

计算机 辅助可靠性工程

周广涛 著



计算机辅助可靠性工程

周广涛 著

宇航出版社

内 容 简 介

本书是借助计算机解决可靠性工程问题的专著。全书按可靠性工程的顺序,即可靠性数据统计分析,可靠性预计、分配、FTA、FMECA、容差分析,可靠性设计,系统可靠性计算,可靠性增长评估、综合评价和可靠性故障诊断等问题,先阐明基本理论,后介绍用计算机辅助方法进行分析计算,并给出具体计算机程序、框图和实例。因此,读者有了本书知识借助计算机辅助可靠性工程软件,就能迅速完成可靠性分析计算。

本书是一本知识新颖,内容较全、实用性很强的可靠性工程书;曾得到国际可靠性会议主席、世界可靠性权威B.S.Dhillon博士的推崇,并为之作序。所以是一般工程师和技术人员及可靠性工程人员和质量管理人士的常备参考书,也可作为大专院校的教课书和培训班的教材。

计算机辅助可靠性工程

周广涛 著

责任编辑:李响梅

宇航出版社出版

北京和平里滨河路1号 邮政编码100013

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

航天部七〇七所印刷厂印刷

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 21 字数: 542千字

1990年10月第1版第1次印刷 印数: 1-3000册

ISBN 7-80034-349-9/TB·060 定价: 11.20元

FOREWORD

Computers are increasingly being used at an alarming rate for various purposes. Some people have predicted that those days are not very far off when the computer business will be the largest single component of the US economy. Applications of computers in reliability engineering are following an increasing trend and are expected to rise at a significant rate in future. This book is a welcome addition at this very moment. The book successfully relates computer to a wide range of reliability engineering topics. Dr. Zhou Guangtao has extensive experience in important areas of reliability engineering and the table of contents of the book reflects this. The book should appeal to students, researchers, and practitioners alike.

B.S. Dhillon

B.S. Dhillon

Professor

Department of Mechanical Eng.

University of Ottawa

Canada

代 序

计算机正以惊人的速度日益增长地用于各种领域。已有人预言计算机业务成为美国经济结构中最大支柱的日子已为期不远了。在可靠性工程中，计算机的应用也呈现不断增长的趋势，而且可以预料在不远的将来也会以很快的速度增长。本书正在此时出版是值得欢迎的。书中成功地阐述了计算机在可靠性工程这一领域中的应用。可靠性专家周广涛在可靠性工程的主要领域有着丰富的经验，本书的内容就证明了这点。此书适用于大专院校的教材，亦是科研工作者和实际工程师的参考书。

B. S. 迪隆

(签名)

加拿大渥太华大学教授

1988.3.31.

B.S.迪隆简介

B.S.迪隆博士是加拿大渥太华大学的教授，是国际性杂志《微电子学和可靠性》编辑顾问委员会成员，《人员可靠性》的主编。迪隆博士还曾任由美国仪器协会出版的第10~13次建模和仿真年会会议录的副主编，担任科学技术用于发展国际协会1986年国际可靠性与质量控制会议总主席。最近他又被任命为能源系统国际性杂志的副主编。迪隆博士在系统可靠性、维修性以及质量控制方面有许多专著，有的已被译成俄文和中文。

迪隆博士是可靠性工程师协会荣誉奖和美国质量控制者协会博尼斯 (A.J.Bonis) 可靠性奖的获得者。他的名字已列入美国科学家名人录，国际传略字典，有卓越成就的人和国际知识分子名人录。

前 言

随着我国国民经济的发展使得科学技术在国民经济中的应用日益广泛。由于市场竞争激烈,使可靠性理论与实践在各项工程的应用中已成为客观发展的要求。可靠性理论与技术在提高产品质量、增加经济效益、赢得产品信誉和占领国内外市场等方面越来越显示其重要性。

