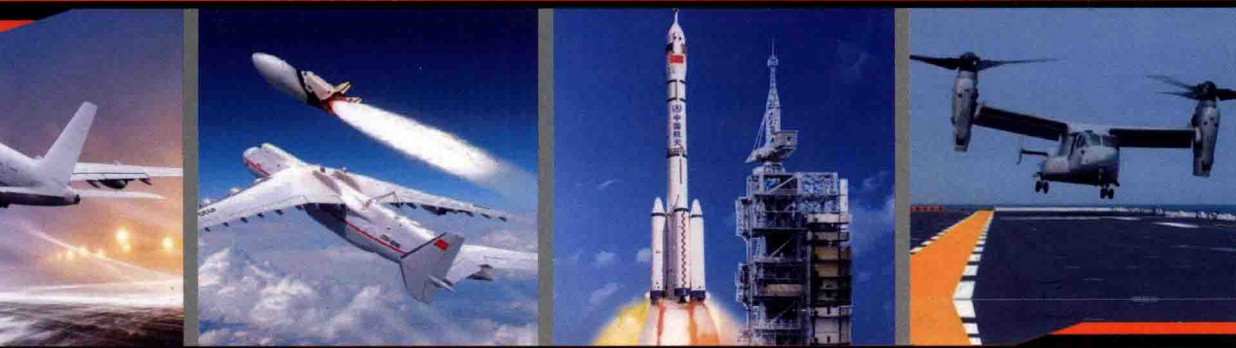


高等学校规划教材·航空、航天与航海科学技术

PLANNING TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION



可靠性工程基础

宋述芳 吕震宙 王燕萍 编著

西北工业大学出版社

高等学校规划教材·航空、航天与航海科学技术

PLANNING TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION

□ 封面设计 / 扬帆



ISBN 978-7-5612-6209-2



9 787561 262092 >

定价：30.00元

高等学校规划教材·航空、航天与航海科学技术

KEKAOXING GONGCHENG JICHU

可靠性工程基础

宋述芳 吕震宙 王燕萍 编著

西北工业大学出版社

西安

【内容简介】 本书共7章,系统地介绍了可靠性工程的基础理论及工程应用。在介绍可靠性工程的基本概念和可靠性工程的基本内容的基础上,分别对电子系统及软件的可靠性问题进行了详细的阐述,并着重介绍了工程中常用的故障分析技术,以及结构可靠性的分析与设计和航空器结构可靠性工程。

本书既可作为高等学校高年级本科生和研究生学习可靠性理论的教材,也可作为可靠性工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性工程基础/宋述芳,吕震宙,王燕萍编著.

—西安:西北工业大学出版社,2018.8

高等学校规划教材·航空、航天与航海科学技术

ISBN 978-7-5612-6209-2

I. ①可… II. ①宋… ②吕… ③王… III. ①可靠性工程—高等学校—教材 IV. ①TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 195131 号

策划编辑:何格夫

责任编辑:王尧

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpup.com

印刷者:陕西博文印务有限责任公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:8.25

字数:197千字

版次:2018年8月第1版

2018年8月第1次印刷

定价:30.00元

前 言

可靠性工程是一门新兴的边缘学科,它涉及基础科学、技术科学和管理科学等众多学科。可靠性工程是在第二次世界大战后,随着航空、航天及电子工业的快速发展而兴起的,现已广泛应用于化工、机械等领域,为社会和企业带来了巨大的经济效益。

本书具有以下几个特点:

(1)全书内容安排合理,层次清晰,剪系统性强,理论体系完整。本书注重内容的新颖性,反映可靠性工程的最新研究状况及发展趋势。

(2)注重文字的简洁性,每部分内容的讲解短小精悍,简明扼要;注重语言的精简性,内容叙述循序渐进,深入浅出,通俗易懂。

(3)注重工程应用性,基于当前时代特点和科技发展的态势,密切结合国防现代化和武器装备现代化的需要,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用。

本书可作为高等学校机械、电子、软件、化工、航空、航天及自动化专业的研究生和本科生的教材,也是广大科技工作者学习与更新知识的一本有价值的参考书。

本书共7章,第1章回顾了可靠性分析的数学工具——概率论与数理统计;第2章对可靠性工程中的概念进行了系统的说明;第3~5章详细介绍了电子元器件及系统的可靠性分析与设计、软件可靠性工程和工程中常用的故障分析技术;第6章介绍了结构可靠性的基本理论、求解方法与设计思路;第7章针对航空工程中的可靠性问题进行了案例分析。

本书的编写分工如下:第1~2章由王燕萍编写;第3~5章、第6.5节、第7章由宋述芳编写;第6.1~6.4节由吕震宙编写,最后由宋述芳统稿并定稿。

在本书的整理过程中,薛红军老师、崔卫民老师、喻天翔老师给了许多具体的指导意见,研究生史朝印、马艺琰也做了很多整理及校稿工作。本书在编写过程中,参阅了很多相关资料,在此一并表示感谢!

