

可靠性工程教材之(五)

5



# 可靠性数据处理 与寿命评估

中国航空学会  
科普与教育工作委员会

可靠性工程教材之(五) 内容

# 可靠性数据处理与寿命评估

贺国芳

中国航空学会 科普与教育工作委员会

1984.8.

责任编辑：胡金城

技术校对：杨守纲

封面设计：陈肇和

可靠性工程教材之(五)

**可靠性数据处理与寿命评估**

(书号：105)

---

编辑：《航空兵器》编辑部

(址地：河南洛阳030信箱13分箱)

印刷：国营五三一印刷厂

(址地：河南济源)

---

**(内部交流)**

## 说 明

为了满足广大读者学习可靠性工程的需要，我们组织编写了这套可靠性工程教材，内容包括《可靠性的数学基础》、《系统可靠性分析与设计》、《系统可靠性数字仿真》、《失效模式影响及其后果分析》、《可靠性数据处理与寿命评估》、《环境工程概论》和《可靠性工程专题选编》等七册。

这套教材在编写过程中，力求作到内容由浅入深、讲述详细、文字通俗，并侧重于实际应用。书中安排有较多的实例和习题，还附有计算机程序、各种图表和有关标准。因此，这套教材可供开设可靠性工程有关课程使用，也可供从事可靠性工程的技术人员和大专院校师生参考，并适合于自学。

这套教材由北京航空学院第一研究所负责编写，并得到航空工业部三〇一研究所的帮助。在编辑出版过程中还得到航空工业部六一二研究所的大力支持和帮助，在此一并致谢。

**中国航空学会科普与教育工作委员会**

一九八四年四月

## 可靠性设计语言 第一章

建立以可靠性理论为基础的产品的寿命概念，并科学地评估产品的寿命和可靠性，这是当前工业产品可靠性工作面临的重要任务。本教材就是在这样的要求下编写的。它是航空工业部举办的“可靠性设计研究班”的系统教材之一。

本教材共分六章。第1章介绍产品可靠性数据的收集和整理，并给出了不规则截尾数据的可靠度函数或失效分布函数的计算方法；第2章叙述了常见的累积失效分布函数及其可靠性数量指标；第3章是总体分布类型的假设检验，并对不完全样本的分布检验作了介绍；第4章介绍分布参数的点估计，着重介绍了各种分布的图估法；第5章介绍分布参数的区间估计；第6章在前述各章的基础上，介绍了产品寿命指标的选取和寿命评估的程序和方法。各章均有计算实例并附有习题。附录中给出了数据处理中常用的计算表格。

限于水平及付印仓促，书中难免错误和不足，敬请各位读者批评指正。

本书由屠庆慈同志校阅，编写中得到杨为民、许海宝同志的热情帮助，在此一并致谢。

( 81 )	.....	.....	.....
( 82 )	.....	.....	.....
( 83 )	.....	.....	.....
( 84 )	.....	.....	.....
( 85 )	.....	.....	.....

# 目 录

<b>前 言</b>	.....	( 1 )
<b>第 1 章 可靠性数据的收集与整理</b>	.....	( 2 )
§ 1.1 数据收集的目的与途径	.....	( 2 )
§ 1.2 可靠性寿命试验	.....	( 4 )
§ 1.3 数据整理的直方图法和经验分布函数	.....	( 7 )
§ 1.3.1 直方图法	.....	( 7 )
§ 1.3.2 样本的经验分布函数	.....	( 12 )
§ 1.4 产品累积失效频率的计算	.....	( 13 )
§ 1.5 不规则截尾寿命试验可靠度函数的计算	.....	( 16 )
§ 1.5.1 用残存比率法计算产品的可靠度	.....	( 17 )
§ 1.5.2 用平均秩次法计算累积失效分布函数	.....	( 19 )
习题	.....	( 24 )
<b>第 2 章 常见的累积失效分布函数及其</b>	.....	.....
<b>可靠性数量指标</b>	.....	( 27 )
§ 2.1 正态分布	.....	( 28 )
§ 2.2 威布尔分布	.....	( 30 )
§ 2.3 对数正态分布	.....	( 35 )
§ 2.4 混合分布和合成分布	.....	( 37 )
§ 2.4.1 混合分布	.....	( 37 )
§ 2.4.2 合成分布	.....	( 39 )
习题	.....	( 41 )
<b>第 3 章 总体分布类型的假设检验</b>	.....	( 42 )
§ 3.1 皮尔逊 $\chi^2$ 检验	.....	( 43 )
§ 3.2 柯尔莫哥洛夫-斯米尔洛夫检验 (K-S 检验)	.....	( 45 )