可靠性工程在我国经历了约30年曲折的发展道路,到现在,它在理论研究、工程设计以及试验验证方面已有了一定的基础。目前国内在可靠性理论、可靠性工程方面已出版了不少专著。因为可靠性分析、计算、评估等工作中有较深的理论和大量的计算,用人工的方法来解决这些问题已带来很大的困难。随着计算机的迅速发展与普及,到现在已经有条件借助计算机来解决可靠性工程问题。所以本书对可靠性工程中碰到的主要问题,即可靠性数据统计分析、可靠性预计、分配、FTA与FM-ECA、容差分析、最优化中心设计、可靠性设计、系统可靠性计算、可靠性增长评估、故障诊断和可靠性综合评估等,用计算机辅助方法来进行解决。在书中给出了具体计算机程序、程序框图和实例;试图实现可靠性工程的计算机化即CARE。这样,只要有了计算机辅助可靠性工程(CARE)的软件,借助简单的说明书,不需要掌握高深的可靠性知识,就能很迅速地完成繁重的可靠性分析和计算,并将大大地推动可靠性工程的发展。

这种全面介绍这方面内容的专著，在国内还没有。

在1986年我们邀请前美国国防部可靠性顾问小组成员，TRW公司高级工程师，可靠性部主任 Low.K.Lee 博士访华时，对欲想写此书的设想进行了研讨，他充分肯定了本书的价值，并提出了宝贵的意见。

本书共分十章，基本按可靠性工程进行的顺序编写的，内容包括了从可靠性工程实际中提出来的问题，是完全符合可靠性工程的实际需要，所以本书是一本可靠性工程师和一般工程技术人员的工具书。书中大部分给出了程序的详细清单，有涉及提供软件的地方，还附有软件的使用说明，所以利用本书可以很快掌握计算机辅助可靠性工程CARE。书的另一特点是对可靠性的主要专题和大部分软件的编制都作了理论上的说明，所以亦是一本很好的可靠性工程教材，可供大专院校学生及研究生参考，或作可靠性培训班的教材。

作者在编写过程中，得到一级教授、国际宇航科学院院士蔡金涛教授的推荐出版，航天部总工程师梁思礼的大力支持，Low.K.Lee博士的指导，在此深表谢意。尤其要感谢国际可靠性会议主席、加拿大教授B.S 迪隆博士对本书的推崇和为之作序。还感谢宇航出版社李顺梅等同志的帮助。

由于本人水平所限，成书时间仓促，缺点和错误在所难免，敬请读者赐教。

作者

目 录

第一章 可靠性和计算机基本知识简介	(1)
1.1 可靠性基本概念及特征量	(1)
1.2 可靠性工程中使用的概率分布	(13)
1.3 系统可靠度计算	(22)
1.4 应用计算机解可靠性问题的一般过程	(33)
1.5 常用计算机语言简介	(35)
参考文献	(62)
第二章 可靠性数据统计分析及计算机程序	(64)
2.1 概述	(64)
2.2 正态分布上概率和百分点以及计算机程序	(65)
2.3 χ^2 分布上概率和百分点及其程序	(71)
2.4 F分布上概率和百分点及其程序	(80)
2.5 t 分布上概率和百分点及其程序	(85)
2.6 贝塔分布的分布函数和百分点及其程序	(89)
2.7 二项分布可靠度单侧置信下限计算及程序	(94)
2.8 威布尔分布参数双线性回归分析与程序	(102)
2.9 实验数据的均值、方差计算并打印经验分布曲线	(112)
2.10 微机上树叶图分布类型鉴别法	(117)
2.11 STAT1可靠性统计程序包	(122)
2.12 可靠性数据处理计算机通用程序	(130)
2.13 可靠性试验数据分析中异常数据剔除准则和 计算机程序	(133)
参考文献	(141)
第三章 可靠性预计、分配及其计算机程序	(143)
3.1 概述	(143)

