第十章 系统（复杂产品）的可靠性评估

内容提要

§10-1 系统可靠性综合的金字塔模型

一、系统可靠性综合的金字塔模型示意图

二、金字塔系统可靠性综合评估方法

三、金字塔系统可靠性综合评估中 应注意的问题

§10-2 系统可靠性的经典置信限

一、经典精确置信限

二、经典近似置信限 ——

- 1.MML法
- 2.CMSR法
- 3.指数寿命型

§10-3 系统可靠性评估的一般步骤

习题十 答 案

因为一个产品往往可看成一个单元也可看成一个系统，从这个角度看，可以用单元产品可靠性评估的方法去评估系统的可靠性。但在实际上，要用一定数量的子样去进行试验。

因此对于一些大型系统来说是行不通的。

如我国发射的运行火箭，按抽样理论子样数选十几台并不大，但是我国一共才发射了多少台。

所以根本不能按单元产品可靠性评估的方法来进行评估系统。

工程技术人员还应了解不同于单元产品可靠性评估的系统可靠性评估的方法。

系统的可靠性评估方法是一个比较复杂的问题，同时也是在世界各国研究得较晚、各学派争议甚多的问题。

本处我们仅简介一些比较统一的问题。

§10-1 系统可靠性综合的金字塔模型

我们知道，任何大的系统均是由若干个分系统组成的，而各分系统由很多单机和部件组成，各单机和部件由很多组合件组成，各组合件由很多材料和元器件组成的。

它们之间的关系可以建立一个**金字塔模型**。

一、系统可靠性综合的金字塔模型

任何系统均可建立下列金字塔模型示意图。

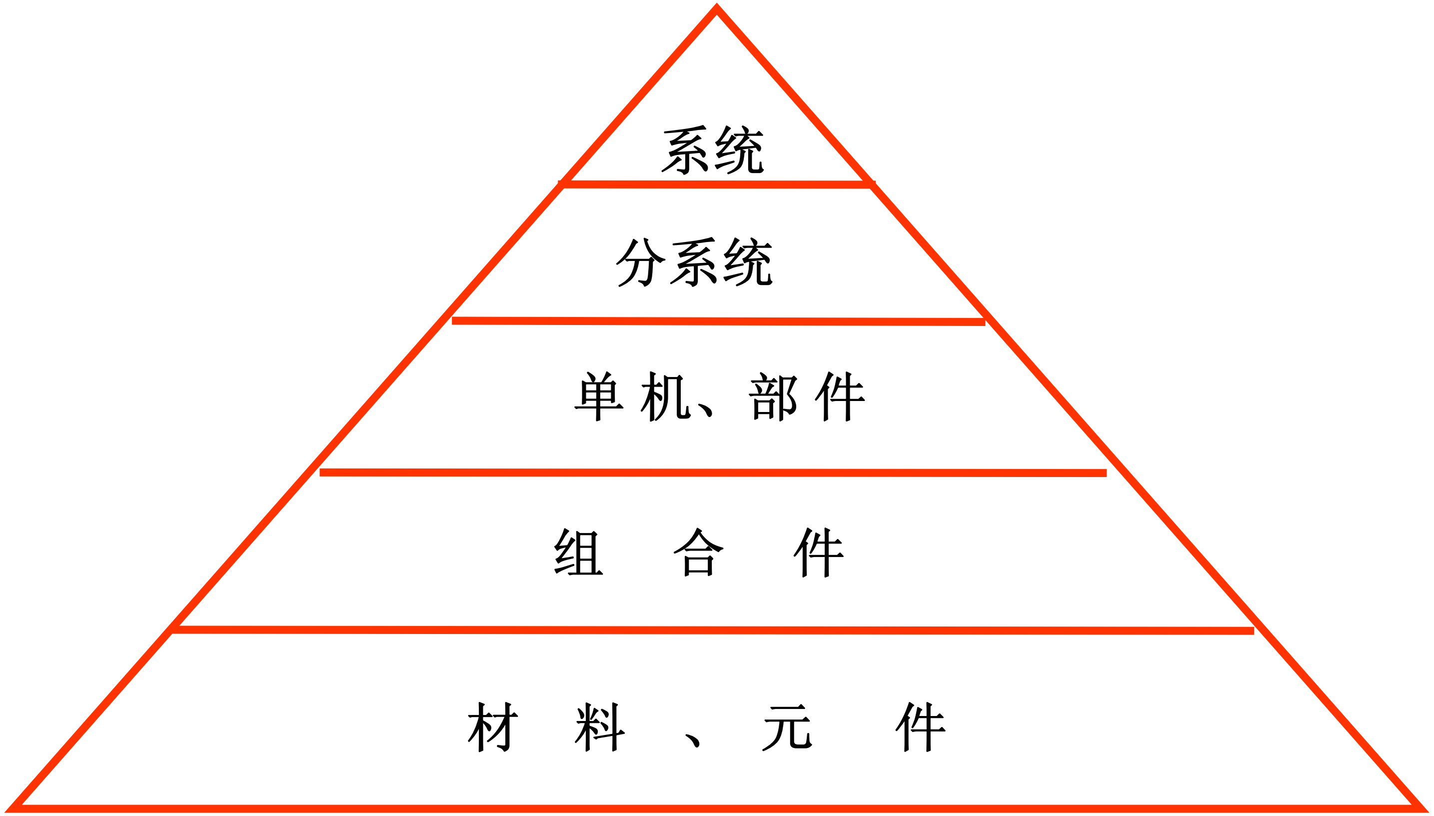

图10-1 系统可靠性综合的金字塔模型

对任何大系统的可靠性评估，都必须十分清楚它的构成，只有它的金字塔模型正确和完整，才可能对该系统的可靠性做出精确的评估。

二、金字塔系统可靠性综合评估方法

在实验室内进行系统各组成单元的模拟使用试验 → 然后进行系统的少量使用试验 → 综合两类试验数据，对系统的可靠性进行综合评定。

以上工作从金字塔的最下层，依次向上进行，逐步进行各层次的可靠性评估，直至系统。

这样就可能用极少数次的全系统的使用试验或不经过全系统试验而对大型复杂系统的可靠性做出评估。

三、金字塔系统可靠性综合评估中应注意的问题

(1) 要取得金字塔最底层的试验数据或结论信息，以能利用之逐级向上折合，求出全系统的可靠性；

(2) 逐层之间，不同单元组成系统的可靠性模型形式可以不同，它们可能为串联、并联、表决、贮备，一般网络等形式；