§ 3.3 不完全样本的分布假设检验 .....	( 48 )
3.3.1 皮尔逊 $\chi^2$ 检验 .....	( 48 )
3.3.2 K-S检验 .....	( 49 )
§ 3.4 累积失效分布函数的偏度和峰度检验 .....	( 53 )
3.4.1 累积失效分布函数的偏度和峰度 .....	( 53 )
3.4.2 几种累积失效分布的偏度系数和峰度系数 .....	( 54 )
( 习题 .....	( 57 )
<b>第 4 章 分布参数的点估计</b> .....	<b>( 59 )</b>
§ 4.1 图估法 .....	( 59 )
4.1.1 单对数坐标纸 .....	( 59 )
4.1.2 正态概率纸 .....	( 60 )
4.1.3 对数正态概率纸 .....	( 65 )
4.1.4 威布尔概率纸 .....	( 69 )
4.1.5 混合威布尔分布的图估计 .....	( 86 )
4.1.6 合成威布尔分布的图估计 .....	( 93 )
§ 4.2 极大似然估计 .....	( 96 )
4.2.1 指数分布的平均寿命估计 .....	( 97 )
4.2.2 威布尔分布参数的点估计 .....	( 102 )
4.2.3 对数正态分布参数的点估计 .....	( 103 )
4.2.4 正态分布截尾试验参数的点估计 .....	( 106 )
§ 4.3 最小二乘法估计 .....	( 109 )
4.3.1 正态分布的参数估计 .....	( 111 )
4.3.2 对数正态分布的参数估计 .....	( 114 )
4.3.3 威布尔分布的参数估计 .....	( 116 )
§ 4.4 最优线性无偏估计与简单线性无偏估计 .....	( 118 )
4.4.1 参数估计量好坏的标准 .....	( 118 )
4.4.2 最优线性无偏估计(BLUE) .....	( 119 )
4.4.3 简单线性无偏估计(GLUE) .....	( 120 )
( 习题 .....	( 123 )

<b>第5章 分布参数的区间估计</b> .....	(127)
§5.1 指数分布参数的区间估计 .....	(127)
5.1.1 定数截尾寿命试验 .....	(127)
5.1.2 定时截尾寿命试验 .....	(131)
5.1.3 只统计失效数的试验 .....	(132)
5.1.4 单边区间估计 .....	(133)
§5.2 非参量法的可靠度区间估计 .....	(134)
5.2.1 用二项分布计算可靠度的置信限 .....	(134)
5.2.2 正态近似法 .....	(137)
5.2.3 不完全 $\beta$ 函数法 .....	(138)
5.2.4 F分布法 .....	(145)
习题 .....	(147)
<b>第6章 寿命评估</b> .....	(149)
§6.1 进行产品寿命评估前的准备 .....	(149)
6.1.1 对产品的要求 .....	(149)
6.1.2 对样本容量的要求 .....	(149)
6.1.3 选用那些指标进行寿命评估 .....	(150)
6.1.4 首翻期(首次翻修寿命)的确定 .....	(151)
§6.2 寿命评估的程序 .....	(153)
6.2.1 评估的程序框图 .....	(153)
6.2.2 计算实例 .....	(153)
习题 .....	(162)
<b>附录1 <math>D_n</math> 的极限分布表</b> .....	(164)
<b>附录2 检验的临界值(<math>D_{n,\alpha}</math>)表</b> .....	(165)
<b>附录3 定数截尾寿命试验临界值表 (<math>n=10</math>)</b> .....	(167)
<b>附录4 定时截尾寿命试验临界值表 (<math>n=20</math>)</b> .....	(168)
<b>附录5 截尾寿命试验中<math>D_{n,T}</math>的极限分布表</b> .....	(170)
<b>附录6 中位秩表</b> .....	(171)
<b>附录7 <math>F_n(t_i)</math>的5%和95%置信限表</b> .....	(172)



