系统可靠性设计理论与方法

黄锡滋

电子报编辑部
四川电子学会可靠性分会

系统可靠性设计理论与方法

黄锡滋

一九八三年十一月

封面设计：袁晓义

对　　校：赵　勇
聂建均
胡朝卿

系统可靠性设计理论与方法

（内部资料）

著　　者：黄锡滋

出　　版：《电子报》编辑部
四川省电子学会可靠性分会

发　　行：《电子报》社
（成都市杜甫草堂南侧）

序

开展产品的可靠性设计，是我国当前发展尖端技术，研制、生产军用装备和民用机电产品中急待解决的重要课题。高等理工科院校的毕业生、研究生是我国的后备工程力量。可靠性设计是重要的必备知识。编写一本适合他们水平，有利于今后工作的教材，供成电高年级学生、研究生选修用，这是我着手起草本书的最初动机。适逢四川电子学会交与我在电子系统科技人员中推广可靠性设计技术的任务。根据工厂、科研单位技术人员的要求，本教材应能反映可靠性设计的全貌，紧密联系工程实际，成为指导产品可靠性设计的工具。以上这些就是我编写此书的基本指导思想。

本书内容主要取材于国外的各种工程设计标准、手册和学术刊物。此外还参考了国内现有的可靠性译著和专著，主要参考书目已附于书后。

今年五月，此讲义在四川举办的有十省市学员参加的学习班讲授后，省电子学会要求将讲稿尽快付印，只好匆匆交稿，至于本书是否能体现上述设想，只有由读者来检验了。

黄锡滋

一九八三年九月

四川省可靠性学术专业委员会

名誉主任委员：　敖硕昌

主任委员：　庞天柱

副主任委员：　黄锡滋　张伟祖
龚松澜　刘昌善
余复信　扬衍源

委　　员：　黄宽敏　夏秀章
姚居济　陈锡金
扬德明　董幼华
李秀毓　王正元
朱家清　代明松
徐国威　李淑萍
罗　洪　顾爱德
刘登明

学术秘书：　赵　勇　聂建均

目　录

第一章　绪　论

第二章　可靠性的基本概念和数字特征

第三章　可靠性模型的建立

第四章　无维修系统可靠性特征

第五章　可靠性分配

第六章　环境与可靠性设计

第七章　元件与可靠性设计

第八章　系统可靠性快速预计法

第九章　失效模式效应分析法与参量变化分析法

第十章　整机的可靠性鉴定与验收试验（指数分布）

第一章 绪 论

第一节 可靠性发展概况

二次世界大战后的30年，科学技术有了飞跃的发展，各种性能先进、结构复杂的新型技术装备不断涌现。但设备发生故障的可能性及其后果的严重性也随之增大，因此可靠性的问题日益引起人们的严肃关注。1950年，美国国防部汇集了各方面的专家，成立了电子设备可靠性顾问委员会，专门研究电子设备的可靠性问题。1957年正式发表了研究报告，标志着可靠性学科的正式诞生。这门学科是由数学、物理、管理科学和一些工程技术相结合产生的边缘学科，它致力于研究提高产品可靠性的理论和方法。经过20多年的发展，现已形成了完整的体系，并贯穿于有可靠性要求的系统发展的全过程。在应用中还吸收了现代管理科学“系统工程”的一些方法，故又名“可靠性工程”。现在它早已越出了传统的研究电子设备的领域，成为发展尖端技术装备和军用装备的重要工具。可靠性工程的理论和方法，尤其为各发达国家军事当局所关注。现在，每发展一项新的军用装备，都提出了可靠性指标和要求，并进行深入的可靠性分析、论证、设计和严格的可靠性验收。同时可靠性的理论方法也日益广泛地为其它国民经济部门所采用。

早在60年代中期，我国已经有少数研究部门开始了可靠性的研究工作。工作侧重于电子元器件的可靠性试验方面。十年动乱使这株幼苗受到了严重摧残。粉碎四人邦后，在建设四个现代化的社会主义强国的号召推动下，可靠性的研究和应用得到了迅速的恢复和发展。我国远程火箭试验的成功，不但是火箭、电子和自动控制等技术的巨大成果，同时也是我国可靠性工程的一项巨大成果。但是和国外发展水平以及我国四个现代化的要求相比较，差距还是很大的。例如，元器件的可靠性水平不高，系统可靠性的理论和方法尚未完整地应用，尤其是可靠性设计更急待开展。此外，国内科技、工程界相当多的人对这门学科仍很陌生。这些都说明了传播可靠性知识的重要性。这本书，按照四川省电子学会的要求，将较为详细地阐述系统可靠性设计的理论和方法。主要以从事产品设计和试制的中级工程技术人员为对象。也可供高等院校的学生和教师参考。