(3) 各单元的失效分布类型可以不同(见表10-1)。

表 10—1 单元失效分布类型

类型	试验结果或特征量分析	对可靠性规律的认识
成败型	二项分布	贝塔分布（评价密度函数）
寿命型	多为指数分布	对数伽玛分布（评价密度函数）
压力强度型或性能型	多为正态分布	可靠性的评价函数

在进行整个系统的可靠性评估时都应特别注意到以上三点。

§10-2 系统可靠性的经典置信限

在工程中常认为组成系统的任何一个单元失效都会引起系统失效，故认为系统的可靠性模型基本上是由各单元组成的**串联系统**。

此处只就成败型单元串联系统的可靠性经典置信限的确定来进行讨论。

一、经典精确置信限

系统的可靠性经典精确置信限方法，由于理论实施上尚存在一定困难和争议，至今还未达到工程上的应用。

在使用经典精确置信限时可以比较经典近似置信限方法哪个好哪个坏。因此工程技术人员对其理论应有一定的了解。

1. 公式的推导

设有m个成败型单元串联的系统，设对各单元作 n_i 次试验，成功 x_i 次。

根据第二章系统可靠性模型理论，若各个单元可靠性为R_i，则系统可靠性R为：

$$R=\prod_{i-1}^{m}R_i$$

该系统可靠性评估的关键是如何用各单元的试验数据（n_i，x_i，i=1,2,……m）来确定上式$\boldsymbol{R}$的置信下限$\boldsymbol{R_L}$。

设该系统可靠性的精确置信下限为$L_\gamma(X)$，各单元试验可能出现成功次数的组合事件为集合X（即试验向量），$X=\{x_1,x_2,...,x_m\}$，由各单元做 $\mathbf{n_i}$ 次试验，可能出次的成功次数有$\boldsymbol{n_i}$+1种（即0,1,2,……,n_i），所以系统可能出现的集合数$\boldsymbol{N}$（即最大排序号）为：

$$N=\prod_{i=1}^{m}(n_i+1) \qquad (10-4)$$

则知X集合应为$X_1, X_2, \ldots\ldots X_N$。

即 $X_j\,(j=1,2,\ldots,N)$

设系统可靠性的置信度为 γ 。

若欲求置信下限 $L_\gamma(X)$，集合X_j必须同时满足以下三个条件：

（1）精确性:

$$P_r\left\{R \geq L_\gamma(X)\right\} \geq \gamma \quad 0<R<1$$

(10-1)