由于笔者的阅历和水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请同行和读者多多批评和指正。

宋述芳

2018年3月

目 录

第 1 章 概率论与数理统计的基础知识	1
1.1 随机事件 (Random Events)	1
1.2 随机变量 (Random Variables)	2
1.3 随机向量 (Random Vector)	2
1.4 数字特征 (Numerical Characteristics)	3
1.5 极限定理 (Limit Theorems)	4
1.6 样本及统计量 (Samples and Statistics)	5
1.7 参数估计 (Estimation of Parameters)	5
1.8 假设检验 (Hypotheses Testing)	6
第 2 章 可靠性及可靠性工程	8
2.1 可靠性(reliability)的定义	8
2.2 可靠性的分类	9
2.3 可靠性的发展	9
2.4 可靠性的基本概念	11
2.5 可靠性工程	15
思考题	15
第 3 章 电子产品的可靠性及设计	16
3.1 寿命指标	16
3.2 典型失效分布——失效率曲线	18
3.3 电子系统的可靠性分析	18
3.4 电子系统的可靠性设计	20
思考题	21
第 4 章 软件可靠性工程	22
4.1 软件可靠性概述	22
4.2 软件可靠性工程	27
思考题	35

第 5 章 故障分析技术	36
5.1 故障模式、影响及危害性分析	36
5.2 事件树分析	47
5.3 故障树分析	53
5.4 因果分析	87
5.5 总结	91
思考题	91
第 6 章 结构可靠性分析与设计	93
6.1 安全余量方程	93
6.2 应力-强度干涉模型	94
6.3 可靠性分析的近似解析法	97
6.4 可靠性分析的 Monte Carlo 法	107
6.5 结构可靠性设计	108
思考题	118
第 7 章 航空器结构可靠性工程	119
7.1 航空可靠性基本概念	119
7.2 飞机结构或机构可靠性分析与设计	121
参考文献	126

第 1 章 概率论与数理统计的基础知识

概率论与数理统计是一门研究随机现象统计规律的数学,是处理可靠性工程的数学手段和工具。

1.1 随机事件 (Random Events)

1. 随机试验、样本空间、随机事件

概率论研究随机现象的统计规律需要借助于随机试验。随机试验具有以下的特点:

- (1) 可以在相同条件下重复进行;
- (2) 事先知道可能出现的所有结果;
- (3) 进行试验前并不知道哪个试验结果会发生。

将随机试验 E 的所有结果构成的集合称为 E 的样本空间,记为 $S = \{e\}$ 。样本空间 S 的子集 A 被称为随机事件,简称事件。当子集中的一个样本点出现时,该随机事件就发生了。

2. 频率与概率

引入频率和概率的定义可以表征随机事件发生的可能性或频繁程度。

在相同的条件下,进行了 n 次试验,在这 n 次试验中,事件 A 发生的次数 n_A 称为事件 A 发生的频数,比值 n_A/n 称为事件 A 发生的频率,记为 $f_n(A)$ 。

实数 $P(A)$ 表示事件 A 在一次试验中发生的可能性大小,称 $P(A)$ 为事件 A 的概率,满足以下三个条件:

- (1) 非负性, $0 \leq P(A) \leq 1$;
- (2) 规范性, $P(S) = 1$;
- (3) 可列可加性,若 $A_1, A_2, \dots, A_n, \dots$ 两两互不相容,则

$$P\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i)$$

3. 等可能概型

若随机试验 E 满足:

- (1) 样本空间 $S = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 中样本点有限(有限性);
- (2) 出现每一样本点的概率相等(等可能性);

则称这种试验为等可能概型(或古典概型)。

等可能概型中的基本事件 e_i 发生的概率为

$$P(e_i) = \frac{1}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

含有 k 个基本事件的事件 A 发生的概率 $P(A)$ 为

$$P(A) = \frac{k}{n} = \frac{A \text{ 所包含的基本事件数}}{S \text{ 中的基本事件总数}}$$

4. 条件概率和独立性

可以用条件概率和独立性表示随机事件之间的关系。条件概率和独立性的定义如下：

(1) 随机事件 A, B , 且 $P(A) > 0$, 称 $P(B | A) = P(AB)/P(A)$ 为事件 A 发生的条件下事件 B 发生的条件概率。

