准正态分布的分位点。

表 2　0.90 分位数的 F 分布表

v_1 \ v_2	2	4	6	8	10	20	30	40	60	120	∞
2	9.00	9.24	9.33	9.37	9.39	9.44	9.46	9.47	9.47	9.48	9.49
4	4.32	4.11	4.01	3.95	3.92	3.84	3.82	3.80	3.79	3.78	3.76
6	3.46	3.18	3.05	2.98	2.94	2.84	2.80	2.78	2.76	2.74	2.72
8	3.11	2.81	2.67	2.59	2.54	2.42	2.88	2.36	2.34	2.32	2.29
10	2.92	2.61	2.46	2.38	2.32	2.20	2.16	2.13	2.11	2.08	2.06
12	2.81	2.48	2.33	2.24	2.19	2.06	2.01	1.99	1.96	1.93	1.90
14	2.73	2.39	2.24	2.15	2.10	1.96	1.91	1.89	1.86	1.83	1.80
16	2.67	2.33	2.18	2.09	2.03	1.89	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72
18	2.62	2.29	2.13	2.04	1.98	1.84	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66
20	2.59	2.25	2.09	2.00	1.94	1.79	1.74	1.71	1.68	1.64	1.61
30	2.49	2.14	1.98	1.88	1.82	1.67	1.61	1.57	1.54	1.50	1.46
40	2.44	2.09	1.93	1.83	1.76	1.61	1.54	1.51	1.47	1.42	1.38
60	2.39	2.04	1.87	1.77	1.71	1.54	1.48	1.44	1.40	1.35	1.29
120	2.35	1.99	1.82	1.72	1.65	1.48	1.41	1.37	1.33	1.26	1.19
∞	2.30	1.94	1.77	1.67	1.60	1.42	1.34	1.30	1.24	1.17	1.00

注：v_1 为分子自由度，v_2 为分母自由度。

表 3　0.95 分位数的 F 分布表

v_1 \ v_2	2	4	6	8	10	20	30	40	60	120	∞
2	19.00	19.20	19.30	19.40	19.40	19.40	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50
4	6.94	6.39	6.16	6.04	5.96	5.80	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
6	5.14	4.53	4.28	4.15	4.06	3.87	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
8	4.46	3.84	3.58	3.44	3.35	3.15	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
10	4.10	3.48	3.22	3.07	2.98	2.77	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
12	3.89	3.26	3.00	2.85	2.75	2.54	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
14	3.74	3.11	2.85	2.70	2.60	2.39	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
16	3.63	3.01	2.74	2.59	2.49	2.28	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
18	3.55	2.03	2.66	2.51	2.41	2.19	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
20	3.49	2.87	2.60	2.45	2.35	2.12	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
30	3.32	2.69	2.42	2.27	2.16	1.93	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	3.23	2.61	2.34	2.18	2.08	1.84	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	3.15	2.53	2.25	2.10	1.99	1.75	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.07	2.45	2.18	2.02	1.91	1.66	1.55	1.49	1.32	1.26	1.19
∞	3.00	2.37	2.10	1.94	1.83	1.57	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

注：v_1 为分子自由度。v_2 为分母自由度，对线性内插的中间值 v 是足够精确的。

表 4　中位秩表　P_{50}%

样本容量(n)

序号(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	50.0	29.2	20.6	15.9	12.9	10.9	9.4	8.3	7.4	6.6	6.1	5.6	5.1	4.8	4.5	4.2	3.9	3.7	3.5	3.4
2		70.7	50.0	38.5	31.3	26.4	22.8	20.1	17.9	16.2	14.7	13.5	12.5	11.7	10.9	10.2	9.6	9.1	8.6	8.2
3			79.3	61.4	50.0	42.1	36.4	32.0	28.6	25.8	23.5	21.6	20.0	18.6	17.4	16.3	15.4	14.5	13.8	13.1
4				84.0	68.6	57.8	50.0	44.0	39.3	35.5	32.3	29.7	27.5	25.6	23.9	22.4	21.1	20.0	18.9	18.0
5					87.0	73.5	63.5	55.9	50.0	45.1	41.1	37.8	35.0	32.5	30.4	28.5	26.9	25.4	24.1	22.9
6						89.0	77.1	67.9	60.6	54.8	50.0	45.9	42.5	39.5	36.9	34.7	32.7	30.9	29.3	27.8
7							90.5	79.8	71.3	64.4	58.8	54.0	50.0	46.5	43.4	40.8	38.4	36.3	34.4	32.7
8								91.7	82.0	74.1	67.6	62.1	57.4	53.4	50.0	46.9	44.2	41.8	39.6	37.7
9									92.5	83.7	76.4	70.2	64.9	60.4	56.5	53.0	50.0	47.2	44.8	42.6
10										93.3	85.2	78.3	72.4	67.4	63.0	59.1	55.7	52.7	50.0	47.5
11											93.8	86.4	79.9	74.3	69.5	65.2	61.5	58.1	55.1	52.4
12												94.3	87.4	81.3	76.0	71.4	67.2	63.6	60.3	57.3
13													94.8	88.2	82.5	77.5	73.0	69.0	65.5	62.2
14														95.1	89.0	83.6	78.8	74.5	70.6	67.2
15															95.4	89.7	84.5	79.9	75.8	72.1
16																95.7	90.3	85.4	81.0	77.0
17																	96.0	90.8	86.1	81.9
18																		96.2	91.3	86.8
19																			96.4	91.7
20																				96.5