（2）正则性:

$$L_{\gamma}(X_{j}) \le L_{\gamma}(X_{j+1}) \qquad (10\text{-}2)$$

（3）最优性:

$L_{\gamma}(X)$ 尽可能取大值

则最大置信下限集可由下式求出：

$$L_{\gamma}(X_{J}) = \inf\left\{R \,\middle|\, \sum_{k=j}^{N} B_{k} = 1-\gamma\right\} \qquad (10-5)$$

式中

$$B_k = \prod_{i=1}^{m} \begin{bmatrix} n_i \\ x_{i,k} \end{bmatrix} R_i^{x_{i,k}} (1 - R_i)^{n_i - x_{i,k}} \qquad (10-6)$$

$$X_j = \{x_{1j}, x_{2j} \ldots x_{mj}\}$$

以上式中：inf —— 下确界符号；

x_j——试验观测到的向量的对应集合；

$x_{i,k}$—— 第k个集合中第i个单元出现试验成功的次数。

2. 示例

例10-1 设有一个系统的可靠性模型由两个成败型单元串联而成，设对单元1试验10次成功9次，对单元2试验7次成功6次，见图10-2。

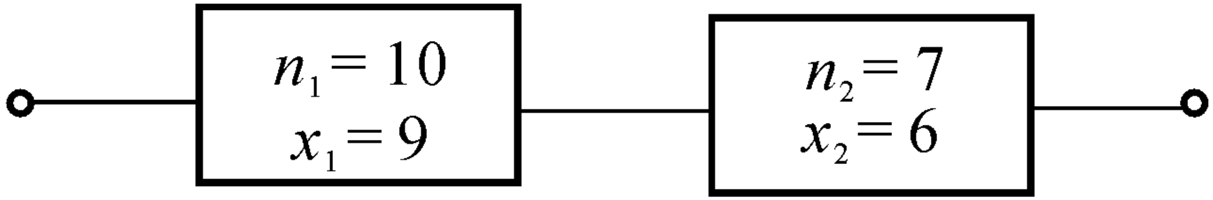

图10-2系统可靠性框图

设单元1一次试验成功的概率为 R_1，单元2一次试验成功的概率为R_2，系统可靠性置信度为 γ ,求 系统可靠性的精确置信下限。

解：(1) 求最大排序号N

由式(10-4)得：$N=\prod_{i=1}^{2}(n_i+1)=(10+1)(7+1)=88$

(2) 求观测试验向量 $X_j=(x_1,x_2)=(9,6)$

的排序号 j 。

由于成败型单元产品的 $\hat{R}_i=\dfrac{x_i}{n_i}$

串联系统可靠性： $\hat{R}=\hat{R}_1\hat{R}_2=\dfrac{x_2x_2}{n_1n_2}$

因为根据题意n_1,n_2为常数，据以 x_1x_2 与 R 成正比例，故按 x_1x_2 值大小排序：

$$X_{88}=\{10,7\},X_{87}=\{9,7\},X_{86}=\{10,6\},$$
$$X_{85}=\{8,7\},X_{84}=\{9,6\},X_{83}=\{10,5\},$$
$$X_{82}=\{7,7\},X_{81}=\{8,6\},X_{80}=\{9,5\},\ldots$$

可见观测向量 $X_{84}=\{9,6\},j=84$

(3) 求 B_k

因为已求出 $j = 84, N = 88$，即 $k = 84$，85，86，87，88

由式（10-6）得：

$$B_k=\prod_{i=1}^{2}\begin{bmatrix} n_i \\ x_{i,k} \end{bmatrix} R_i^{x_{i,k}}\left(1-R_I\right)^{n_i-x_{i,k}}$$

$$B_k = \prod_{i=1}^{2} \begin{bmatrix} n_i \\ x_{i,k} \end{bmatrix} R_i^{x_{i,k}} \left(1 - R_I\right)^{n_i - x_{i,k}}$$

$$B_{84} = \begin{bmatrix} n_1 \\ x_{1,84} \end{bmatrix} R_1^{x_{1,84}} (1 - R_1)^{n_1 - x_{1,84}} \times$$

$$\begin{bmatrix} n_2 \\ x_{2,84} \end{bmatrix} R_2^{x_{2,84}} (1 - R_2)^{n_2 - x_{2,84}}$$

$$= \begin{pmatrix} 10 \\ 9 \end{pmatrix} R_1^9 (1 - R_1) \begin{pmatrix} 7 \\ 6 \end{pmatrix} R_2^6 (1 - R_2)$$