(2) 随机事件 A, B , 若等式 $P(AB) = P(A)P(B)$ 成立, 则称事件 A 与 B 相互独立。

1.2 随机变量 (Random Variables)

1. 随机变量

设随机试验 E 的样本空间为 $S = \{e\}$, 引入实值单值函数 $X = X(e)$, 使得 S 中每个样本点 e 都有一个 X 的取值与之对应, 称 X 为样本空间上的随机变量。随机变量 X 的分布函数为 $F(x) = P(X \leq x)$, $-\infty < x < \infty$, 其中 x 为任意实数, 分布函数可以完整地描述随机变量的统计规律。

根据随机变量值域的特点, 可以将随机变量分为离散型随机变量和连续型随机变量。

描述离散型随机变量的统计规律, 可以用分布律, 即获得

$$X \text{ 所有可能的取值: } X = x_1, x_2, \dots, x_k, \dots$$

$$X \text{ 取每个值的概率: } P(X = x_k) = p_k, k = 1, 2, 3, \dots$$

如(0-1)分布、二项分布 $B(n, p)$ 、泊松分布 $\pi(\lambda)$ 等。

描述连续性随机变量的统计规律可以用概率密度函数 $f(x)$ 表示：

$$f(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$$

如均匀分布 $U(a, b)$ 、指数分布 $\exp(\lambda)$ 、正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 等。

2. 随机变量函数的分布

设随机变量 X 具有概率密度函数 $f_X(x)$, $-\infty < x < +\infty$, 函数 $g(x)$ 处处可导, 且恒有 $g'(x) > 0$ (或恒有 $g'(x) < 0$), 则 $Y = g(X)$ 为连续型随机变量, 其概率密度为

$$f_Y(y) = \begin{cases} f_X(h(y)) |h'(y)|, & \alpha < y < \beta \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中, $\alpha = \min\{g(-\infty), g(+\infty)\}$; $\beta = \max\{g(-\infty), g(+\infty)\}$; $h(y)$ 是 $g(x)$ 的反函数。

1.3 随机向量 (Random Vector)

1. 二维随机向量

设 E 是一个随机试验, 样本空间 $S = \{e\}$; 设 $X = X(e)$ 和 $Y = Y(e)$ 是定义在 S 上的随机变量, 由它们构成的向量 (X, Y) 叫做二维随机向量, 其联合累积分布函数为

$$F(x, y) = P\{(X \leq x) \cap (Y \leq y)\} \stackrel{\text{记作}}{=} P(X \leq x, Y \leq y)$$

相应的二维离散型随机向量的分布律描述如下：

所有可能取值对: $(x_i, y_j) \quad i = 1, 2, \dots, m, \dots; j = 1, 2, \dots, n, \dots$

取每一组取值的概率: $p(x_i, y_j) = P(X = x_i, Y = y_j) = p_{ij}, i, j = 1, 2, \dots$

相应的二维连续型随机向量的联合概率密度函数为

$$F(x, y) = \int_{-\infty}^y \int_{-\infty}^x f(u, v) du dv$$

二维随机向量的每一个分量也是随机变量,其边缘分布的描述形式包括:

(1) 边缘分布函数: $F_X(x) = P(X \leq x_i) = P(X \leq x, Y \leq +\infty) = F(x, +\infty)$ 。

(2) 离散型变量 X 的边缘分布律: $P(Y = x_i) = \sum_{j=1}^{\infty} p_{ij} \stackrel{\text{记为}}{=} p_{i \cdot}, i = 1, 2, \dots$ 。

(3) 连续型变量 X 的边缘概率密度函数: $f_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy$ 。

二维随机向量的分量之间的关系可以考虑条件分布和独立性,定义如下:

(1) $Y = y_j$ 条件下随机变量 X 的条件分布律:

$$P\{X = x_i | Y = y_j\} = \frac{P\{X = x_i, Y = y_j\}}{P\{Y = y_j\}} = \frac{p_{ij}}{p_{\cdot j}}, \quad i = 1, 2, \dots$$

