## 内容简介

本书是一本介绍可靠性理论在机械设备方面应用方法与情况的书。书中论述了可靠性理论的基本概念和数学方法；用数理统计学方法分析了机械零件、设备和系统的失效原因和失效模式；介绍了对失效数据的分析方法，以及如何根据失效模式找出失效原因及其早期预报方法。

本书可供从事可靠性和质量控制，重要机械系统的设计和研制、试验，以及从事重要设备管理和维护的技术人员阅读，也可供大专院校中机械、航空、可靠性理论、系统工程等专业的教师和学生参考。

Mechanical Survival: the use of reliability data
J. H. Bompas-Smith
Edited by R. H. W. Brook
McGraw-Hill Book Company (UK) Limited
1973

*

**机械的可靠性**

——可靠性数据资料的应用

〔英〕J. H. 邦帕斯-史密斯 著
〔英〕R. H. W. 布鲁克 编
张昭华 译 顾昌耀 校

*

国防工业出版社 出版
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张 7 11/16 161千字
1981年6月第一版 1981年6月第一次印刷 印数：0,001—6,700册
统一书号：15034·2184 定价：0.81元

# 译　　序

可靠性理论是近二三十年来发展起来的一门新兴学科。首先是由于第二次世界大战期间，为了保证军用产品(尤其是电子系统和设备）的高度可靠性而受到重视。从五十年代起，一些工程技术人员和数学家们又运用概率论和数理统计学对产品的可靠性问题进行了定量研究。于是可靠性理论逐渐发展成为技术科学中一个新的分枝。

可靠性理论对现代军事、宇航、航空、电子等工业部门发展起了重要的作用。起初，可靠性理论研究主要着重于电子系统和产品的可靠性分析和设计，后来逐渐发展到研究结构、机械、机电系统以及由上述系统组成的综合系统的可靠性问题。其应用范围也从比较尖端的工业部门（军事、宇航、航空、电子、原子能发电等）扩展到一般工业部门。目前，可靠性设计和分析已成为许多工业部门中产品发展工作中不可缺少的一环。

由于机械设备的“负载”和“强度”是受许多因素影响的，而这些因素的变化以及由此而造成设备的故障和失效现象都具有随机变化的特征，也即呈概率分布现象。因而机械设备的可靠性问题长期以来得不到比较满意的解决。

为了要保证机械或设备的可靠性，一般在设计计算中，对计算的载荷，选用的强度等分别乘上各种系数(如载荷系数、尺寸系数、形状系数、强度系数等等)，在最后计算时还要考

虑安全系数。这种计算是我们对这些因素的随机变化所作的经验估计，这表示我们对这些随机变化情况无法进行精确计算，只好对设备的尺寸、重量和性能作了不精确的放大。运用概率论和数理统计学方法来分析机械设备和系统的可靠性，则使可靠性问题的解决建立在一定的理论基础上，可以得到比较精确的结果。

本书作者曾在英国罗尔斯-罗伊斯（Rolls-Royce）发动机公司从事质量控制和机械可靠性设计和分析工作。他根据自己的经验并从工程技术人员便于理解的角度，深入浅出地阐述了负载，强度和失效这三种概率分布现象，以及它们之间的密切联系；着重论述了可靠性与失效数据的分析方法，以及如何根据失效模式找出失效原因，从而得出早期预报的方法。后一部分内容在可靠性文献中论述得还很不充份，但对机械可靠性和维护技术人员却是极为重要的。此外，作者在本书中还提出了设备的失效模式同材料的基本性能有联系的概念。

在机械可靠性问题上，尽管已建立了各种数学模型可供我们对负载、强度和失效等基本物理现象以及机械的可靠性进行理论分析，然而在选用分布以及如何根据已有实验数据、材料机械性能资料、负载资料等进行分析和计算过程中，还需要技术人员能对具体问题作出正确的分析和判断。就提供这方面的经验和帮助来说，本书有其独到之处。

可靠性概念以及所用到的数学工具(概率论和统计学)和分析方法是一般工程技术人员比较生疏的。有鉴于此，作者自始至终采用从分析具体实例着手、逐渐把问题扩展到全面的方法来进行论述。这种论述方法有其容易接受和理解的优