以此类推可求出：

$$B_{85}=\binom{10}{8}R_1^8(1-R_1)^2\binom{7}{7}R_2^7(1-R_2)^{7-7}$$

$$=\binom{10}{8}R_1^8(1-R_1)^2R_2^7$$

$$B_{86}=R_1^{10}\binom{7}{6}R_2^6(1-R_2)$$

$$B_{87}=\binom{10}{9}R_1^9(1-R_1)R_2^7$$

$$B_{88}=R_1^{10}R_2^7$$

（4）求最大置信下限

由式（10-5）有：

$$L_\gamma(X_{84}) = \inf\left\{R \left| \sum_{K=84}^{88} B_k = 1-\gamma \right.\right\}$$

将 B_{84}，B_{85}，B_{86}，B_{87}，B_{88}， γ，R_1，R_2分别代入，求出$L_\gamma(X_{84})$为系统可靠性的精确置信下限。

从上面叙述不难看出，尽管以上公式很严谨科学，但实际上应用却十分困难，最大的困难主要有两个：

一、是试验向量的排序，

二。是方程（10-5）的求解。

尤其是对于3个或3个以上单元的串联系统计算起来更困难。实际上工程上常用的是经典近似置信限方法。

二、经典近似置信限

在系统可靠性的经典近似置信限方法中，在工程中常使用**极大似然估计法（MLE），修正极大似然法（MML），序压缩方法（SR），修正极大似然和序压缩相结合方法（CMSR）**等。

MLE仅在大子样试验及失效分布是无界对称正态分布的情况下才有较好的精度，因此工程不常用之。

MML计算方法简单准确，是工程中最常用的方法。但它不能进行单元无失败情况（$X_i=n_i$）的系统的可靠性评估。在串联系统中无失败单元时采用SR法和CMSR法，

CMSR法是MML法和SR法结合的产物，它不但具有MML计算准确的优点，又一定程度地避免了SR过多丢失信息的缺点，因此是工程上估计无失败单元系统可靠性的**常用方法**。

此处我们仅介绍**MML法和CMSR法**。

1. MML法（修正极大似然法）

设系统中串联的m个均为成败型单元。根据数学推导（略），系统的等效试验次数$\hat{n}$，等效成功次数$\hat{x}$和单元试验次数n_i，实测成功次数x_i的关系式如下：

$$\hat{n} = \frac{\prod_{i-1}^{m} \frac{n_i}{x_i} - 1}{\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{x_i} - \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{n_i}} \qquad (10-7)$$

$$\hat{x} = \hat{n} \prod_{i=1}^{m} \frac{x_i}{n_i} \qquad (10-8)$$

计算出 $\hat{n}$，$\hat{x}$ 后

求出 $$\hat{F} = \hat{n} - \hat{x} \qquad (10\text{-}9)$$

再根据已知的置信度 γ 和 $\hat{n}$，$\hat{F}$，

查附表2得系统可靠性的经典

似近置信下限 R_L。

2. 修正极大似然和序贯压缩结合法(CMSR)

设系统中串联m个成败型单元，其中有试验无失败单元。**CMSR法的基本步骤如下：**

(1) 将m个单元的试验信息按n_i(i=1,2,…, m)的数值从大到小排序。

(2) 舍去中间无失败单元（试验次数非最小的无失败单元）→ 选出试验次数最小的无失败单元，设为（n_l, x_l）→再选出试验次数大于n_l的最小有失败单元，设为（n_i, x_i）。

按以下各式进行压缩综合：

∵（100,100）比（50,50）可靠，所以去除单元只能去除前者，而不能去除后者。

当 $x_i > n_l$ 时

$$\left.\begin{aligned}(n_i, x_i) &\to (n_i\frac{n_l}{x_i}, n_l)\\ (n_l, x_l) &\to (n_l, x_l)\end{aligned}\right\} \to (n_i\frac{n_l}{x_i}, x_l)$$

即 $$(n_i, x_i), (n_l, x_l) \to (n_i\frac{n_l}{x_i}, x_l) \qquad (10\text{-}10)$$

当 $x_i = n_l$ 时，同理可推得

$$(n_i, x_i), (n_l, x_l) \to (n_i, x_l) \qquad (10\text{-}11)$$

当 $x_i < n_l$ 时，同理推得

$$\frac{x_i}{n_l}<1\left\{\begin{array}{l}(n_i,x_i)\rightarrow(n_i,x_i)\\ \\ (n_l,x_l)\rightarrow(x_i,\dfrac{x_i}{n_l}x_l)\end{array}\right\}\rightarrow(n_i,x_l\frac{x_i}{n_l})$$