(2) $Y = y$ 的条件下 X 的条件概率密度:

$$f_{X|Y}(x | y) = \frac{f(x, y)}{f_Y(y)}, \quad f_Y(y) > 0$$

设 X 与 Y 是两个随机变量,若对任意的 x, y 有 $P\{X \leq x, Y \leq y\} = P\{X \leq x\}P\{Y \leq y\}$, 则称随机变量 X 与 Y 相互独立。

2. 随机变量函数的分布

对于常见的随机变量函数,随机性的传递规律如下:

(1) $Z = X + Y$, $f_{X+Y}(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(z - y, y) dy$ 。

(2) $Z = Y/X$, $f_{Y/X}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} |x| f(x, xz) dx$ 。

(3) $M = \max(X, Y)$, $F_{\max}(z) = F_X(z)F_Y(z)$ 。

(4) $N = \min(X, Y)$, $F_{\min}(z) = 1 - [1 - F_X(z)][1 - F_Y(z)]$ 。

3. n 维随机向量

二维随机向量推广至 n 维随机向量,定义联合分布函数为

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_n \leq x_n)$$

1.4 数字特征 (Numerical Characteristics)

累积分布函数 $F(x)$ 完整刻画了随机变量的统计特性,但有时候较难求得,此时转而了解随机变量取值的一些特征,通过这些特征值简单了解随机变量的取值特征。

1. 数学期望 (Expected Value, Expectation, Mean)

定义式: $E(X) = \sum_{k=1}^{\infty} x_k p_k, \quad E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx$

数学期望的重要性质有以下几点:

(1) 设 C 是常数,则有 $E(C) = C$;

(2) 设 X 是随机变量, C 是常数,则有 $E(CX) = CE(X)$;

(3) 设 X, Y 是两个随机变量,则有 $E(X + Y) = E(X) + E(Y)$;

(4) 设 X, Y 是相互独立的随机变量,则有 $E(XY) = E(X)E(Y)$ 。

2. 方差 (Variance) 和标准差 (Standard Deviation)

定义式:

方差为
$$D(X) = E\{[X - E(X)]^2\} = E(X^2) - E^2(X)$$

标准差为
$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}$$

方差的重要性质:

- (1) 设 C 是常数, 则有 $D(C) = 0$;
- (2) 设 X 是随机变量, C 是常数, 则有 $D(CX) = C^2 D(X)$;
- (3) 设 X, Y 是两个随机变量, 则有

$$D(X \pm Y) = D(X) + D(Y) \pm 2E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\}$$

- (4) $D(X) = 0$ 的充要条件是 X 以概率 1 取常数 $E(X)$ 。

3. 协方差 (Covariance) 和相关系数 (Correlation Coefficient)

定义式:

协方差为
$$\text{Cov}(X, Y) = E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\} = E(XY) - E(X)E(Y)$$

相关系数为
$$\rho_{XY} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)D(Y)}}$$

相关系数的重要性质如下:

- (1) $|\rho_{XY}| \leq 1$;
- (2) $|\rho_{XY}| = 1$ 的充要条件是, 存在常数 a, b 使

$$P(Y = a + bX) = 1$$

4. 矩 (Moments) 和协方差矩阵 (Covariance Matrix)

X 的 k 阶 (原点) 矩:
$$E(X^k)$$

X 的 k 阶中心矩:
$$E\{[X - E(X)]^k\}$$

X 和 Y 的 $k + l$ 阶混合矩:
$$E\{X^k Y^l\}$$

X 和 Y 的 $k + l$ 阶混合中心矩:
$$E\{[X - E(X)]^k [Y - E(Y)]^l\}$$

协方差矩阵:
$$\begin{pmatrix} D(X_1) & \text{Cov}(X_1, X_2) & \cdots & \text{Cov}(X_1, X_n) \\ \text{Cov}(X_2, X_1) & D(X_2) & \cdots & \text{Cov}(X_2, X_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(X_n, X_1) & \text{Cov}(X_n, X_2) & \cdots & D(X_n) \end{pmatrix}$$

1.5 极限定理 (Limit Theorems)

1. 大数定律 (the Law of Large Numbers)

大数定律讨论大量重复试验所反映出的稳定性: 频率的稳定性, n 个随机变量平均值的稳定性。

2. 中心极限定理 (the Central Limit Theorem)

中心极限定理讨论在很一般的条件下, 在 n 趋向于无穷时, n 个随机变量和的极限分布是正态分布。利用这些结论, 在数理统计中很多复杂随机变量的分布可以用正态分布来近似, 而正态分布有许多完美的理论, 从而可以获得既实用又简单的统计分析。