第二节 系统可靠性设计的组织和实施

产品的可靠性涉及设计、制造、使用和维护的全过程，并和管理工作、人员因素和环境状况密切相关。因此提高产品可靠性需要采用综合性措施。但是，毫无疑问，设计

对产品的可靠性具有举足轻重的重大影响，它决定了产品的固有可靠性。设计中的缺陷往往是一些重大的难以避免的事故的潜在根源。表 1—1 和表 1—2 是美国海军电子试验室和美国贝尔电话实验室关于设备故障原因的统计资料。可以看出，设计不良是导致产品可靠性不高的最主要因素。

表1—1　　设备故障原因分类

（美国海军电子试验室统计）

故障原因	占总失效数的百分比(%)
设计	40
元器件质量	30
操作和维护	20
制造工艺	10

表1—2　　故障原因分类

（美国贝尔电话实验室统计）

故障原因	占总失效数的百分比(%)
设计	43
元器件质量	7
操作和维护	30
制造工艺	20

由此可见，开展产品的可靠性设计，做到防患于未然，具有十分重要的意义。

可靠性设计是指在常规工程设计过程中，运用可靠性工程所提供的理论和方法，使设计方案在满足性能技术指标的同时，也满足预定的可靠性指标的要求。它既是常规工程设计的一个重要组成部份，在理论和方法上又自成体系。

我们先来分析系统研制的全过程。在一些发达国家，这个过程是由正式文件予以规定的。例如美国空军规范375—1，将整个过程分为准备、方案拟定、研制生产及使用四个阶段。美国国家宇航局 NHB—7121—2，将整个过程分为预备分析、方案拟定、设计和研制使用四个阶段。这些文件还详细地规定了各个阶段的工作内容。系统研制的全过程在我国尚无正式文件予以规定，但各研究机构在长期的实践中，已形成了一套自己惯用的研制程序。尽管这些研究程序各有其特殊性，但基本上大同小异，并可大体分为预备阶段、方案论证阶段、结构及电路设计阶段、制造调试阶段、使用阶段等五部份。图1—1是某个卫星地面站的研制过程。

可靠性工作应贯穿于上述系统研制的全过程。各阶段可靠性工作的主要内容示于表1—3。

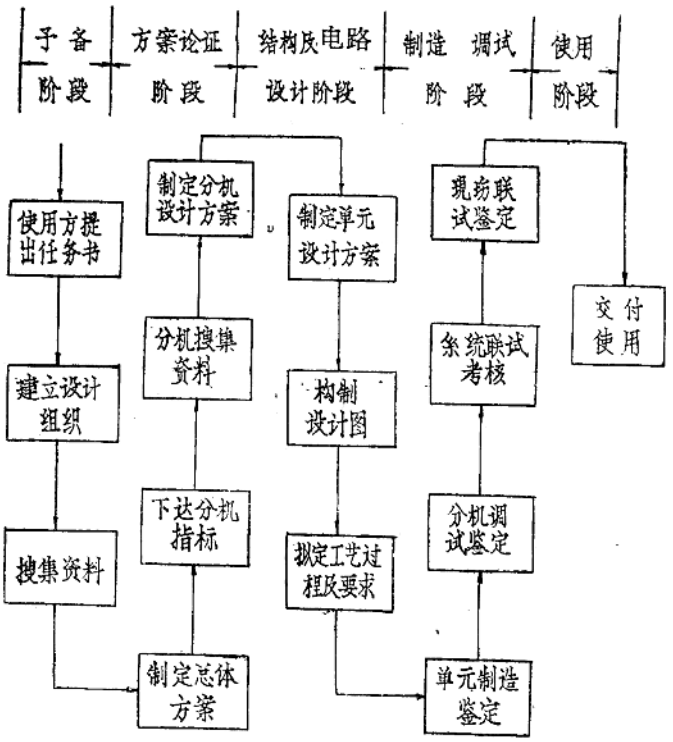

图1—1 系统研制程序

表1—3　　系统设计各阶段可靠性工作的内容

系统研制过程	预备阶段	方案论证阶段	结构及电路设计阶段	制造调整阶段	使用阶段
可靠性工作	可靠性设计的准备工作包括：调查研究、提出合理的可靠性指标、设置可靠性工作机构或人员。	可靠性设计的定性分析包括：可靠性分配、FMECA分析、可靠性快速预计。	可靠性设计的定量分析包括：RBD分析、FTA分析、环境设计技术、参漂设计、元件应力分析。储备技术。	生产和制造过程中的质量控制、可靠性增长试验。	可靠性验收试验、设备的维修、现场使用数据的收集反馈。