即 $$（n_i,x_i),(n_l,x_l)\rightarrow(n_i,x_l\frac{x_i}{n_l}) \qquad (10\text{-}12)$$

为清楚起见，下举例说明以上步骤：

例10-2由4个单元组成的串联系统，其试验数据：

(n_i, x_i)分别为（30,30），（60,59），（45,45）和(50,49）。

请对试验数据进行压缩,使系统不含无失败单元。

解： ① 对4个组成单元进行排序

按n_i从大到小排序为：$(n_1, x_1) = (60,59)$,

$(n_2, x_2) = (50,49)$, $(n_3, x_3) = (45,45)$,

$(n_4, x_4) = (30,30)$。

② 确定 n_l, x_l； n_i, x_i

舍去中间无失败单元（试验次数非最小的无失败单元）（45, 45）。

试验次数最小的无失败单元为：

（n_l, x_l）=(30, 30)

次小的有失败单元：（n_i, x_i）=(50, 49)

可确定：

$$n_l = 30, x_l = 30,\ n_i = 50, x_i = 49。$$

③ 对（n_l, x_l）和（n_i, x_i）进行压缩

∵ $x_i > n_l$，由式(10-10)得

$$(n_i, x_i), (n_l, x_l) \rightarrow (n_2, x_2), (n_4, x_4) \rightarrow$$

$$(n_2 \frac{n_4}{x_2}, x_4) = (50\frac{30}{49}, 30) = 30.6, 30$$

④ 结论

压缩后系统由2个单元组成：

$$(n_1, x_1) = (60,59), (n_{2,4}, x_{2,4}) = (30.6,30)$$

(3)对压缩结果(与原系统等效，都有失败单元)应用MML方法，由式(10-7)~(10-9)算出：

$$\hat{n}, \hat{x}, \hat{F}$$

(4)根据 计算出的 $\hat{n}, \hat{x}, \hat{F}$ 和规定的置信度

γ 查附表2得R_L。

例10-3串联成败系统可靠性试验数据如图10-3所示。若置信度 $\gamma = 0.9$, 求R_L。

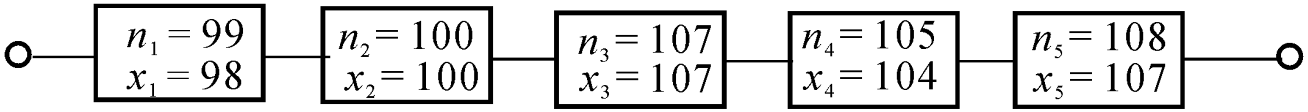

图10-3

解：由图10-3可见系统中有不失败单元：(100,100),(107,107),所以不能用MML法,而**用CMSR法。**

(1) 按 ***n_i***大→小排序：(108,107)，(107,107)，(105,104)， (100,100), (98,98) 。

(2)去掉中间的无失效败单元(107,107)。

选出次数最小无失效败单元(100,100)和次小有失效败单元(105,104)进行压缩。

$\because x_i > n_l$ 即 $104 > 100$，由式（10－10）得

$$(105,104),(100,100) \rightarrow (105\frac{100}{104},100) = (100.96,100)$$

故图10-3等效系统如图10-4、

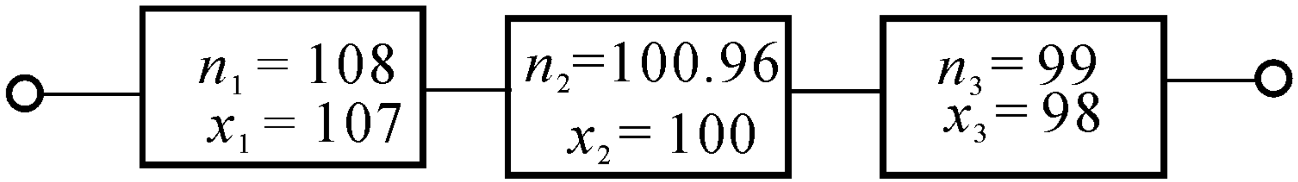

图10-4

(3) 求系统的 $\hat{n}, \hat{x}$和$\hat{F}$

图10-4中各单元均有失败试验,所以应用MML法。

由式(10-7)~式(10-9)得

$$\hat{n} = \frac{\prod_{i=1}^{3} \frac{n_i}{x_i} - 1}{\sum_{i=1}^{3} \frac{1}{x_i} - \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{n_i}}$$