1.6 样本及统计量 (Samples and Statistics)

从总体 X 中随机地抽取 n 个个体 X_1, X_2, \dots, X_n , 构成随机样本。样本 X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立且与总体 X 同分布。

根据样本可获得样本的函数——统计量及相应的观察值, 如样本均值、样本方差、样本 k 阶原点矩、样本 k 阶中心矩等。正态总体可推得分布已知的抽样分布, 包括以下几点:

(1) 设 X_1, X_2, \dots, X_n 是来自总体 $N(0, 1)$ 的样本, 则称统计量

$$\chi_n^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2$$

服从自由度为 n 的 χ^2 分布, 记为 $\chi^2 \sim \chi^2(n)$ 。

(2) 设 $X \sim N(0, 1), Y \sim \chi^2(n)$, 且 X 与 Y 相互独立, 则称随机变量

$$t = \frac{X}{\sqrt{Y/n}}$$

服从自由度为 n 的 t 分布 (Student 分布), 记作 $t \sim t(n)$ 。

(3) 设 $U \sim \chi^2(n_1), V \sim \chi^2(n_2)$, 且 U 与 V 相互独立, 则称

$$F = \frac{U/n_1}{V/n_2}$$

服从自由度为 (n_1, n_2) 的 F 分布, 记为 $F \sim F(n_1, n_2)$ 。

1.7 参数估计 (Estimation of Parameters)

总体分布形式已知情况下, 利用样本对总体的分布参数进行估计, 分为点估计和区间估计。

1. 点估计

点估计包括矩估计方法和极大似然估计方法。矩估计的理论依据是样本的 k 阶矩依概率收敛于总体的 k 阶矩。极大似然估计的理论依据为小概率事件在一次试验中不可能发生, 若在一次试验中发生了的事件其概率应该很大。点估计的结果不唯一, 对估计量的进行评价的准则有无偏性、有效性、相合性。

2. 区间估计

区间估计主要包括正态总体均值和方差的区间估计, 非正态总体分布参数的区间估计。表 1-1 和表 1-2 分别列出了单个正态总体和两个独立正态总体参数区间估计的统计量和置信区间。

表 1-1 单个正态总体的参数估计

	条 件	统计量	置信区间
单个正态 总体 $N(\mu, \sigma^2)$	σ^2 已知 μ 的置信区间	$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \sim N(0, 1)$	$\left[\bar{X} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} Z_{\alpha/2} \right]$

续表

	条 件	统计量	置信区间
单个正态 总体 $N(\mu, \sigma^2)$	σ^2 未知 μ 的置信区间	$T = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \sim t(n-1)$	$\left[\bar{X} \pm \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \right]$
	μ 已知 σ^2 的置信区间	$\chi^2 = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\bar{X} - \mu)^2 \sim \chi^2(n)$	$\left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{\chi_{\alpha/2}^2(n)}, \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{\chi_{1-\alpha/2}^2(n)} \right]$
	μ 未知 σ 的置信区间	$\chi^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-1)$	$\left[\frac{S\sqrt{n-1}}{\sqrt{\chi_{\alpha/2}^2(n-1)}}, \frac{S\sqrt{n-1}}{\sqrt{\chi_{1-\alpha/2}^2(n-1)}} \right]$

表 1-2 两个相互独立正态总体的参数估计

	条 件	统计量	置信区间
两个正态总体 $X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ $Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$ X 与 Y 独立	σ_1^2, σ_2^2 已知 $\mu_1 - \mu_2$ 的置信区间	$Z = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$	$\left[\bar{X} - \bar{Y} \pm Z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} \right]$
	σ_1^2, σ_2^2 未知 $\mu_1 - \mu_2$ 的置信区间	$Z = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$	$\left[\bar{X} - \bar{Y} \pm Z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}} \right]$
	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$ 未知 $\mu_1 - \mu_2$ 的置信区间	$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \sim t(n_1 + n_2 - 1)$	$\left[\bar{X} - \bar{Y} \pm t_{\alpha/2}(n_1 + n_2 - 2) S_n \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$
	μ_1, μ_2 未知 σ_1^2/σ_2^2 的置信区间	$F = \frac{\sigma_2 S_1 \sqrt{(n_1 - 1)}}{\sigma_1 S_2 \sqrt{(n_2 - 1)}} \sim F(n_1 - 1, n_2 - 1)$	$\left[\frac{S_1^2}{S^2 \cdot F_{\alpha/2}(n_1 - 1, n_2 - 1)}, \frac{S_1^2}{S^2 \cdot F_{1-\alpha/2}(n_1 - 1, n_2 - 1)} \right]$