附录 8	$F_{\alpha}(t_i)$ 的 10% 和 90% 置信限表	(174)
附录 9	正态分布定数截尾中 W 值表	(176)
附录 10	泊松分布求解可靠度下限用表	(177)
参考文献		(178)

(181)	.....	1.1.1
(182)	.....	1.1.2
(183)	.....	1.1.3
(184)	.....	1.1.4
(185)	.....	1.1.5
(186)	.....	1.1.6
(187)	.....	1.1.7
(188)	.....	1.1.8
(189)	.....	1.1.9
(190)	.....	1.1.10
(191)	.....	1.1.11
(192)	.....	1.1.12
(193)	.....	1.1.13
(194)	.....	1.1.14
(195)	.....	1.1.15
(196)	.....	1.1.16
(197)	.....	1.1.17
(198)	.....	1.1.18
(199)	.....	1.1.19
(200)	.....	1.1.20
(201)	.....	1.1.21
(202)	.....	1.1.22
(203)	.....	1.1.23
(204)	.....	1.1.24
(205)	.....	1.1.25
(206)	.....	1.1.26
(207)	.....	1.1.27
(208)	.....	1.1.28
(209)	.....	1.1.29
(210)	.....	1.1.30
(211)	.....	1.1.31
(212)	.....	1.1.32
(213)	.....	1.1.33
(214)	.....	1.1.34
(215)	.....	1.1.35

## 可靠性的基础理论 第 1 章

建立以可靠性理论为基础的产品的寿命概念，并科学地评估产品的寿命和可靠性，这是当前工业产品可靠性工作面临的重要任务。本教材就是在这样的要求下编写的。它是航空工业部举办的“可靠性设计研究班”的系统教材之一。

本教材共分六章。第 1 章介绍产品可靠性数据的收集和整理，并给出了不规则截尾数据的可靠度函数或失效分布函数的计算方法；第 2 章叙述了常见的累积失效分布函数及其可靠性数量指标；第 3 章是总体分布类型的假设检验，并对不完全样本的分布检验作了介绍；第 4 章介绍分布参数的点估计，着重介绍了各种分布的图估法；第 5 章介绍分布参数的区间估计；第 6 章在前述各章的基础上，介绍了产品寿命指标的选取和寿命评估的程序和方法。各章均有计算实例并附有习题。附录中给出了数据处理中常用的计算表格。

限于水平及付印仓促，书中难免错误和不足，敬请各位读者批评指正。

本书由屠庆慈同志校阅，编写中得到杨为民、许海宝同志的热情帮助，在此一并致谢。

# 第1章 可靠性数据的收集与整理

## §1.1 数据收集的目的与途径

可靠性数据是开展可靠性工作的基础，收集可靠性数据的目的如下：

1. 根据数据提供的信息，改进产品的设计、制造工艺，提高产品的固有可靠度；并为新技术的研究、新产品的研制提供信息。
2. 根据现场使用提供的信息，改进产品的维修性，使产品结构合理，维修方便，提高产品使用的有效度。
3. 根据可靠性数据预测系统的可靠性与维修性，开展系统的可靠性设计和维修性设计。
4. 为产品可靠性指标评定、寿命评估提供必要的信息。