$$= \frac{\frac{108}{107} \times \frac{100.96}{100} \times \frac{99}{98} - 1}{\frac{1}{107} + \frac{1}{100} + \frac{1}{98} - \frac{1}{108} - \frac{1}{100.96} - \frac{1}{99}} = 103.4$$

$$\hat{x} = \hat{n}\prod_{i=1}^{3}\frac{x_i}{n_i}$$

$$= 103.4 \times \frac{107}{108} \times \frac{100}{100.96} \times \frac{98}{99} = 100.4$$

$$\hat{F} = \hat{n} - \hat{x} = 103.4 - 100.4 = 3$$

(4) 求 R_L

由 $\gamma = 0.9$ 查附表2得R_L

$n = 103, F = 3$时， $R_L = 0.9363$

$n = 104, F = 3$时， $R_L = 0.9369$

当$n = 103.4, F = 3$时,用插值求得

$$R_L = 0.9363 + (0.9369 - 0.9363) \times 0.4 = 0.9365$$

$$R_L = 0.9365$$

3. 指数寿命型串联系统的可靠性经典近似置信限估计方法

指数寿命型单元产品在工程中应用很广泛。这里学习由它们组成**串联系统的可靠性评估方法**。

主导思想：

先将指数寿命型单元→成败型单元→使用前面介绍的MML法和CMSR法对转换后的等效系统进行可靠性评估。

现在介绍**指数寿命型单元等效转换成成败型单元的方法**。

根据前面所讲的内容，可对指数型单元的可靠性作如下估计：

$$\hat{R} = e^{-Z/\eta} \tag{1}$$

$$\hat{\sigma}_{\hat{R}}^2 = \hat{R}^2 \cdot Z/\eta^2 = e^{-2Z/\eta} \cdot Z/\eta^2 \tag{2}$$

式中：η——单元试验得到的平均寿命点估计值（见前面所讲指数寿命型单元可靠性评估章节中的 θ ）。

Z——与试验得到的失效数r有关的量，其关系如下：

$$Z = \begin{cases} r: & \text{对于定数截尾寿命试验} \\ r+1: & \text{对于其他形式寿命试验} \end{cases}$$

对于成败型单元的可靠性可作如下估计：

$$\hat{R} = \hat{x} / \hat{n} \qquad (3)$$

$$\hat{\sigma}_{\hat{R}}^2 = \left[\hat{R}(1-\hat{R})\right] / \hat{n} \qquad (4)$$

式中各符号解释同前。

两单元等效即其$\hat{R}$和 $\hat{\sigma}_{\hat{R}}^2$ 均应相等。

将式（4）整理后把式（1）、式（2）分别代入得：

$$\hat{n} = \left[\hat{R}(1-\hat{R})\right] / \hat{\sigma}_{\hat{R}}^2$$

$$= \left[e^{-Z/\eta}(1-e^{-Z/\eta})\right] / (e^{-\frac{2Z}{\eta}} \times Z / \eta^2)$$

整 理 得：

$$\hat{n} = \frac{(1-e^{-\frac{Z_i}{\eta_i}})\eta_i^2}{e^{-\frac{Z_i}{\eta_I}} \times Z_i} \qquad (10\text{-}13)$$

将式（3）整理后把式（1），式（10-13）分别代入得：

$$\hat{x} = \hat{R}\hat{n} = e^{-Z/\eta} \frac{(1-e^{-Z/\eta})\eta^2}{e^{-Z/\eta} \times Z}$$

即

$$\hat{x}_i = \frac{(1-e^{-\frac{Z_i}{\eta_i}})\eta_i^2}{Z_i} \qquad (10\text{-}14)$$