3.2	串联系统的可靠性预计	(147)
3.3	有冗余系统的可靠性预计	(163)
3.4	AGREE分配法与计算机程序	(169)
3.5	单元失效率可预计情况下分配	(175)
3.6	冗余系统的可靠性指标分配	(180)
3.7	考虑各单元复杂程度的评分法	(185)
3.8	可靠性再分配方法	(189)
	参考文献	(193)
第四章	FTA、FMEA及计算机程序	(194)
4.1	概述	(194)
4.2	FTA和FMECA 概论	(208)
4.3	MFT失效树分析程序	(216)
4.4	MFFTAP多功能失效树分析程序	(228)
4.5	FTAMC微机失效树定量分析程序	(236)
4.6	FTA1~FTA4微机失效树分析程序	(243)
4.7	FMEA矩阵分析法和计算机程序	(252)
4.8	计算机辅助FMECA方法	(280)
	参考文献	(286)
第五章	容差分析和最优化中心设计及计算机程序	(291)
5.1	概述	(291)
5.2	灵敏度分析和容差分析的理论	(292)
5.3	蒙特卡罗容差分析法	(312)
5.4	电子线路最优化中心设计	(324)
5.5	电路通用可靠性分析程序	(333)
	参考文献	(352)
第六章	可靠性设计与计算机程序	(355)
6.1	概述	(355)
6.2	机械部件可靠性设计与计算机程序	(356)
6.3	可靠性热设计与计算机程序	(369)
6.4	可维修性计算和马尔可夫程序	(380)
6.5	试验优化设计与计算程序	(390)

参考文献	(399)
第七章 系统可靠性计算与计算机程序	(400)
7.1 概述	(400)
7.2 用于系统可靠性计算的计算机程序	(402)
7.3 计算系统可靠性和MTBF的Relcomp 计算机程序	(412)
7.4 应用状态转移链法分析系统可靠性的计算机程序 MRCF-LI	(431)
7.5 复杂系统可靠性计算及计算机程序	(443)
7.6 大型网络系统最小路的计算机算法	(459)
参考文献	(465)
第八章 可靠性增长模型与增长评估及其计算机程序	(467)
8.1 概述	(467)
8.2 耿贝尔增长模型和计算机程序	(468)
8.3 可靠性增长评估及计算机程序	(475)
参考文献	(500)
第九章 故障诊断与计算机程序	(501)
9.1 概述	(501)
9.2 计算机的故障诊断法	(504)
9.3 系统故障诊断的数学模型	(516)
9.4 系统故障诊断程序	(520)
参考文献	(524)
第十章 可靠性综合评估与计算机程序	(525)
10.1 概述	(525)
10.2 CMSR可靠性评估法与计算程序	(527)
10.3 贝叶斯可靠性评估与计算程序	(544)
10.4 正态及对数正态分布单边可靠性评估	(581)
参考文献	(585)
附录 成败型可靠性数表	(587)

第一章 可靠性和计算机基本知识简介

1.1 可靠性基本概念及特征量

什么是可靠性？

人们对可靠性并不陌生，在长期的生产活动中，早已应用可靠性概念了。人们历来都关心如何做出故障少而不易损坏的劳动工具，也关心使用工具时发生故障后能尽快修好。在日常生活中也一样，例如，手表是一种系统，我们除关注它的款式、走时准确、防水、防磁、防震性能之外，也关心它的使用寿命以及发生故障后修理的难易程度。

但是，作为一门学问来研究可靠性问题是从第二次世界大战开始的，即从40年代由于处理战场上电子产品所面临的问题而开展起来的。60年代，因空间科学和宇航技术的发展，可靠性研究水平得到了进一步的提高。这样，可靠性技术经过三四十年的发展，如今已经成为一门完整的、综合性很强的应用学科。在可靠性工程中有了一整套的较为严格的方法，在一些先进的工业国做到了规范化，我国亦在努力实现规范化。

可靠性的经典定义是：“系统在规定的条件下，在规定的时间内，完成规定功能的能力。”

用概率定量地描述系统的可靠性就是可靠度。可靠度定义为：“系统在规定的条件下，在规定的时间内，完成规定功能的概率。”这样，将含糊不清的可靠性，用技术上统一的明确的尺度——概率来定义可靠度后，部件或系统的可靠度就一目了然

了，部件和系统可靠性程度的设计、分配、预计、评估等就有了基础。

可靠度定义中强调 4 个方面，即条件、时间、功能和概率。现在分别说明如下。

1) 规定条件：除了设备或系统使用的温度、湿度、气压、冲击、振动、应力等环境条件以外，其使用方法，维修保养情况对系统或部件的可靠性都有直接的影响。因此必须详细地明确地规定清楚条件，可靠度的概念才是明确的。

2) 规定时间：可以理解为技术文件中所要求的执行任务时间，或者可以给出的相当于时间的指标，如开关的动作次数，疲劳循环次数等。对时间的规定，因对象不同而有所不同，有的要求使用几十年仍能保持功能；有的只要求保证一次动作，只要求在极短时间内发挥作用；有的要求在存放状态下长期性能不下降。