本书将着重介绍可靠性设计阶段所应用到的各种可靠性理论和方法。对整机的可靠性验收，将在本书最后一章适当地加以介绍。

第二章　可靠性的基本概念和数字特征

第一节　可靠性的基本概念

一、可靠性的定义

产品的可靠性是指“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”。

首先，产品的可靠性是与规定的条件分不开的。这里所说的“规定条件”包括使用时的应力条件、环境条件和储存时的储存条件等。规定的条件不同，产品的可靠性是不同的。

其次，产品的可靠性是与规定的时间密切相关的。显然，规定的时间越长，失效的可能性越大。

产品的可靠性还与规定的功能有密切关系，产品的功能又是由若干技术指标来表示的。通常所说的完成规定的功能，是指这些指标的全体。如果某些次要的指标可以不予考虑，在发展一个有可靠性要求的产品时必须明确加以说明。

这里给出的定义只是一个可靠性的定性概念。可靠性还要用可靠度等许多数字特征来定量描述。它们的准确定义将在下节谈到。

二、产品的效能

产品的效能、技术功能、可靠性……等是一些相互联系的、既有区别又容易混淆的概念。我们所指产品的效能，是指产品能力的总和。产品的技术功能、可靠性、产品操作适应性、以及操作人员的能力等，都从不同角度对产品总的能力作出贡献，其关系见图2——1产品效能的关系框图。

三、可靠性和安全性的关系

人们在建设工厂，尤其是建设核电站、宇宙飞船、飞机、舰船和高温高压设备时，都会遇到安全性的问题。它与可靠性既有区别又有联系。二者不同之处在于：安全性侧重研究产品发生故障对人、环境与社会的危害；可靠性侧重研究产品是否能完成其预定的功能。因此，有的从可靠性角度判断为故障的事件并不影响安全性（即失效安全状态）。然而，不安全的状态必须认为是不可靠的。这是从事可靠性设计时必须考虑到

的。

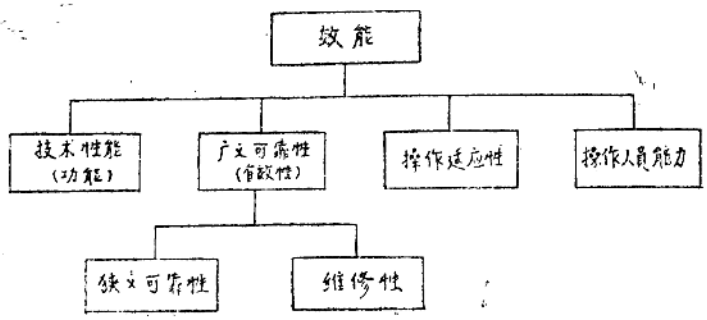

图 2—1　产品效能的关系框图

但是研究系统可靠性和安全性的方法，除了安全性的风险评价外，都是相同的，因此在许多场合往往将可靠性和安全性相提并论。

四、失效分析

失效分析是指对失效的元件进行分析，并找出原因和提出改进措施。这是一种提高产品可靠性的重要方法。可靠性研究发展初期，失效分析仅限于对失效的外部表现形式加以分类讨论。然而元件的任何一种失效，实质上都是一些内在的物理和化学反应过程的结果。为了深入研究，从六十年代起，人们采用了红外线扫描仪，红外线显微镜、扫描电镜、电子探针等现代技术装备，从物质结构的角度，探讨元器件的失效机理。迄今已发展成为可靠性学科的一个重要分支——可靠性物理。有兴趣的读者可参阅有关方面的专门资料。

第二节　可靠性数字特征

一、概　念

可靠性数字特征是用数值来表示的各种可靠性指标。常用的可靠性特征量包括可靠度、失效率、平均寿命等。对每种数字特征要注意区别下列特征值的含义。

（一）真值：这是一个客观存在的某可靠性特征的准确值，并可用相应的数学公式表示。原则上可以通过对全部产品进行寿命试验，得出产品的准确寿命分布，进而求出各个可靠性特征量的真值。然而这样做明显是不可能的，因而真值实际上是个未知量。