例10-4，串联系统各单元成败型及指数寿命型可靠性试验数据如图10—5，试求系统可靠性置信下限，设置信度 $\gamma = 0.8$ 。

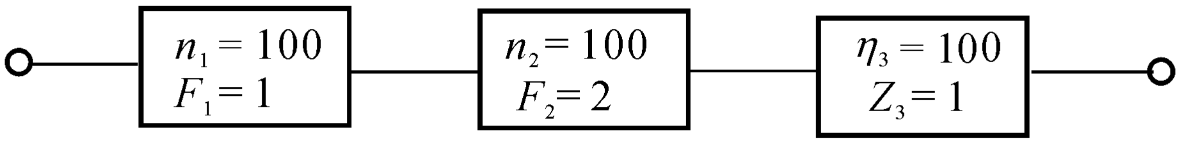

图10-5串联系统可靠性图

解：

(1) 将指数寿命型的第3单元等效转化成成败型单元。由式（10-13）得：

$$\hat{n}_3 = \frac{(1-e^{-Z_3/\eta_3})\eta_3^2}{e^{-Z_3/\eta_3} \times Z_3}$$

$$= \frac{(1-e^{-1/100})\times 100^2}{e^{-1/100} \times 1} = 100.5$$

由式（11-14）得：

$$\hat{x}_3 = \frac{(1-e^{-Z_3/\eta_3})\eta_3^2}{Z_3}$$

$$= \frac{(1-e^{-1/100})\times 100^2}{1} = 99.5$$

故图10-5的等效系统见图10-6。

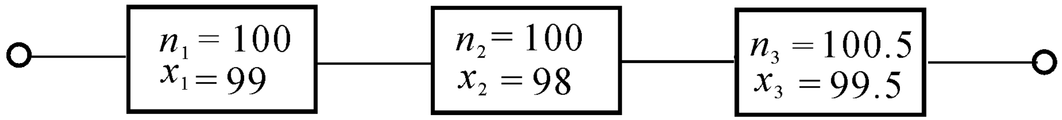

图10-6等效系统可靠性图

(2) 求系统的 $\hat{n}$、$\hat{x}$和 $\hat{F}$

因为图10-6的成败型串联系统，没有不失败单元，所以选用MML法。

由式（11-7），（11-8）和（11-9）得

$$\hat{n} = \frac{\prod_{i=1}^{m} \frac{n_i}{x_i} - 1}{\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{x_i} - \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{n_i}} = \frac{\prod_{i=1}^{3} \frac{n_i}{x_i} - 1}{\sum_{i=1}^{3} \frac{1}{x_i} - \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{n_i}}$$

$$= \frac{\frac{100}{99} \times \frac{100}{98} \times \frac{100.5}{99.5} - 1}{\frac{1}{99} + \frac{1}{98} + \frac{1}{99.5} - \frac{1}{100} - \frac{1}{100} - \frac{1}{100.5}} = 101.4$$

$$\hat{x} = \hat{n} \prod_{i=1}^{3} \frac{x_i}{n_i}$$

$$= 101.4 \times \frac{99}{100} \times \frac{98}{100} \times \frac{99.5}{100.5} = 97.4$$