3) 规定功能：实际上就是在产品技术文件中对元件、部件、分系统和系统严格规定的技术性能。对导弹来说其功能是准确击中目标；对船舶动力装置来说其基本功能是为船舶航行提供规定的功率；对电视机来说其功能是提供清晰的图像和声音。

元件、部件和系统丧失功能就是故障，但有时故障的定义很难下。如导弹中途爆炸、轮船开不动、电视机的显像管损坏，这些当然算作故障，而电视机画面稍有失真，不影响观看，对基本功能影响不大，也许可以不算故障。这就关系到生产单位和使用单位共同协商确定失效标准的问题。

4) 概率：可靠性工程中，所研究的是大量的随机现象。例如由于生产过程中原材料的质量、成分的不稳定，元部件加工程度的偏差，生产工艺的波动，操作人员的操作水平的差异，部件或系统所处环境条件的变化等许多随机因素的影响，使部件或系统的性能特征参数成为随机变量。例如发生突然故障的时间和部

件或系统发生故障后的修复性维修时间均是随机变量。但当大量的同类产品或系统在相同的环境条件和使用条件下运行时，却呈现出它的统计规律性，因此可靠度必须用概率来描述。

根据环境条件和使用条件情况，可靠性可分为以下几类。

1) 固有可靠性：指系统在设计、制造时内在的可靠性。包括原材料质量、电路设计技术水平、机械结构和制造工艺等因素的影响。是 $t=0$ 时的可靠性。

2) 使用可靠性：它是指使用维护人员对系统可靠性的影响。包括使用人员操作技术水平，维护人员的技术水平以及各种人为因素等。

3) 贮存可靠性：设备或系统虽然没有使用，处于存放状态，但是其性能却要随着保持时间的增加呈各种规律而下降。如导弹等武器是长期贮存一次使用的系统，所以贮存可靠性对它来说是重要的指标。

4) 环境适应性：它是指系统所处的环境条件对于系统可靠性的影响。环境包括：温度、湿度、振动、冲击、运输、盐雾、霉菌、辐射等。设备和系统在不同的环境下使用，其可靠性亦会不同。

任务可靠性是任务成功的概率，当要考虑人力维修要求时，提出了基本可靠性。

在实际情况中，系统所包括的范围很广泛，其使用的场合亦不同，所以希望有不同的特征量来描述它的可靠性。例如对于一次使用的导弹或战术武器中的设备，人们关心的是一定时间的可靠度；对于计算机、通信设备、电视机这类设备，人们关心的是它的平均寿命或平均无故障时间；对于可以维修的电子设备如卫星跟踪地面设备，人们还关心它的有效度和维修度；最后对于电子设备中所用到的电子元器件，人们关心的则是失效率。

为了下面讨论的方便，现介绍几个经常遇到的可靠性数量特

征。

(1) 寿命分布函数及寿命分布密度函数

我们经常可以碰到某类产品的一批数据 N ，按组距 Δt_i 分组后，落入第 i 组的数目 v_i 称为频数。将频数除以数据总数 N ，称为频率，用下式表示

$$S_i = \frac{v_i}{N}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-1)$$

则密度为

$$f_i = \frac{S_i}{\Delta t_i} = \frac{v_i}{N \cdot \Delta t_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-2)$$

其累积频率为

$$F_i = \sum_{l=1}^i f_l \cdot \Delta t_l, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-3)$$

根据这些数据画出密度 $f_i \sim t$ 的关系折线就是频率直方图。画出累积频率 $F_i \sim t$ 关系折线就是累积频率直方图。当 $N \rightarrow \infty$, $\Delta t \rightarrow 0$ ，直方图的折线就成了光滑的曲线，频率直方图就成了寿命的概率分布密度函数，累积频率直方图就成了寿命的分布函数。