点，但是难以对理论（特别是对某种概率分布和统计推断方法的推导条件和适用范围）有一个全面的认识。所以，如果读者能事先掌握一些有关概率论和统计学的基本知识，就能更深刻地理解本书的内容，从而能更灵活地应用各种结论和方法。

对书中排印、计算等方面的错误，译者均尽量作了改正；对某些难以理解的内容作了注解。另外，还选择了一些有关可靠性理论的书目，附在书后，供有兴趣的读者参考。

最后，限于译者的学识和水平，敬希读者对错误或不当之处提出批评和指正。

译　者

# 目　　录

# 第一章 可靠性的数值表示

在我们的语言中，长久以来就有了“可靠性”[1]这个名词，但是近年来，它的含意有了补充。它既是一个纯粹说明性质的名词，同时又可用数值加以衡量。当我们谈到一辆汽车可靠，一台设备设计、制造得可靠，或甚至于一个人可靠时。于是就会产生这样的问题：“怎样可靠？”因而在同时有几台设备时，就要求分别用数字表示它们的可靠性。特别是在宇航技术领域中，对极端可靠而且复杂的设备的需求不断增加，从而促进了可靠性计算理论的发展。主要是由于宇航工业的需要，从而使确保高度可靠性的技术在近二十年来取得了显著的进展。

作为数值表示的一个例子，我们可把可靠度定义为失效[2]率，用每1000小时的失效数或任何其它方便的单位表示，或者可定义为平均故障间隔时间，它是失效率的倒数，即

$$\frac{\text{被考虑的总时间}}{\text{在此时间内出现的失效次数}}。$$

我们将会看到，这种描述一台设备可靠性的方法，尽管简单而且方便，但有严重的局限性。

下面是用统计学方法表示有关可靠度的一般定义，能普遍适用于各种场合：

---

[1] 原文为Reliability，可作可靠性和可靠（性的量）度两种解释。在作为说明性质的名词用时译作可靠性；在作为可靠性评价尺度解释时译作可靠度——译注。

[2] 产品丧失了规定的功能称为失效。对于可修复的产品，也可用“故障”这一名词——译注。

可靠度＝一个事件（产品）在规定的工作条件下规定的时期内完满地工作的概率。

“可靠性”可以用不同的文字来表述，但含意是相同的。这是一个一般性定义，当我们考虑具体问题时，就需要做进一步的讨论。时间可以用明确的数值表示，然而“完满地工作”和“工作条件”这两个名词，却能被不同人作不同的解释。在用确切数值表示可靠性之前，必须给这些名词下一个清楚的定义。以“完满地工作”为例。如某人在每天早晨按第一下起动按钮时他的汽车发动不起来，他可能认为这辆汽车不够“完满”。然而另一个人却认为，他的汽车能在按三下或四下起动按钮后发动起来就够完满了。第三个人会因他的汽车发动机供油过多而过虑，因而他有时不得不在驱车走前耽搁一、两分钟。所以“完满”是一个必须在每个被考虑的情况中再下定义的相对性名词，只有在事情属于黑或白，产品损坏或不损坏等简单情况下，词意才不致模糊不清。

工作条件这个名词，可能比完满地工作更难于下定义。一台设备的未来工作环境条件，在设备的设计和试验阶段，常常是知道得不完全的，环境的改变能对有些元（零）件的有效寿命产生巨大的影响。用户的使用方法也对元（零）件寿命有影响。

按照统计学的观点，概率是用数值表示的可能性大小来定义的，正因为如此，我们才用概率这个名词来定义可靠度。因而，就可用数值来定义可靠度。概率的大小通常用一个小数来表示。数值为1的概率代表绝对肯定，我们每个人都将在某一天死去的概率就是这样；数值为零的概率则表示绝对的不可能。

当某一事件出现时，该事件一切可能结局的概率总和必须等于1。在掷硬币的情况中，掷得正面的概率加上掷得反面的概率=0.5+0.5=1。同样，一个事件能够完满地工作（即可靠）的概率加上它不能完满地工作（即不可靠）的概率等于1。