可靠性数据的来源贯穿于产品设计、制造、试验到使用、维护的整个过程，也就是从原材料和元件的供应到现场使用、操作工作的所有方面，如图1.1。总起来说，可靠性数据可以从两方面得到，一是在实验室进行可靠性试验；另一方面从产品实际使用现场得到。从实验室得到的数据叫试验数据，而现场得到的数据则叫现场数据。从这两方面得到的数据各有所长，但互为补充，缺一不可。

试验数据的收集一般比较完善，设计人员可根据事先的要求和目的记录所需的数据。现场数据收集的方法一般有两种：一种是对现场工作人员发报表，令其逐项填写，然后定期回收；另一种是培训一批专业人员编制调查纲目，有计划、有目的地深入现场进行调查，按统一的格式进行数据的收集。

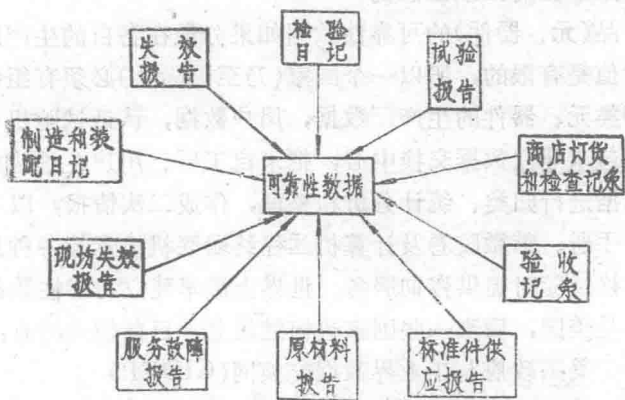


图1.1 一些典型的数据来源

不管用哪种方式收集数据，应注意的问题都是共同的。首先为保证可靠性数据的准确性，一定要保证收集到的数据的真实性。对于试验数据，从试验设计开始就要对产品的环境条件、样品的抽样数及试验时间、测试周期等认真考虑。对于现场数据必须明确所收集的信息的用途，例如，对于研制的新品，为了提高产品的可靠性，应尽快收集产品的早期故障，以便找出原因，采取措施，消除早期故障。又如有耗损型故障的产品，为了决定其翻修周期应收集具有耗损特征的故障数据。

对于所收集的数据必须预先制定判别标准，进行筛选。对异常数据应根据物理背景进行分析，不能胡乱接受，但也不能一律舍弃，尤其是新品，可能它们正反映实际情况，应慎重处之。

在收集数据的过程中必须弄清产品有关工作情况的规定和有关失效(故障)的定义，区别完全失效、偶然失效、退化失效、间隙失效的情况，区别各种失效模式，尽可能找出失效机理上的原因。由于产品以外的其它设备或部件失效可引起二次从属失效，或者也可能由于人的误用、误判和技术不熟练而造成产品的失效等，都应加以区分。有些有关产品使用状态及影响寿命的重要资料也

是在收集数据时必须注意的。

产品(元、器件)的可靠性数据如果分散在各自的生产厂则其利用价值是有限的,所以一个国家(乃至国际上)必须有组织地将所有种类元、器件的生产厂数据,用户数据,认证试验机构的数据集中起来建立数据交换中心,把来自工厂、用户、试验机构的各类数据进行归类、统计分析和整理,作成二次情报,以刊物、卡片、手册、缩微胶卷及计算机远程终端联机检索等各种形式,实施交换或随时提供咨询服务。世界上最早建立可靠性数据交换中心的是美国,后来一些国家也相继建立,目前较大的有:

1. 美国政府与工业界数据交换网(GIDEP)
2. 美国的失效率数据交换网(FARADA)
3. 美国的可靠性分析中心(RADC-RAC)

4. 欧洲的电子元器件认证数据交换中心(EXACT)