通常用概率论的观点讨论寿命分布问题。产品(系统或部件)的首次故障时间，即寿命 τ 是一个非负的随机变量，它的概率分布函数是

$$P(\tau \leq t) = F(t), \quad t \geq 0 \quad (1-4)$$

它是寿命 τ 不超过规定时间 t 的概率，即产品在规定时间 t 以前

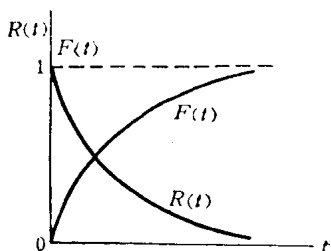


图 1-1 寿命分布函数，可靠度函数与时间的关系曲线

发生故障的概率，是 t 的函数，如图 1-1 所示。

$F(t)$ 是连续的单调上升函数，当 $t=0$ 时， $F(0)=0$ ，当 $t=\infty$ 时 $F(t)\rightarrow 1$ 。

寿命分布函数 $F(t)$ 有时也称为不可靠度，则可靠度是

$$R(t) = 1 - F(t) = P\{\tau > t\} \quad (1-5)$$

$R(t)$ 又称为可靠度函数，它是产品在规定时间 t 以前不发生故障的概率。 $R(t)$ 是连续的单调下降函数，当 $t=0$ 时 $R(0)=1$ ，当 $t=\infty$ 时 $R(\infty)\rightarrow 0$ 。

若 $F(t)$ 连续且可微，称寿命分布函数 $F(t)$ 的导数 $f(t)$ 为系统寿命分布密度函数。

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t) \quad (1-6)$$

显然寿命分布函数与密度函数之间存在关系

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1-7)$$

系统寿命分布密度函数，如图 1-2 所示。 $f(t)dt$ 则表示在时间 t 到 $t+dt$ 内发生故障的概率，即图 1-2 阴影部分面积。

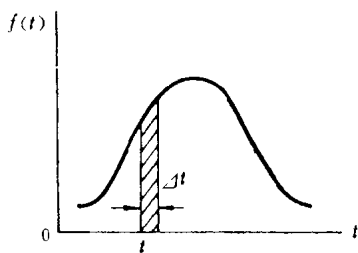


图 1-2 系统寿命分布密度函数与时间的关系曲线

由积分公式 (1-7) 看出，

对于给定的时刻 t ，系统的寿命分布函数 $F(t)$ 就是密度函数 $f(t)$ 这一曲线在 $0 \sim t$ 之间的积分，而可靠度是

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1-8)$$

它就是曲线 $f(t)$ 在 $t \sim \infty$ 之间的积分。所以可靠度函数与时间的关系如图 1-3 所示。

(2) 失效率

让一批 $N(0)$ 个相同的产品同时独立工作, 记 $N(t)$ 是在 t 时刻还在正常工作的数目, 那么在 t 到 $t + \Delta t$ 内发生失效的数目是 $N(t) - N(t + \Delta t)$, 在 t 时刻的失效率为

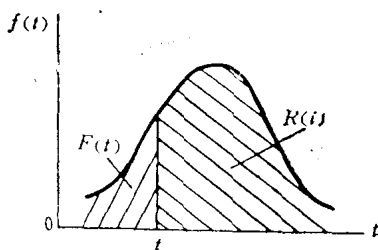


图 1-3 可靠度函数与时间的关系曲线

$$\lambda(t) \approx \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (1-9)$$

就是说, 在产品已经工作到 t 时刻的条件下, 产品在 t 以后的单位时间内发生失效的产品数目, 相对于 t 时刻还在正常工作的产品数目的百分比, 称为产品在该时刻的瞬时失效率 $\lambda(t)$ 。简称为失效率。

通常用每小时或每千小时的百分比来作为失效率的单位。对具有高可靠度的产品来说, 还需要用更小的单位来作为失效率的基准。现在用菲特作基准单位。

$$1 \text{ 菲特 (Fit)} = 1 \times 10^{-9} / \text{h}$$

失效有下面严格的概率解释。失效率 $\lambda(t)$ 是产品在时刻 t 以前没有发生失效的条件下, 在时刻 t 发生失效的条件概率密度,

$$\begin{aligned} \lambda(t) dt &= P\{t < \tau \leq t + dt / \tau > t\} \\ &= \frac{P\{t < \tau \leq t + dt, \tau > t\}}{P\{\tau > t\}} \\ &= \frac{P\{t < \tau \leq t + dt\}}{P\{\tau > t\}} \end{aligned}$$