于是就得到下面的定义：

不可靠度=一个事件（产品）在规定的工作条件下、规定的时期内不能完满地工作的概率。

“完满地工作”和“不能完满地工作”这两个词句重复使用不便，所以我们在本书文中分别用“无失效”和“失效”这两个简单名词代替。

如果我们所考虑的问题是某种设备能在某一特定工作期内无失效工作的可能性，则此定义就显得格外有价值。例如军用飞机，使用者关心的是，飞机出航执行一项具体任务时将不发生故障的概率，并用飞行任务可靠性这一名词来描述这种概率。在这种情况下，工作期就是执行任务的持续时间。

## 可靠度符号

在可靠性计算中常用的符号是

$R$——可靠度；

$F$——不可靠度。

如上所述，这两个概率之和为1，则

$$R+F=1。\tag{1.1}$$

此方程可较好地阐明被研究的设备只工作一次时（如火箭的发射）的情况。然而，若设备须在一段时间内连续工作，则其可靠度将随时间而改变。在要求设备进行工作的全

部时间内，设备无失效概率通常随其寿命值增加而降低。所以，在可靠度符号中必须包括寿命因素，而可靠性指标就是在该寿命期内适用的。常用的符号就写成

$R(t)$ ——在 $t$ 时间内的可靠度；

$F(t)$——在 $t$ 时间内的不可靠度。

于是可写出

$$R(t)+F(t)=1。\tag{1.2}$$

## 可靠度曲线

在会遇到失效的一切问题中，不可靠度必然随时间而变化，于是我们可以绘出 $R(t)-t$ 曲线。例如，对于男人存活概率的曲线 $R(t)-t$ 如图 1.1 所示。在这种情形下，失效的意义就是死亡，$t$ 就是以年表示的男人年龄，而 $R(t)$ 则代表男人活到年龄 $t$ 的概率。此曲线是根据 1933 年英国中央注册处出版的《英格兰和威尔士统计评论》发表的数字绘制的，它概括了 1930～1932 年间发生的男子死亡事件。

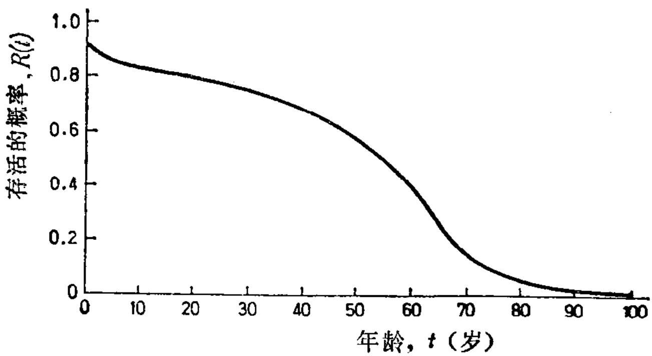


图1.1 男人在任何年龄下的存活概率

这一曲线被称为存活率曲线，它表示男人能活到任一年龄的概率。曲线的初始值并不等于100%，因为有一部分婴孩在出生时（即 $t=0$）就已死去。曲线的斜率在40岁左右开始增大，在60至70岁之间为最大，这一点是可以想像的；此后，由于仍然活着的男人数变得少的缘故，曲线再次变得平缓。活过百岁的可能性是极小的。