对 $n>20$ 的情况可用公式 $P_{50}=100\left(\frac{1-0.3}{n+0.4}\right)$

表 5　置信限系数表

A　平均寿命的系数表

r	双边 90%上限 M(5 %)	单边下限 M(90%)	双边 90%下限 M(95%)
1	19.417	.257	.21
2	5.625	.375	.317
3	3.669	.449	.386
4	2.927	.5	.436
5	2.538	.539	.475
6	2.296	.569	.506
7	2.13	.594	.532
8	2.009	.615	.554
9	1.916	.633	.573
10	1.843	.649	.589
11	1.782	.662	.604
12	1.732	.674	.617
13	1.69	.685	.628
14	1.654	.695	.639
15	1.622	.704	.649
16	1.592	.713	.658
17	1.566	.72	.667
18	1.545	.727	.674
19	1.525	.733	.681
20	1.508	.739	.688
25	1.438	.764	.716
30	1.389	.782	.737
35	1.352	.797	.754
40	1.324	.809	.768
45	1.301	.819	.779
50	1.283	.828	.79
55	1.264	.837	.8
60	1.249	.844	.808

表 6　置信限系数表

B　失效率的系数表

r	双边 90%下限 M(5 %)	单边上限 M(90%)	双边 90%上限 M(95%)
1	.051	3.889	4.743
2	.177	2.662	3.147
3	.272	2.226	2.584
4	.341	1.997	2.288
5	.394	1.854	2.103
6	.435	1.755	1.974
7	.469	1.681	1.878
8	.497	1.624	1.804
9	.521	1.578	1.745
10	.542	1.54	1.695

续表 6

r	双边 90%下限 M(5 %)	单边上限 M(90%)	双边 90%上限 M(95%)
11	.56	1.509	1.655
12	.577	1.481	1.62
13	.591	1.458	1.59
14	.604	1.437	1.563
15	.616	1.419	1.538
16	.627	1.402	1.517
17	.638	1.387	1.498
18	.647	1.375	1.482
19	.655	1.363	1.467
20	.662	1.351	1.452
25	.695	1.308	1.396
30	.719	1.277	1.356
35	.739	1.253	1.325
40	.754	1.234	1.301
45	.768	1.219	1.282
50	.779	1.206	1.265
55	.79	1.194	1.25
60	.8	1.184	1.237

附 录 A
确定累积相关试验时间
（参考件）

当能测得每个受试样品的相关试验时间时，发生第 k 个失效的累积相关试验时间 T_k 为：

$$T_k=\sum_{m=1}^{n}t_{k,m}$$

式中： n——受试产品总数；

$t_{k,m}$——在受试产品总数中，序号为 m 的产品直到第 k 个失效发生时的相关试验时间。

在定时试验中，累积相关试验时间 T^* 为：

$$T^*=\sum_{m=1}^{n}t_m^*$$

式中：t_m^*——序号为 m 的受试产品直到规定时间的试验时间。

如果相关试验时间用其他方法记录，在第 k 次失效时，累积相关试验时间 T_k 用下列叠加公式。这里包含直到有 k—1 次失效时的累积相关试验时间和在 k—1 次失效到 k 次失效时间区间内经过的相关试验时间。

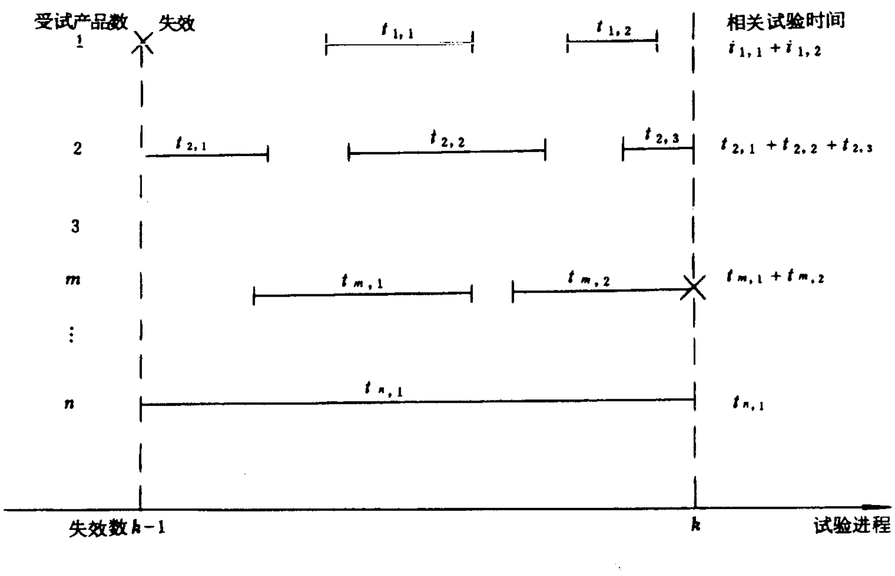
$$T_k=T_{k-1}+\sum_{m=1}^{n}\sum_j t_{m,j}$$

式中： n——受试产品总数；

$t_{m,j}$——受试产品总数中，在 $k-1$ 个失效后，序号为 m 的受试产品的第 j 个周期的相关试验时间。

由失效 $k-1$ 次和其他任何技术或管理原因引起中断，中断次数为 j，每次中断可以从一个产品变化到另一个产品。

下图说明周期数与相关试验时间的关系



定时试验的累积相关试验时间 T^* 为：

$$T^*=T_r+\sum_{m=1}^{n}\sum_j t_{m,j}$$

式中：T_r——截止试验以前，直到最后一个失效的累积相关试验时间；

$t_{m,j}$——所有试验样品中发生最后一个失效以后，第 m 个产品的第 j 个相关试验周期。

上述公式也适用于不可修复的产品，对不可修复产品而言只是每个受试产品发生第一次失效以后的相关试验时间不存在。

附加说明：

本标准由中华人民共和国电子工业部提出。

本标准由电子工业部标准化研究所负责起草。