系统可靠性工程基础

梅启智　廖炯生　孙惠中　编著

科学出版社

系统可靠性工程基础

梅启智　廖炯生　孙惠中　编著

科学出版社

1992

（京）新登字 092 号

内 容 简 介

本书为系统可靠性工程专著，共十六章．前五章在首先介绍可靠性特征量及常用概率分布的基础上，依次介绍了不可修系统的可靠性框图分析法，可修系统的马尔可夫过程分析法，失效模式和效应分析法(FMEA)．接着七章介绍了故障树分析法(FTA)及事件树分析法．FTA 是本书的重点，在论述上既着重于 FTA 的基本步骤和实际应用，又反映了国内外 FTA 技术的新进展．最后三章分别对可靠度预计和分配、冗余最优化以及系统可靠性评估作了专章论述．

本书不仅适合于系统设计人员和工程技术人员学习和使用，对可靠性专业人员和大学教师、研究生深入研究 FTA 也有参考价值．

系统可靠性工程基础

梅启智　廖炯生　孙惠中　编著

责任编辑　唐友群

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行　　各地新华书店经售

*

1987 年 2 月第 一 版　开本：850×1168　1/32

1992 年 12 月第二次印刷　印张：18　7/8

印数：4 101—5 600　字数：499 000

ISBN 7-03-003207-1/TB·102

定价：14.20 元

前　言

系统工程要求从系统的整体性、关联性、综合性和实践性出发，通过建立数学模型，应用电子计算机定量分析，达到最优化(或满意性)的效果. 系统可靠性正是最优化效果的一个重要方面. 所以，在系统可靠性研究中，系统观念、数学方法、计算机工具同样是其三大要素，缺一不可.

现代化系统的结构日趋复杂，功能日臻完善，对可靠性的要求越来越高，因而达到高可靠性的难度也大大增加了. 所以系统可靠性分析、设计和保障措施，在从航天飞机到电视机等各类工程实践中，都是不容忽视的重要问题.

构成系统的基本单元是电子元器件和机械零件，所以元器件可靠性是系统可靠性的基础. 另一方面，人们在工程实践中也逐步认识到，选用最可靠的元件，不一定就能组装出最可靠的系统. 相反，只要设计、组装、使用得当，用低可靠元件组成高可靠系统也是可能的. 如何做到"得当"，便是系统可靠性工程的研究任务.

系统可靠性分析，是正确进行系统可靠性设计的前提. 系统可靠性设计，是在现有元器件、原材料和工艺水平的基础上，从系统的总体设计，技术经济指标和可靠性指标的综合论证与分配入手，通过元器件和原材料的选用和改进，电路和结构的稳定性，工艺的可实现性，以及可维修性等各个方面，采取综合措施，以实现既定的可靠性目标. 在产品设计阶段，根据元器件失效率数据和以往的经验，进行可靠性预计和分配. 样机和产品制作出来后，进行可靠性试验和故障分析，作出可靠性评估，保证产品研制生产全过程中可靠性持续增长. 这就是系统可靠性工作的基本程序.

在我国，进入八十年代以来，全面质量管理迅速推广，电子元

器件可靠性试验普遍展开，系统可靠性工作也迅速发展，例如故障模式和效应分析法（FMEA）和故障树分析法（FTA）已经开始在电子、核能、宇航、电力、铁道、轻工等部门得到应用。广大的工程技术人员，包括设备和系统设计人员对可靠性的认识日益提高。许多中高级科技人员迫切要求补学有关可靠性知识。

为了适应可靠性工作发展的需要，并考虑到国内已经出版的可靠性书籍中，专门论述系统可靠性的较少，本书致力于在系统可靠性工程方面提供一个较为全面较为系统的基础。全书以系统可靠性分析方法为主体，以故障树分析法为重点。对于系统可靠性设计的一些主要方法和步骤，包括可靠度预计和分配、系统可靠性综合评估、冗余系统最优化等内容，也都作了详细的论述。