（二）估计值：这是根据样品的观测数据，通过一定的统计程序，对特征量真值作出的估计。估计值又可分为“点估计”和“区间估计”。

（三）观察值：这是真值在某种特定意义下的点估计值。

（四）外推值：这是根据一定试验条件下所得的特征量的估计值，按一定的外推或

内插的方法，推算在应力不同的情况下，相应的特征量所得的数值。

（五）预测值：这是根据元件（或单元）的可靠性特征值，采用某种数学模型计算得出的设备（系统）的可靠性特征值。

二、可靠度

可靠度是指产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的概率。它是时间的函数，用 R（t）来表示。

令随机变数 τ 表示产品的寿命，用

$$F(t)=P(\tau\leqslant t) \qquad (2—1)$$

表示产品的寿命分布函数（cdf，即产品在时刻 t 和 t 以前发生失效的概率），则得

$$R(t)=P(\tau>t)$$
$$=1-F(t) \qquad (2—2)$$

图2—2的实线给出了寿命分布函数的形状，虚线给出了可靠度函数的形状。从图可见可靠度的最大值为 1（或100%），它表示产品能完全可靠地工作；可靠度的最小值为 0，它表示产品完全不可靠。此外还可以看到，时间越长，产品的可靠度越低，当时间趋于无限大时，可靠度趋近于 0。它反映了任何产品在长时间使用（或贮存）后，终归会失效这一客观规律。

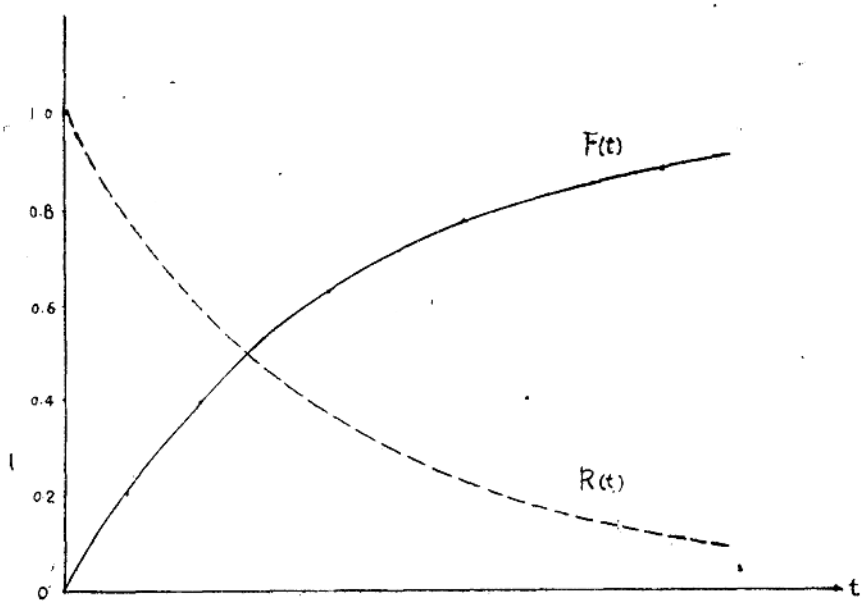

图 2—2　F(t)和R(t)示意图

从概率论可知，某个事件发生的概率可用大量试验中该事件发生的频率来估计。因此，为了估计某类产品在一定时间内的可靠度及失效概率，可以通过这类产品的大量试验来确定。例如，取N个产品进行试验，若在规定的时间内有 m（t）个失效，则

$$\left.\begin{aligned} F(t)&\approx\frac{m(t)}{N}\\ R(t)&\approx\frac{N-m(t)}{N}\end{aligned}\right\}\qquad(2—3)$$