图1.1既可看作某一个人的存活概率，也可看作总人口内全体男人中能活到任一指定年龄的比例。因此，$R(t)$既代表个人存活的概率，又代表存活者所占的比例。

如图1.2所示，若将纵标$R(t)$换成$F(t)$，其结果就是把存活率曲线上下颠倒一下。这就是死亡率或不可靠度曲线●，这种曲线是大部分可靠性问题的研究基础。

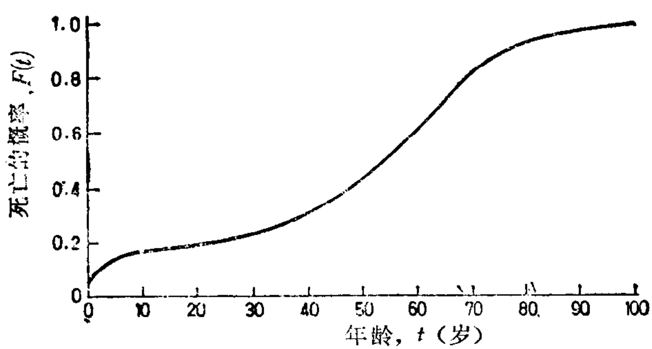


图1.2　男人在任何年龄死亡的概率

● 原文为 mortality curve。意为死亡率曲线，或失败率曲线。因为$R(t)$被称为可靠度曲线，故译作不可靠度曲线。在下文中可以看到，这一曲线的正确名称是累积失效概率曲线——译、校者注。

不可靠度曲线表示，在一定时间之前，母体● 中死亡(对于男人）或失效（对于零或元件）的比例。所以它是一条把母体中随时间而增加的死亡或失效百分率叠加起来的累积曲线。用统计学的术语表示，这一曲线就被称为累积概率分布(简称C．P．D．)。

现在我们用另一种方法来研究不可靠性曲线。若取一个给定的母体(人口)，并假定其中成员现在都已死去。如果我们知道它们死亡时的年龄，则可绘出如图 1.3 所示的直方图。该图给出的数据和绘制图 1.1 和 1.2 所用者相同，但是它是以五年为一区间绘制的。直方图每一阶梯的高度代表着在收集得到数据的那个时期内五年期间男人的死亡数。直方图形由一系列阶梯所组成，若将图中寿命区间（五年）的宽度不断缩小，阶梯就逐渐互相接近，以至消失，于是就形成了图 1.4 所示的连续曲线。这种图象被称为概率分布函数（简称P．D．F．)。

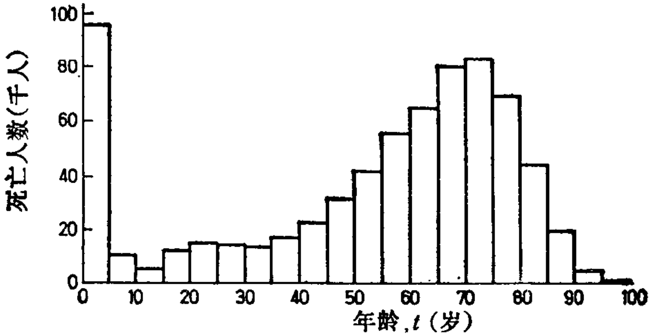


图1.3　不同年龄死亡人数的直方图

● 母体是一个统计学名词，它是指具有某一特性的对象的总体——译注。

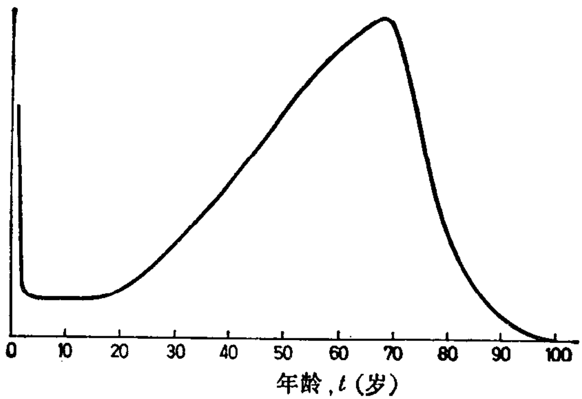


**图1.4　概率分布函数**

直方图能说明少数事件的特性，然而概率分布函数却必须包括一个大的母体。当我们用这样一种分布函数来描述一种特性时，即使事实上并不存在一个大的母体，但是我们仍必须假设它存在。可靠性理论采用分布函数计算无失效或失效的概率，显然我们所遇到的问题并非经常是一个大的母体，正如英格兰和威尔士地区在三年期间内陆续死去的男人数并非是一个大的人口数一样。譬如，我们或许要考虑 50 个零件的问题，在某个寿命值上分布曲线给出的失效概率为 0.23，相当于 11.5 个零件。事实上零件失效数并不可能是 11.5 个，而这一结果是表示，当给出大量的每 50 个零件为一组的子样● 时，在所考虑的寿命值上，平均会有 11.5 个零件发生失效。