本书共十六章。在介绍可靠性特征量及常用概率分布的基础上，对不可修系统的可靠性框图分析法、可修系统的马尔可夫过程分析法，故障模式与效应分析法，故障树分析法，以及事件树分析法等，依次进行论述。在故障树分析法方面，写了概论、单调关联系统 FTA、模块分解和早期不交化、非单调关联系统 FTA、多状态 FTA、统计相依事件分析、计算机辅助 FTA 等七章。在内容上既着重于 FTA 的基本步骤和实际应用，又力图反映出国内外 FTA 技术的最新进展。

应当说明的是，可靠性理论的一些新的进展往往不够成熟，特别是在严格的数学处理方面不够成熟，例如两状态单调关联系统和统计独立事件比较容易处理，而实际系统往往是多状态的；系统中具有反馈，因而是非单调关联的；实际事件通常是统计相依的；还存在着多模失效、共模失效、共因失效等。在工程实践中迫切要求考虑（即使是近似地考虑）这些实际问题。所以本书从工程应用的角度对这些问题作了介绍。

在可靠性试验结果统计分析方面，国内已有专著出版，本书不予赘述。

本书主要对象是工程技术人员。也可供科研人员，高等院校教师、研究生和大学生参考。书末附录一“数学基础”和附录二“失

效率数据”可供读者查阅.

本书第一、十四章和附录二由中国科学院孙惠中执笔；第二、四—七、十二、十三章和附录一由清华大学梅启智执笔；第八—十、十五、十六章由航天工业部廖炯生执笔；第三章和第十一章由梅启智、廖炯生共同执笔.

在编写过程中，曹晋华、程侃、郝效敏、张勤、孙大奇、谢钢、朱晓波等同志曾提供宝贵意见及资料，我们对此表示衷心的感谢.

限于水平，书中难免还有缺点错误，热诚希望广大读者批评指正.

编著者

1984 年 2 月

目　录

第一章　可靠性特征量及常用的概率分布

1.1　可靠性的统计意义和可靠度函数

可靠性是对产品(包括系统、整机、元器件)无故障工作能力的量度.

关于可靠性人们有各种各样的理解，一般是指产品在规定的工作条件下,在规定的时间内,完成规定功能的能力. 所以可靠性的高低，与产品所处的工作环境和规定的工作时间有着密切的关系. 所处的工作环境愈恶劣,所规定的工作时间愈长,对于同类产品来讲,其可靠性就愈低. 所处的工作环境愈优越,所规定的工作时间愈短,对于同类产品来讲,其可靠性就愈高.

产品可靠性的量度称为可靠度. 可靠度的定义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. 也可以理解为产品在规定的工作条件下和规定的时间内，正常工作的产品占产品总数的百分比. 所以可靠度只具有统计意义.

可靠度不能准确预计一个产品工作多少小时后失效，但它可以用来预计一批产品的平均工作寿命是多少小时，或故障间的平均工作时间是多少小时.

那么如何来观测和描述产品的可靠度呢? 首先,我们取 N_0 个具有相同性质的产品,分别使它们连续地工作，直到失效为止，测出它们各自的工作时间.由于在实际情况下,元器件从开始工作到失效所经历的时间，往往在数千小时以上，实际做起来存在一定困难. 因此我们这里所做的试验是假想试验. 我们把工作时间按 Δt 为一段分成 $t_1, t_2, \cdots, t_n (t_1 < t_2 < \cdots < t_n)$ 时刻，如图 1.1 所示. 图中的纵坐标是每个单位时间 Δt 内失效的产品数. 如在 i 段,就是从时刻 t_{i-1} 到 t_i 为止,这一时间间隔内失效的产品数为