5. 法国CNET可靠性数据中心

6. 日本工业技术院可靠性技术研究室

我国电子工业部也成立了电子产品数据交换网数据中心。为了有效地收集和使用可靠性数据建立上述的数据交换中心是非常必要的。

通过现场收集或试验得到的原始记录、资料、数据,必须运用合理的统计分析方法,才能得到准确的可靠性指标,因此可靠性数据的处理及其统计分析是一门专门的技术,需要我们具有清晰的可靠性基本概念和概率统计的知识,也需要我们有高度的责任感,才能做好这项工作。

## §1.2 可靠性寿命试验

从实验室得来的数据主要通过对产品进行寿命试验或加速寿命试验得到。

寿命试验又有完全寿命试验和不完全寿命试验之分。完全寿

命试验是所有参加试验的样品做到完全失效后终止试验。不完全寿命试验中又可分为规则截尾寿命试验和不规则截尾寿命试验。在寿命试验中，我们主要对不完全寿命试验感兴趣，以下将较详细地叙述。

规则截尾寿命试验也即一般指的定数截尾和定时截尾寿命试验。此二种试验，根据样品有无替换又分为有替换定数和定时截尾寿命试验及无替换定数和定时截尾寿命试验。

### 1. 定数截尾寿命试验

试验前规定产品的失效数 $r$ ，试验进行到失效数达到失效数 $r$ 就终止试验。若试验进行中，产品失效一个就用一个好的样品替换上去继续试验到达规定失效数终止，这就是有替换定数截尾寿命试验。试验自始至终保持样品数不变。若试验中将失效的样品撤下不再补充，而将残存的样品继续试验到规定的失效数 $r$ 才停止，这就是无替换定数截尾寿命试验。用图形表示如图1.2。

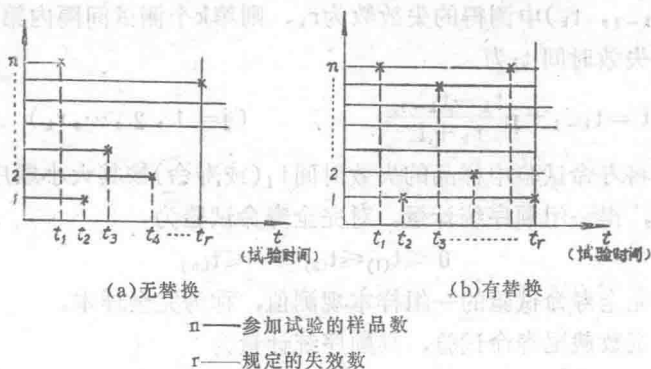
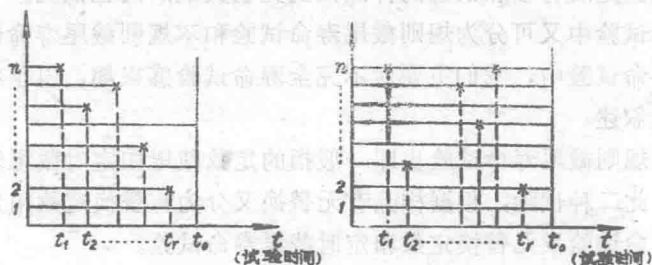


图1.2 定数截尾寿命试验

### 2. 定时截尾寿命试验

试验前规定产品的试验时间 $t_0$ ，试验进行到规定的试验时间 $t_0$ 就终止试验。试验也分有替换定时截尾寿命试验和无替换定时截尾寿命试验，其图形表示如图1.3。

全宗不... 试验由若干组独立之试验样品... 试验时间... 试验间隔... 试验时间... 试验间隔...