从图 1.4 还可以看到，图 1.3 的纵标已被略去。因为概

● 在母体中为一定目的取得的若干个个体的总体叫做子样——译注。

率分布曲线是一条连续曲线，曲线上任何一点代表着在一段趋近于零的短时期间单位时间内死亡人数的极限值。在使用概率分布曲线计算概率的过程中，我们需要采用另一种方法。曲线代表从出生到最长寿命值之间任何年龄上出现死亡的概率，因为所有男人必定要死亡，所以这些概率之和必定是确知的。因此，曲线下的面积就等于1。从出生到某一指定年龄的死亡概率可以从对曲线进行从零至该年龄值的积分求得，而某两个年龄之间的死亡概率，可用在这两个年龄值之间进行积分的办法求得。

若已知概率分布函数，我们就可用连续积分法得到不可靠度曲线。设概率分布函数的数学表达式为$f(t)$，则

$$F(t)=\int_0^t f(t)dt。\tag{1.3}$$

由此可知，当已知不可靠度曲线时，我们就可用微分法求得概率分布函数：

$$f(t)=\frac{dF(t)}{dt}\tag{1.4}$$

## 失 效 率

失效率即是

$$\frac{\text{失效次数}}{\text{发生失效的那段时间的长度}},$$

我们通常以每小时或小时的倍数（如千小时）中的失效数表示。也可以用工作或循环的次数来代替时间。用这种方法求得的失效率数值非常容易使人误解，因为失效率会随着被研究设备的寿命变化而显著改变，这正同我们在人的寿命问题

中所看到的一样。再举一个例子，假如把一根根木栅栏桩打入地下。在若干年内失效率为零，此后木桩开始腐烂，于是若从开始发生腐烂的那一天起计算时间，每年的失效率就将很大。有许多种设备是按类似这样的方式失效的，所以通常不仅需要知道总的失效率而且还要知道在任一特殊寿命期中的失效率。

表明这一点的最简单方法，就是采用在任意给定的寿命值上单位时间的失效率。

$$\text{单位时间的失效率}=\frac{\text{在给定寿命值上单位时间内的期望失效数●}}{\text{在同一寿命值上面临失效的事件数●}}$$

以符号 $Z(t)$ 表示这一数值，其中 $t$ 是被考虑的寿命期。

当 $Z(t)$ 保持不变时就出现了一种特殊情况，即失效率不随设备的寿命而改变。出现这种情况的条件是，失效是由于在任何时刻出现的意外情况所造成的，例如鸟撞击飞机或汽车轮胎触着路面上的铁钉。

若失效率保持常数，则通常以符号 $\lambda$ 代替 $Z(t)$ 表示失效率。

在有关可靠性的文献中，$Z(t)$ 和 $\lambda$ 有许多不同的名称：如危险率，即设备发生危险的比率，或失效力，这也是一个合理的定义。我们有时会遇到的另一个名词是瞬间失效率，然而这一名词在措辞上有矛盾，因为任何一个比率值的分母必须是一个非无限小值。本书采用的名词是即时失效率(local failure rate)，这是一个用得最多而且含义明确的定

● 此处期望失效数就是平均失效数——译注。

● 面临失效的事件，是指正在试验或工作并有可能出现失效的产品、设备、零件等——译注。

义。

### $R(t)$、$F(t)$、$f(t)$ 和 $Z(t)$ 之间的关系

图 1.5 给出了概率分布函数 $f(t)$和在时间 $t$ 下无失效的比率$R(t)$。在 $t$ 和 $t+1$ 区间内期望的失效比率为：

$$\int_{t}^{t+1} f(t)dt,$$

因为$R(t)$ 是无失效的比率，根据定义，即时失效率可用下式

$$Z(t)=\frac{\int_{t}^{t+1} f(t)dt}{R(t)}=\frac{f(t)}{R(t)} \tag{1.5}$$

表示。我们可以看出，若 $dt$ 等于 1，而且假定在 $t$ 和 $t+1$ 区间内曲线的高度为$f(t)$，则$\int_{t}^{t+1} f(t)dt=f(t)$。