1.8 假设检验 (Hypotheses Testing)

为推断总体的分布形式或参数等未知特性, 提出某种假设, 依据样本提供的信息, 做出“接受”或“拒绝”的判断, 称为假设检验。在假设检验中容易犯两类错误: 弃真和存伪。而显著性检验针对控制犯第一类错误(H_0 为真而做出拒绝 H_0 的判断) 的概率不超过显著性水平 α 的假设检验。

显著性检验主要针对正态总体均值和方差的参数假设检验(见表 1-3 和 1-4) 和拟合优度检验。

表 1-3 正态总体均值的假设检验

	原假设 H_0	检验统计量	H_0 为真时 统计量的分布	备择假设 H_1	拒绝域
单个正态总体 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$	$\mu = \mu_0$ (σ^2 已知)	$Z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}$	$N(0, 1)$	$\mu > \mu_0$ $\mu < \mu_0$ $\mu \neq \mu_0$	$z \geq z_\alpha$ $z \leq -z_\alpha$ $ z \geq z_{\alpha/2}$
	$\mu = \mu_0$ (σ^2 未知)	$T = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$	$t(n-1)$	$\mu > \mu_0$ $\mu < \mu_0$ $\mu \neq \mu_0$	$t \geq t_\alpha(n-1)$ $t \leq -t_\alpha(n-1)$ $ t \geq t_{\alpha/2}(n-1)$
两个正态总体 $X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ $Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$ X 与 Y 独立	$\mu_1 - \mu_2 = \delta$ (σ_1^2, σ_2^2 已知)	$Z = \frac{\bar{x} - \bar{y} - \delta}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$	$N(0, 1)$	$\mu_1 - \mu_2 > \delta$ $\mu_1 - \mu_2 < \delta$ $\mu_1 - \mu_2 \neq \delta$	$z \geq z_\alpha$ $z \leq -z_\alpha$ $ z \geq z_{\alpha/2}$
	$\mu_1 - \mu_2 = \delta$ ($\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$) (σ^2 未知)	$T = \frac{\bar{x} - \bar{y} - \delta}{s_w \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$	$t(n_1 + n_2 - 2)$	$\mu_1 - \mu_2 > \delta$ $\mu_1 - \mu_2 < \delta$ $\mu_1 - \mu_2 \neq \delta$	$t \geq t_\alpha(n_1 + n_2 - 2)$ $t \leq -t_\alpha(n_1 + n_2 - 2)$ $t \geq t_{\alpha/2}(n_1 + n_2 - 2)$

表 1-4 正态总体方差的假设检验

	原假设 H_0	检验统计量	H_0 为真时统计 量的分布	备择假设 H_1	拒绝域
单个正态总体 $N(\mu, \sigma^2)$	$\sigma^2 = \sigma_0^2$ (μ 已知)	$\chi^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2}$	$\chi^2(n-1)$	$\sigma^2 > \sigma_0^2$ $\sigma^2 < \sigma_0^2$ $\sigma^2 \neq \sigma_0^2$	$\chi^2 \geq \chi_\alpha^2(n-1)$ $\chi^2 \leq \chi_{1-\alpha}^2(n-1)$ $\chi^2 \geq \chi_{\alpha/2}^2(n-1)$ 或 $\chi^2 \leq \chi_{1-\alpha/2}^2(n-1)$
两个正态总体 $N(\mu_1, \sigma_1^2)$ $N(\mu_2, \sigma_2^2)$ X 与 Y 独立	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ (μ_1, μ_2 未知)	$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$	$F(n_1 - 1, n_2 - 1)$	$\sigma_1^2 > \sigma_2^2$ $\sigma_1^2 < \sigma_2^2$ $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	$F \geq F_\alpha(n_1 - 1, n_2 - 1)$ $F \leq F_{1-\alpha}(n_1 - 1, n_2 - 1)$ $F \geq F_{\alpha/2}(n_1 - 1, n_2 - 1)$ 或 $F \geq F_{1-\alpha/2}(n_1 - 1, n_2 - 1)$

第2章 可靠性及可靠性工程

2.1 可靠性(Reliability)的定义

可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。可靠性的概率度量也称为可靠度,是产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率。