(a) 无替换

(b) 有替换

$n$ ——参加试验的样品数  
 $t_0$ ——规定的试验时间  
 $r$ ——失效的样品数

图1.3 定时截尾寿命试验

在寿命试验中, 采用定时方法测试失效时间时, 若某测试间隔 $(t_{k-1}, t_k)$ 中测得的失效数为 $r_k$ , 则第 $k$ 个测试间隔内第 $j$ 个样品的失效时间 $t_{ij}$ 为

$$t_{ij} = t_{k-1} + j \frac{t_k - t_{k-1}}{r_k + 1} \quad (j = 1, 2, \dots, r_k) \quad (1.1)$$

将寿命试验中样品的失效时间 $t_{ij}$ (或寿命)按其大小顺序进行排列, 得一组顺序统计量。对完全寿命试验为

$$0 \leq t_{(1)} \leq t_{(2)} \leq \dots \leq t_{(n)}$$

完全寿命试验的一组样本观测值, 称为完全样本。

定数截尾寿命试验, 其顺序统计量为

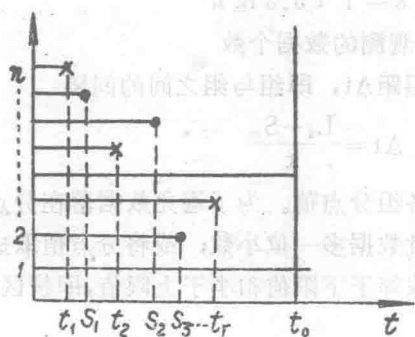
$$0 \leq t_{(1)} \leq t_{(2)} \leq \dots \leq t_{(r)}$$

定时截尾寿命试验, 顺序统计量为

$$0 \leq t_{(1)} \leq t_{(2)} \leq \dots \leq t_{(r)} \leq t_0$$

截尾寿命试验得到的一组样本观测值, 称为不完全样本。

不完全样本除截尾试验得到的外, 还包括试验中途有失去观测的样品, 样品撤离时尚未失效, 称它为删除样品。如图1.4所示。



x —— 样品失效      • —— 样品撤离

图1.4 具有删除样品的定时截尾试验

图中  $t_0$  为试验截止时间

$t_1, t_2, \dots, t_r$  为失效样品的失效时间

$s_1, s_2, \dots$  为删除样品的撤离时间

具有删除样品的不完全样本数据在现场统计中是会经常遇到的，在§1.5中将详细叙述。

关于统计量和统计量观测值的表示符号本书未予区分。

## §1.3 数据整理的直方图法和经验分布函数

### 1.3.1 直方图法

直方图是用来整理可靠性数据，找出其规律性的一种常用方法。通过作直方图，可以求出一批数据(一个样本)的样本平均值及样本的均方差，并由其图形的形状近似判断该批数据(样本)的总体属于哪种分布。直方图法的具体步骤如下：

1. 在收集到的一批数据中，找出其最大值( $L_n$ )和最小值( $S_m$ )。
2. 将数据分组。一般用经验公式(1.2)确定所分组数  $k$



$$k = 1 + 3.3 \lg n \quad (1.2)$$

其中  $n$ ——观测的数据个数

3. 计算组距  $\Delta t$ ，即组与组之间的间隔

$$\Delta t = \frac{L_a - S_m}{k}$$

4. 确定各组分点值。为了避免数据落在分点上，一般将分点值取得比该批数据多一位小数；或将分点值取成大于下限值和等于上限值，或等于下限值和小于上限值，即按区域( )或( )分配数据。

5. 计算各组的中心值

$$t_i = \frac{\text{某组下限值} + \text{某组上限值}}{2}$$

6. 统计落入各组的频数  $\Delta r_i$  和频率  $w_i$

$$w_i = \frac{\Delta r_i}{n}$$

7. 计算样本平均值  $\bar{t}$

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \Delta r_i \cdot t_i$$

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^k w_i t_i \quad (1.3)$$

8. 计算样本均方差  $\sigma$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k \Delta r_i (t_i - \bar{t})^2} \quad (1.4)$$

9. 作直方图

① 频数直方图：将各组的频数作纵座标，失效时间为横座标，作成失效频数直方图，参见图1.5。

② 频率分布图：将各组频率除以组距  $\Delta t$ ，取  $w_i / \Delta t$  为纵座标，横座标为失效时间，作成失效频率分布图，参见图1.6。由图看出，当样本容量增大，组距  $\Delta t$  缩小时，将各直方之中点连成一