$$\hat{F} = \hat{n} - \hat{x} = 101.4 - 97.4 = 4$$

(3) 求系统的R_L

根据：

$\gamma = 0.8,\ \hat{n} = 101.4,\ \hat{F} = 4$ 查附表2得R_L：

$$\hat{n} = 101,\ \hat{F} = 4,\ R_L = 0.9344$$

$$\hat{n} = 102,\ \hat{F} = 4,\ R_L = 0.9350$$

当$n = 101.4,\ F = 4$时，用插值求得

$$R_L = 0.9344 + (0.9350 - 0.9344) \times 0.4 = 0.9346$$

$$\boxed{R_L = 0.9346}$$

§10-3 系统可靠性评估的一般步骤

对于复杂系统可靠性评估按图10-7所示流程进行。

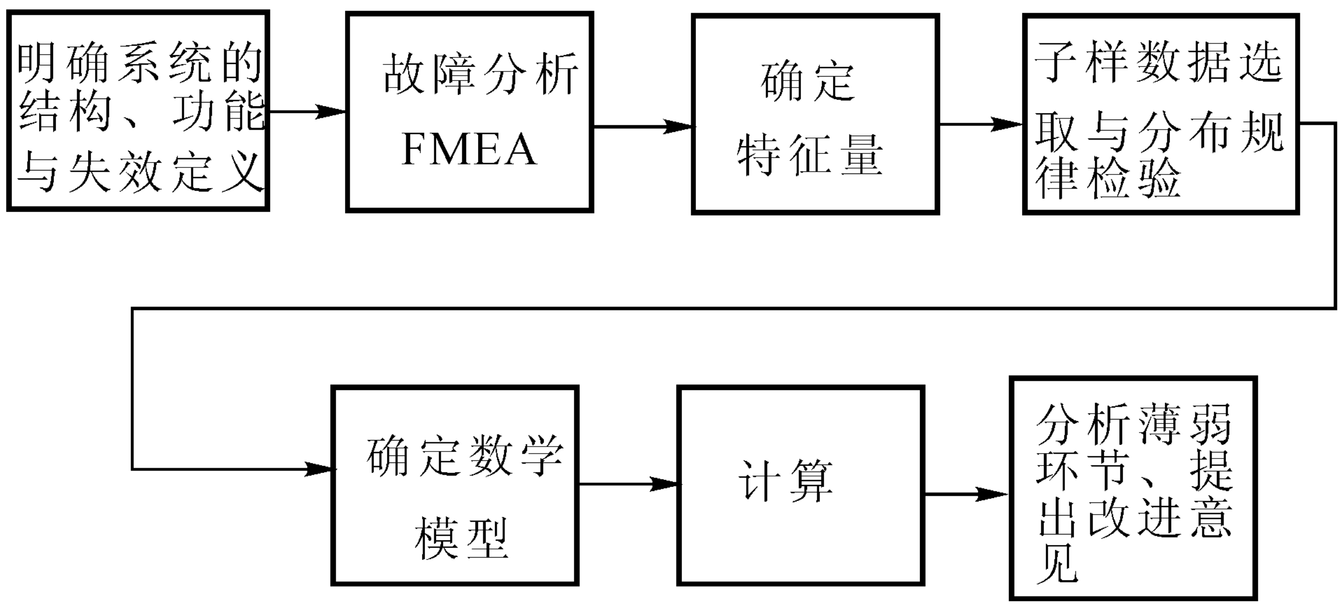

图10-7系统可靠性评定工作流程

可靠性评定是一种定量化的可靠性分析，它要在设计、试验、生产、贮存直到使用的各个阶段中进行。

1. 明确系统的结构、功能与失放效的定义
2. FMEA与特征量选取
3. 子样数据选取与分布规律检验
4. 确定数学模型
5. 分析薄弱环节，提出改进措施

习 题 十　答　案

1 .因为：$(n_1, x_1) = (80,78),\ (n_2, x_2) = (85,84)$

$(n_3, x_3) = (100,99),\ (n_4, x_4) = (90,89)$

(1) $\hat{n} = 87.6$

$\hat{x} = 82.6$

$\hat{F} = \hat{n} - \hat{x} = 5$

(2) $\hat{n} = 87 \quad \hat{F} = 5 \quad R_L = 0.9106$

$\hat{n} = 88 \quad \hat{F} = 5 \quad R_L = 0.9116$

(3) $\hat{n} = 85.4 \quad \hat{F} = 5$ 时 $R_L = 0.9112$

2. $(n_1, x_1) = (110,110),\ (n_2, x_2) = (100,99)$

$(n_3, x_3) = (95,93),\ (n_4, x_4) = (80,80)$

$(n_5, x_5) = (75,74),\ (n_6, x_6) = (120,119)$

(1) 按n_i从大到小排序 ：(120,119),

(110,110), (100,99), (95,93), (80,80),

(75,74),

(2) 去掉 (110,110) 。

(95,93), (80,80) → (81.72,80)

系统简化为：(120,119), (100,99),

(81.72,80), (75,74)。

(3) 求系统的 $\hat{n}$，$\hat{x}$ $\hat{F}$

$$\hat{n} = 88.8$$

$$\hat{x} = 84.2$$

$$\hat{F} = 4.6$$

(4) 查附表2 $(\gamma = 0.8)$

$$\hat{n} = 89, \hat{F} = 4, R_L = 0.9256$$

$$\hat{n} = 89, \hat{F} = 5, R_L = 0.9126$$

$$\hat{n} = 89, \hat{F} = 4.6\text{时}, R_L = 0.91780 \quad (1)$$

$$\hat{n} = 88, \hat{F} = 4, R_L = 0.9248$$

$$\hat{n} = 88, \hat{F} = 5, R_L = 0.9116$$

$$\hat{n} = 88, \hat{F} = 4.6\text{时}, R_L = 0.91688 \quad (2)$$

按式(1)、(2)结果插值得：

$$\hat{n} = 88.8 \qquad \hat{F} = 4.6 \quad \text{时}$$

$$R_L = 0.91688 + (0.91780 - 0.91688) \times 0.8 = 0.91762$$

中国可靠性网

http://www.kekaoxing.com

感谢 kingdodoo 分享