在可靠性的定义中,“三个规定”是可靠性概念的核心,可靠性的研究需明确所研究对象的工作时间、工作条件和赋予其的功能。

1. 研究对象

产品(Product)是可靠性问题的研究对象,它是泛指,可以是元件、组件、零件、部件、机器、设备,甚至整个系统。在可靠性工程中,产品分为不可修复产品和可修复产品。

(1)不可修复产品:产品在使用过程中发生失效,其寿命即告终结。

(2)可修复产品:产品故障后,可通过更换元器件或调整恢复其功能。

研究可靠性问题时不仅要确定具体的产品,还应明确它的内容和性质。如果研究对象是一个系统,则不仅包括硬件,也包括软件以及人的判断与操作等因素,需要以人-机系统的观点去观察和分析问题。

2. 规定的条件

同一产品在不同条件下工作会表现出不同的可靠性水平,离开具体条件谈可靠性是毫无意义的。“规定的条件”有广泛的内容,一般包括产品使用时的环境条件和工作条件(包括动力条件,负载条件,使用、运输、储存、维护条件等)。

(1)环境条件:包括气候环境(如温度、压力、湿度、降水、辐射等),生物化学环境(如腐蚀、酶降解、毒污染等),机械环境(如振动、碰撞、冲击等),电磁环境等。

(2)动力条件:影响产品性能的动力特性,包括电源(参数为电压、电流、频率等)和流体源(参数为压力、流量等)。

(3)负载条件:载荷、信号等的特性。

(4)使用、运输、储存、维护等条件。

3. 规定的时间

与可靠性关系非常密切的是关于产品使用期限的规定,因为可靠度是一个有时间性的定义,所以对时间性的要求一定要明确。时间可以是区间 $(0, t)$ 或区间 (t_1, t_2) 。有时对某些产品给出相对于时间的一些其他指标会更明确,例如里程(距离)、周期、次数、飞机的起降次数等。通常,产品可靠性是时间的递减函数,即工作时间越长,可靠性越低。

4. 规定的功能

一般来说,“完成规定功能”是指在规定的使用条件下能维持规定的正常工作而不失效(或发生故障),即研究对象(产品)能在规定的功能参数下正常运行。应注意“失效”不单指产品不

能工作,有些产品虽然还能工作,但由于其功能参数已漂移到规定界限之外了,即不能按照规定正常工作,也视为“失效”。因此,既要弄清该产品的功能是什么,其失效(或故障)是怎样定义的;还要注意产品的功能有主次之分(有时次要的故障不影响主要功能,因此也不影响完成主要功能的可靠性)。

5. 概率

“可靠度”是可靠性的概率度量。把概念性的可靠性用具体的数学形式——概率表示,这就是可靠性技术发展的出发点。在用概率来定义可靠度后,对元件、组件、零件、部件、总成、机器、设备、系统等产品的可靠程度的测定、比较、评价、选择等就有了共同的基础,对产品可靠性方面的质量管理才有了保证。

2.2 可靠性的分类

一般认为,产品的可靠性有固有可靠性和使用可靠性之分。

固有可靠性是在设计、制造中赋予产品的一种固有特性,它是产品开发者可以控制的,如仪表的输出范围、精度、敏度、分辨率、漂移等。而使用可靠性是产品在使用过程中表现出来的一种性能保持的特性,它除了考虑固有可靠性,还要考虑产品安装、操作使用、维修保障等的影响。在包装、运输、储存、安装、使用、维修保养及修理等环节中,产品可能会受到种种条件的影响而导失效。

产品的可靠性还可以分为基本可靠性和任务可靠性。基本可靠性是产品在规定的条件下,无故障的持续时间或概率,反映产品对维修和后勤保障的要求,即在能够完成任务的情况下,所需要的单元越少,所需的维修人力等越少,基本可靠性越高。而任务可靠性是指产品在规定的任务剖面内完成规定功能的能力,仅考虑影响完成任务的故障,即为了完好地完成指定任务,所用的冗余系统越多,任务可靠性越高。两者之间需要在人力、物力、费用、任务之间进行权衡。

可靠性还有狭义可靠性和广义可靠性之分。狭义可靠性仅指产品在整个寿命周期内完成规定功能的能力。广义可靠性包含狭义可靠性和维修性(Maintainability)两方面内容,通常称为有效性(Availability)。