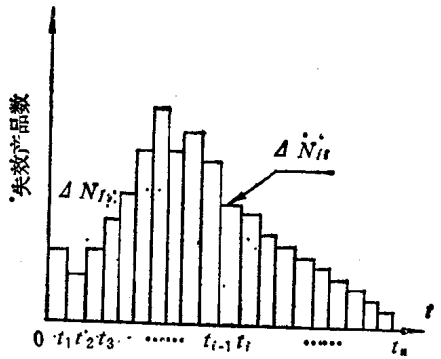

图 1.1　失效产品的频数直方图

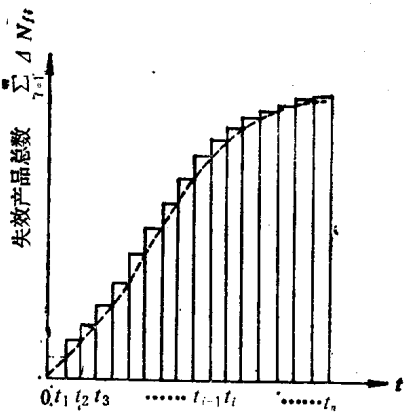

图 1.2　失效产品累计频数直方图

ΔN_{fi}。由于全部产品为 N_0 个，在 (t_{i-1}, t_i) 这一时间间隔内，产品发生失效的概率显然是 $\Delta N_{fi}/N_0$。我们取某一时刻 t_m，那么在 t_m 之前的累计失效产品总数 N_{fm} 由下列公式求出：

$$N_{fm} = \sum_{i=1}^{m} \Delta N_{fi} \tag{1.1}$$

上式用坐标表示如图 1.2，因此在 t_m 时间内发生失效的概率 F_m 由下式给出：

$$F_m = \frac{N_{fm}}{N_0} = \frac{\sum_{i=1} \Delta N_{fi}}{N_0} \tag{1.2}$$

当我们所取的试验时间段数愈来愈多，而单位时间间隔愈来愈小时，亦即 $n \to \infty$，$\Delta t \to 0$ 时，则图 1.2 中的折线就趋向于虚线. 此时，t 时间内失效产品数趋向于 $N_f(t)$，失效概率趋近于 $F(t)$.

根据公式 (1.2) 得

$$F(t) = \frac{N_f(t)}{N_0} = \int_0^t \frac{1}{N_0} dN_f(t)$$

$$= \int_0^t \frac{1}{N_0} \frac{dN_f(t)}{dt} dt \tag{1.3}$$

若设

$$f(t) = \frac{1}{N_0} \frac{dN_f(t)}{dt} \tag{1.4}$$

则

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \tag{1.5}$$

公式 (1.4) 中的 $f(t)$ 是以 t 为随机变量的概率密度函数，亦称作失效密度函数. 而公式 (1.5) 中的 $F(t)$ 是其概率分布函数，称为累积失效分布函数，通常称为不可靠度函数. 它具有下式所示的特征：

$$F(\infty) = \int_0^\infty f(t)dt = 1 \tag{1.6}$$

若与 t 时间内的失效产品数 $N_f(t)$ 相对应，设在 t 时间内残存的未失效产品数为 $N_s(t)$，则可靠度函数 $R(t)$ 可定义为

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0} \tag{1.7}$$

可靠度函数有时又称为“残存概率”.

$$N_s(t) + N_f(t) = N_0 \tag{1.8}$$

根据式 (1.7)、(1.8) 可得

$$R(t) = 1 - \frac{N_f(t)}{N_0} \tag{1.9}$$

根据公式 (1.3)、(1.9) 可得

$$R(t) + F(t) = 1 \tag{1.10}$$

根据公式 (1.5)、(1.6)、(1.10) 可得

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^\infty f(t)dt \tag{1.11}$$

同样也可以把 $f(t)$ 表示为

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \tag{1.12}$$

$R(t)$、$F(t)$ 和 $f(t)$ 三者的关系如图 1.3 所示。

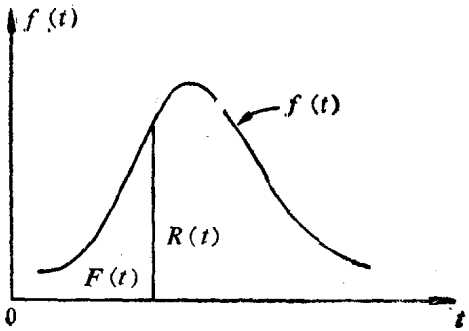

图 1.3 $R(t)$、$F(t)$ 和 $f(t)$ 的关系图

1.2 失 效 率

在评价产品可靠性时，特别是在评价元器件可靠性时，失效率是一个重要的特征量. 它表示在某一时刻 t 的单位时间内发生失效的概率，用下式定义：

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_s(t)} \frac{dN_f(t)}{dt} \tag{1.13}$$

式中 $dN_f(t)$ 表示当 $\Delta t \to 0$ 时，在时间区间 $(t, t + \Delta t)$ 内的失效产品数，$N_s(t)$ 表示直到 t 时刻为止未失效的残存产品数. 所以

$dN_f(t)/N_s(t)$ 表示在区间 $(t, t+\Delta t)$ 内 $\Delta t \to 0$ 时产品失效的概率. 在式 (1.13) 中把 $dN_f(t)/N_s(t)$ 再除以 dt, 即表示在单位时间内产品发生失效的概率. 由于 $\Delta t \to 0$ 所以 $\lambda(t)$ 实际上为 t 时刻的瞬时失效率.