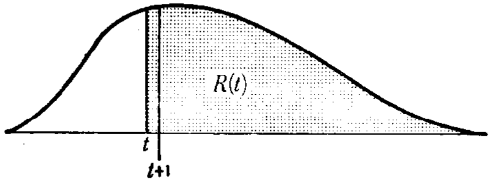


图1.5　即时失效率的推导

将方程（1.2）和（1.5）合并起来，即得

$$Z(t)=\frac{f(t)}{1-F(t)}, \tag{1.6}$$

将式（1.4）代入，得

$$Z(t)=\frac{dF(t)/dt}{1-F(t)}, \tag{1.7}$$

因此，$Z(t)$ 是不可靠度曲线的函数。从前述曲线导得的曲线$Z(t)$ 如图 1.6 所示。

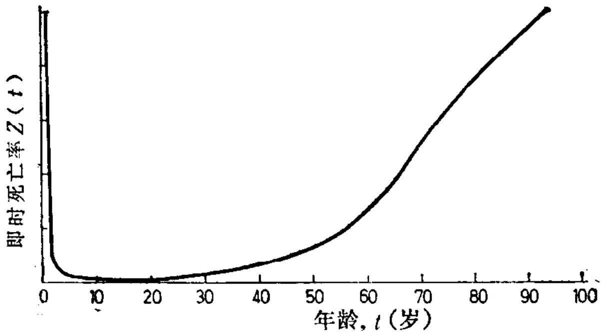


图1.6 即时死亡率-年龄曲线

现在研究$R(t)$和$Z(t)$之间的关系：

$$Z(t)=f(t)/R(t)=(dF(t)/dt)\cdot(1/R(t))$$

∴

$$\int_0^t Z(t)dt=\int_0^t \frac{dF(t)}{dt}\cdot\frac{1}{R(t)}dt$$

$$=\int_{F(0)}^{F(t)}\frac{dF(t)}{1-F(t)}$$

$$=\{-\log_e[1-F(t)]\}_{F(0)}^{F(t)}=[-\log_e R(t)]_0^t$$

$$=-\log_e R(t)\quad（当 t=0 时 F(0)=0）$$

∴ $R(0)=1$，$\log_e R(0)=0$。

因此，

$$R(t)=\exp\left(-\int_0^t Z(t)dt\right),\qquad(1.8)$$

由式(1.5)得

$$f(t)=Z(t)\exp\left(-\int_0^t Z(t)dt\right)。\qquad(1.9)$$

## 确 定 分 布

当使用分布这一名词时，我们纯粹是指概率的分布，它可用累积概率分布或概率分布函数来描述。不可靠度曲线则是一种以累积概率分布表示的失效分布。

同可靠性问题有关的分布，其形状有无限多种。在下文中将可看到，这些形状中有许多种可以用数学式表示以及它们是如何由控制一种具体情况的若干工程参数所确定的。

有一些同分布有关的名词是应当了解的。相对一个中点作对称布置的分布称为对称分布。偏向一方布置的就称为偏倚分布，偏向左方的叫做正偏，而偏向右方的就叫做负偏(见图 1.7)。

构成分布的全体观察数据的平均值叫做均值。对于对称分布，均值落在对称分布曲线的中点，但对于偏倚分布，均值将朝曲线的尾部方向移动。

中间值被称为中值（中位值），对该点来说，有一半观察数据偏低，而另一半则偏高。因为在其两侧的分布面积各为一半，因此中值就对应着概率为 50% 的那点数值。

在对称分布曲线中，均值和中值是同中心值一致的，而对于偏倚分布，它们的数值不等（见图 1.7）。另一个名词模值是指出现次数最多的那个观察数据的数值，即在该点上分布曲线的高度为最大。

在可靠性问题中，出现的大多数分布是偏倚的，因此明了这一点是重要的：在这种情况下，由均值所给出的失效时平均寿命并不和失效概率为 50% 的那点的寿命、即中位寿命值相同。