例 1

有5000只晶体管，工作到1000小时累计失效了50只，工作到4000小时累计失效了420只。试求该产品在1000小时与4000小时的累计失效概率及可靠度。

解

工作到1000小时 $m(1000)=50$

$$\therefore\quad F(1000)=\frac{m(1000)}{N}=\frac{50}{5000}=1\%$$

$$R(1000)=\frac{N-m(1000)}{N}=\frac{5000-50}{5000}=99\%$$

工作到4000小时 $m(4000)=420$

$$\therefore\quad F(4000)=\frac{m(4000)}{N}=\frac{420}{5000}=8.4\%$$

$$R(4000)=\frac{N-m(4000)}{N}=\frac{5000-420}{5000}=91.6\%$$

三、失 效 率

失效率是指产品在 t 时刻前没有发生失效的条件下，在 t 时刻单位时间内失效的概率。它通常是时间的函数，用 $\lambda(t)$ 表示。即

$$\lambda(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{P(t+\Delta t\geqslant\tau>t\mid\tau>t)}{\Delta t}$$

$$=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{P(t+\Delta t\geqslant\tau>t)}{\Delta t\,P(\tau>t)}$$

$$=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{F(t+\Delta t)-F(t)}{\Delta t(1-F(t))}\qquad(2—4)$$

假定 $F(t)$ 是连续函数，其导函数为 $f(t)$，称为寿命分布的密度函数（pdf），则从式（2—4）得

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{1-F(t)}$$

$$=-\frac{R'(t)}{R(t)}\qquad(2—5)$$

对式（2—5）两边积分，得

$$\ln R(t)-\ln R(0)=-\int_0^t\lambda(t)dt\qquad(2—6)$$

即

$$R(t)=R(0)e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \tag{2—7}$$

如果当t=0时，F(0)=0 即R(0)=1，则从式（2—）可得

$$R(t)=e^{-\int_0^t \lambda(s)\,ds} \tag{2—8}$$

式（2—8）是联系失效率λ(t)和可靠度R(t)之间的普遍关系式。

λ(t)可以通过实验近似地求出。设参加实验的元件共有n个，用n(t)表示(0、t)内未出故障的元件数，则当Δt很小和n很大时，由式（2—5）得

$$\lambda(t)\approx\frac{R(t)-R(t+\Delta t)}{\Delta t\cdot R(t)}$$

$$\approx\left(\frac{n(t)}{n}-\frac{n(t+\Delta t)}{n}\right)\Big/\Delta t\,\frac{n(t)}{n}$$

$$\approx\frac{n(t)-n(t+\Delta t)}{\Delta t\quad n(t)} \tag{2—9}$$

换句话说，λ（t）近似地等于在(t，t+Δt)内发生故障的元件数，除以Δt及在t以前尚未出故障的元件数，即在产品已经工作到t的条件下，产品在t时刻后的单位时间内失效的产品数，相对于t时刻还在正常工作的产品数的比值。

例2

例1中如果在1200小时时测得晶体管累计失效为61只，试求该产品在t=1000小时时的失效率。

解

由于m(1200)=61　　m(1000)=50

由式(2—9)可得

$$\lambda(1000)\approx\frac{4950-4939}{(5000-50)\cdot 200}$$

$$\approx 1.11\times10^{-5}/\text{小时}$$

大量的试验及现场使用结果表明，产品的失效率与时间的关系是一个呈浴盆形状的曲线如图2—3

此曲线大致可分为三个区域。

a．早期故障区：产品在其开始使用阶段呈现很高的失效率。但这个高的失效率随着时间的延续而很快下降。失效率在T_B处达到一个稳定值。我们称从开始到T_B这一段时间为早期故障期。这个阶段失效率较高主要是由于制造工艺、材料上的缺陷、包装、运输的损坏及安装上的错误等原因所造成的。早期失效的产品可以通过出厂前的老练，使用前的筛选剔出。

b．偶然故障区：产品的失效率降低到一个稳定的水平，是设备的最佳运行期，这一时期出现的故障是与一些随机因素有关：这可以用强度——应力模型说明。强度表示的是产品抵抗外力的影响，维持正常工作的固有能力。由于工艺、材料等因素的影响，