这个失效率通常用 (1/小时) 为单位来表示. 对于失效率非常低的情况, 则用 (10^{-9}/小时) 为单位, 这时失效率的单位叫做菲特 (fit). 一般电子元器件的失效率常以菲特为单位.

若对公式 (1.9) 进行微分并代入式 (1.13) 就得

$$\lambda(t) = -\frac{N_0}{N_s(t)}\frac{dR(t)}{dt} \tag{1.14}$$

若再将公式 (1.7) 代入可得

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)}\frac{dR(t)}{dt} \tag{1.15}$$

由于 $t = 0$ 时所有产品都是完好的, 所以 $R(0) = 1$. 对公式 (1.15) 进行积分则得

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = \ln R(t)$$

经变换后可得

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \tag{1.16}$$

根据此式就能确定失效率与可靠度的关系, 特别当 $\lambda(t) = \lambda$ (常数)时, 公式 (1.16) 可写成

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{1.17}$$

这时我们说产品的可靠度是按指数分布的. 根据式 (1.12)、(1.15) 又可将失效率表示为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{1.18}$$

1.3 产品的寿命特征

前面已经介绍, 在失效产品频数的直方图中, 到 t_{i-1} 时刻尚在工作, 而到 t_i 时刻为止累计失效的产品数为 ΔN_{fi}. 现在设这

ΔN_{fi} 个产品，都工作到 t_i. 这样一来，图 1.1 的直方图就变成为图 1.4 的形式. 图中表示工作到 t_1 时，失效的产品是 ΔN_{f1}；工作到 t_2 时，失效的产品为 ΔN_{f2}；工作到 t_n 时，失效的产品为 ΔN_{fn}. 因此，所有产品的持续工作时间就是 $\sum_{i=1}^{n} t_i \Delta N_{fi}$，而一批产品的平均工作时间 $E(t)$ 就可用下式表示：

$$E(t) = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{n} t_i \Delta N_{fi} = \sum_{i=1}^{n} t_i \frac{\Delta N_{fi}}{N_0} \tag{1.19}$$

产品总数 N_0 可以用 $N_0 = \sum_{i=1}^{n} \Delta N_{fi}$ 来表示. 在这里，当 $n \to \infty$，而 $\Delta t \to 0$ 时，$\Delta N_{fi}/N_0$ 根据式 (1.4) 可得

$$\frac{\Delta N_{fi}}{N_0} \to \frac{1}{N_0} \frac{dN_f(t)}{dt} dt = f(t)dt$$

公式 (1.19) 就变为

$$E(t) = \int_0^\infty t f(t) dt \tag{1.20}$$

我们把公式 (1.19) 和 (1.20) 中的 $E(t)$ 记作 m. 这个特征量统称为平均寿命. 对于不可维修产品，是指故障以前的平均工作时间 MTTF (mean time to failure). 对于可维修产品是指两次故障之间的平均时间 MTBF (mean time between failure)，有时又称为平均无故障工作时间. 统称为平均寿命. 它就是产品寿命的数学期望值.

我们来研究如何由可靠度函数求失效前平均时间 (MTTF). 首先由式 (1.20) 得

$$\begin{aligned} m &= \int_0^\infty t \left[-\frac{dR(t)}{dt} \right] dt \\ &= -[tR(t)]_0^\infty + \int_0^\infty R(t) dt \end{aligned} \tag{1.21}$$

这里的 $tR(t)$，当 $t = 0$ 时，因为 $R(0) \equiv 1$，所以 $tR(t) = 0$. 当 $t \to \infty$ 时，$R(t)$ 以比 t 更快的指数速率趋向于 0，故 $tR(t) \to 0$ 因