2.3 可靠性的发展

可靠性的提出与研究始于第二次世界大战,当时,多数电子设备频繁出现故障,影响性能的充分发挥。德国使用的 V-2 火箭在袭击伦敦时,有多达 80 枚火箭没有起飞就爆炸了,还有的没有到指定目的地就坠落了;美国的航空无线电设备 60%不能正常工作;因可靠性引起的飞机损失多达 2 100 架,是被击落飞机架数的 1.5 倍。美国国防部组织对电子管的可靠性研究,标志着可靠性研究的起步。1950 年,美国成立了海陆空三军的“国防部电子设备的可靠性专门工作组”,1952 年该工作组改名为“电子设备可靠性顾问团”(Advisory Group on Reliability of Electronic, AGREE),并于 1957 年 7 月发表了著名的 AGREE 报告,该报告从以下九个方面全面阐述了可靠性的设计、试验、管理的程序和方法。

(1)确定各种军用电子设备可靠性的最低要求,并根据系统各部件的重要性、技术水平等

来分配系统的可靠性。

(2) 建立研制样机的可靠性评估方法、平均无故障工作时间(MTBF)的测量方法及基于指数分布的序贯试验计划,以证明研制样机满足最低的可靠性要求。

(3) 制定试生产及批生产产品的可靠性评估程序和基于指数分布的 MTBF 寿命试验计划。

(4) 制定电子设备研制程序,以保证研制的设备具有合同所要求的固有可靠性。

(5) 基于失效率,制订电子元部件可靠性的分析方法及准则。

(6) 确定已有的采购及合同的条例与可靠性文件的相容性,提出必要的修改建议。

(7) 确定运输、包装对产品可靠性的影响,提出改进措施。

(8) 确定储存对设备可靠性的影响,提出改进措施。

(9) 确定在使用中保持设备固有的设计可靠性水平的方法及程序。

国际电子技术委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)于 1965 年设立“可靠性技术委员会”,并于 1977 年改名为“可靠性与维修性技术委员会”。它对可靠性领域的定义、用语、书写方法、可靠性管理、数据收集等方面,进行了国际间的协调工作。

美国对于机械可靠性的研究,开始于 20 世纪 60 年代初期,其发展与航天计划有关,如 Apollo 宇宙飞船。当时在航天方面由于机械故障引起的事故多,造成的损失大。于是美国宇航局(NASA)从 1965 年起开始进行机械可靠性研究,例如:用超载负荷进行机械产品的可靠性试验验证;在随机动载荷下研究机械结构和零件的可靠性;将预先给定的可靠度目标值直接落实到应力分布和强度分布都随时间变化的机械零件的设计中去,等等。结构系统可靠性(Structural System Reliability)于 20 世纪 60 年代中后期才开始被涉及,至七八十年代才加快发展起来;结构可靠性的另一分支——结构运动部件的可靠性研究(主要包括机构可靠性与可分离连接的可靠性研究)也于 20 世纪 70 年代很快发展起来。

随着世界各先进工业国家对产品可靠性的研究越来越深入,涉及的范围越来越广,各国纷纷建立了研究可靠性的专门机构,制定并逐步修改、完善有关产品可靠性管理、可靠性试验、可靠性设计、可靠性预计与评估的大量标准、手册和指南,并积极开展人为因素对可靠性的影响、软件可靠性及可靠性/维修性相互关系的研究。日本在 1956 年从美国引进可靠性技术,1958 年日本科学技术联盟设立了“可靠性研究委员会”,1960 年成立了“可靠性及质量控制专门小组”,并于 1971 年召开了第一届可靠性学术讨论会。日本将可靠性技术推广应用到民用工业部门并取得了很大成功,使得具有高可靠性的产品畅销到全世界,带来巨大的经济效益。英国于 1962 年出版了《可靠性与微电子学》杂志。法国国立通信研究所也在同一年成立了“可靠性中心”,进行数据的收集与分析,并于 1963 年创建了《可靠性》杂志。苏联在 20 世纪 50 年代就开始了可靠性理论及应用的研究,当时的苏联及东欧各国于 1964 年在匈牙利召开了第一届可靠性学术会议,至 1977 年已先后召开了四次这样的会议。我国的可靠性研究从 20 世纪 60 年代已经开始,至 70 年代和 80 年代已经有了很大发展。但我国可靠性理论及工程应用的发展研究还远不及国外的发达国家,这还需要我国这一领域的研究工作者大力研究、实施与推广。

目前,可靠性研究已经深入到航空航天、核工业、电力、船舶、建筑、计算机等各个领域;可靠性技术已贯穿于产品的开发研制、设计、制造、试验、使用、运输、保管及维修保养等各个环节。