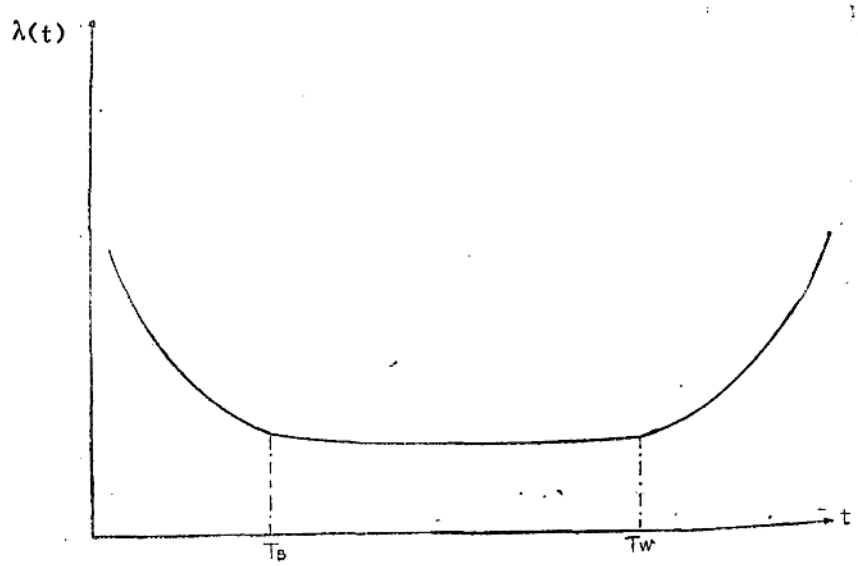

图 2—3　产品失效曲线示意图

个别产品是不同的，服从特定的分布。应力是指温度、电压、振动、压力等外部应力，也是一个随机变量。图 2—4 表示强度和应力的关系。当应力超过强度时，产品即发生失效，对应于图 2—4 中用斜线表示的区域。

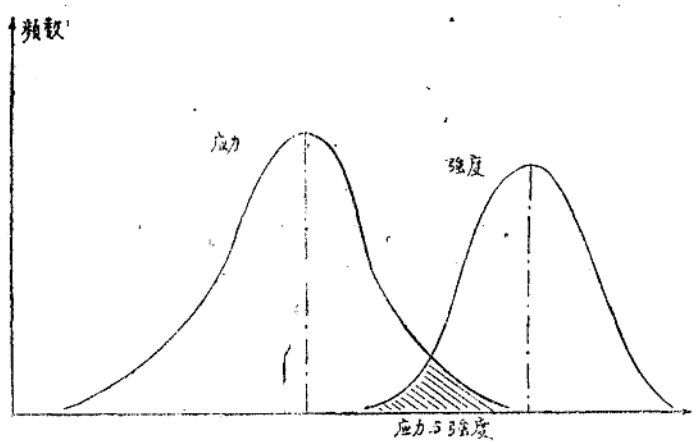

图 2—4　应力强度模型示意图

c．耗损失效区：在产品使用后期（T_w 以后）失效率随着时间的推移迅速上升，故把这一段称为耗损失效区。它是产品在长期工作后，由于外应力的作用，导至产品内部产生物理和化学变化，从而使产品出现疲劳、损耗和老化。避免耗损失效的方法是提高元器件的可靠性以推迟耗损期的到来，或者进行预防性维护和更新。

四、平均寿命

从概率论可知，产品的平均寿命就是随机变数τ的数学期望。

$$E\tau = \int_0^\infty t \, dF(t) \tag{2—10}$$

如果F(t)是连续函数，则

$$E\tau = \int_0^\infty tf(t)dt \tag{2—11}$$

由于

$$\int_0^\infty tf(t)dt$$

$$= -\int_0^\infty tR'(t)dt$$

$$= -tR(t)\Big|_c^\infty + \int_0^\infty R(t)dt$$

$$= \int_0^\infty R(t)dt \tag{2—12}$$

所以又可得

$$E\tau = \int_0^\infty R(t)dt \tag{2—13}$$

式（2—13）是用于求平均寿命的常用公式。对于一次失效产品，我们把（2—10）（2—11）（2—13）式所得结果简称为MTTF（Mean Time to Failure），对于可维修产品，我们简称为 MTBF（Mean Time between Failure），即产品的平均无故障工作时间(适用于产品发生故障修复后，仍保持原有寿命分布时)。

在实际工作中产品的平均寿命可用下面的方法求得：

假定批量很大的N个产品投入工作，我们按时间间隔Δt_i对产品进行测量。当测量进行到K次时，产品全部失效。在各次测量中发现的产品失效数分别为 n_1，n_2，……n_k，用t_j表示测试间隔的时间中值，即

$$\left.\begin{aligned} t_1 &= \frac{1}{2}\Delta t_1 \\ t_j &= \sum_{i=1}^{j-1} \Delta t_i + \frac{1}{2}\Delta t_j \\ j &= (2、3、\cdots\cdots k) \end{aligned}\right\} \tag{2—14}$$

则产品的平均寿命为

$$\overline{T} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{k} t_j \, n_j = \sum_{j=1}^{k} t_j \cdot \frac{n_j}{N}$$