

中国矿业大学学术丛书

矿业工程可靠性分析与设计

才庆祥 韩可琦 著

〔国家自然科学基金资助项目〕



中国矿业大学出版社

中国矿业大学学术丛书

矿业工程可靠性分析与设计

才庆祥 韩可琦 著

〔国家自然科学基金资助项目〕

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书共分六章。前两章介绍可靠性的基本概念、典型的系统可靠性模型及常见的失效分布；第3章为露天矿几种主要开采工艺系统的可靠性设计与分析，探讨提高开采工艺系统可靠性的途径；第4章将可靠性原理与露天采矿知识、数理统计和系统模拟相结合，针对具体实例分析露天矿采剥工程的可靠性；第5、6两章给出了条件关联系统的概念及其可靠性数学模型，对矿井主生产系统的可靠性进行了计算。

本书不仅可作为采矿工程专业本科生和研究生的参考书，也可供有关工程技术人员参考。

责任编辑 黎 强
责任校对 何 戈

矿业工程可靠性分析与设计

才庆祥 韩可琦 著



中国矿业大学出版社出版

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 7.75 字数 200 千字

1997年8月第一版 1997年8月第一次印刷

印数 1—1000 册

ISBN 7 - 81040 - 657 - 4

TD·68

定价：20.00 元

前 言

可靠性理论是现代科学技术和社会生产实践迅猛发展的产物,是发展最快和应用最广泛的学科之一。

有组织的可靠性研究于 50 年代初始于美国。我国于 60 年代首先在国防和电子工业领域开始可靠性研究,80 年代初普及可靠性教育。我国的矿业工程可靠性研究比国外起步晚,但进展迅速,已经形成自己的特色。

矿山生产系统是由多工序、多环节及多设备组成的“人——自然——机器”大系统,其可靠性受制于多种随机因素。因此,对矿业工程而言,从设计到生产管理阶段都要求有较高的可靠性。随着煤炭科学技术的不断发展和装备的更新,以及矿山生产集中化程度和机械化程度的提高,其生产系统的可靠性也必须随之提高。

本书以一般可靠性原理和概念为基础,综合运用采矿工程学科领域的专业知识及地质统计学、系统分析原理、数学规划、数理统计原理、系统模拟和 CAD 技术等,对露天矿生产工艺系统可靠性、露天矿采剥工程可靠性、矿井主生产系统可靠性等进行了分析研究。书中主要章节的内容均与具体的矿山实例相结合,以便增强其可读性与适用性。这些内容也是作者多年来在矿业工程可靠性方面从事科研与教学工作的积累,在此奉献给读者,希望与广大采矿界同仁一道推动矿业工程可靠性理论研究与应用研究不断向前发展。

本书第 1~4 章由才庆祥执笔,第 5~6 章由韩可琦执笔。
由于水平有限,书中不当之处诚请读者予以指正。

作者

1996 年 9 月

目 录

前 言	(1)
第 1 章 系统可靠性的基本概念	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 可靠性的基本概念	(2)
1.3 可靠性的主要量化指标	(4)
1.4 典型的系统可靠性模型	(12)
第 2 章 常见的故障(或失效)分布函数	(22)
2.1 概述	(22)
2.2 连续型分布函数	(23)
2.3 离散型分布函数	(33)
2.4 经验分布函数	(36)
第 3 章 露天矿开采工艺系统可靠性	(39)
3.1 概述	(39)
3.2 连续开采工艺系统可靠性	(41)
3.3 半连续开采工艺系统可靠性	(52)
3.4 提高露天矿开采工艺系统 可靠性的途径	(76)
第 4 章 露天矿采剥工程可靠性	(87)
4.1 概述	(87)
4.2 用 CAD 技术与系统模拟相结合的方法 求解露天矿采剥工程可靠性	(92)
4.3 用目标规划原理求解露天矿采剥工程 可靠性	(145)

4.4	用统计分析方法求解露天矿采剥工程 可靠性	(154)
4.5	露天矿采区转向时的采剥工程可靠性	(167)
第5章	条件关联系统	(182)
5.1	概述	(182)
5.2	条件关联系统的数学模型	(185)
5.3	相对利用率和条件关联系统的 受影响系数	(196)
5.4	综采放顶煤工作面可靠性 管理软件(FDM)	(198)
第6章	矿井主生产系统可靠性	(210)
6.1	概述	(210)
6.2	矿井主生产系统可靠性的特点	(212)
6.3	仓储系统可靠性	(214)
6.4	矿井主生产系统可靠性	(219)
	参考文献	(238)

第1章 系统可靠性的基本概念

1.1 概 述

可靠性理论是现代科学技术和社会生产实践迅猛发展的产物,是当今发展最快,应用最广泛的学科之一。

美国在第二次世界大战期间开始关注可靠性问题。1952年,美国国防部成立了电子设备可靠性顾问团,开始有组织地进行可靠性研究。1957年该顾问团发表研究报告,制定了可靠性测量方法和标准规范。日本从1956年开始引进可靠性技术,西欧及前苏联则于60年代初开始可靠性研究。大量的可靠性研究成果充分证明了可靠性工程的有效性。例如,在二战期间,美国生产的飞机约有半数不能用,库存电子设备有50%失效,海军电子设备约有70%处于失效状态;1963年美国海军航空兵的飞机每飞行10000h就有1.46次故障。仅在这一年内就有514次重大事故,毁机275架,死亡驾驶员222人,损失2.8亿美元。事故的主要原因是有43%的器材不可靠。在90年代初发生的海湾战争中,盟军出动飞机1700架,其中美国就占1300架,每天起落2000多架次,每隔37s起落一次,单机每天起落多达5~6次,一架飞机顶好几架用,可见其可靠性之高。

我国于60年代首先在国防和电子工业部门开始可靠性研究,

80年代初普及可靠性教育。现已有诸多理论专著及通用和专门的技术规范性文献问世。在各应用学科领域中,有许多专家学者结合本专业特点从事可靠性研究。我国可靠性研究的总趋势是向着深入、普及、适用的方向发展,已取得了一大批具有专业特色的理论研究和实际应用成果。

产品质量是产品满足使用要求的特性的总和。性能、可靠性、维修性、安全性、适应性、经济性及时间性组成了产品的基本标准,前五项为产品的内在质量特性,后两项为产品的外延质量特性。随着现代科学技术的迅猛发展,竞争不断加剧,人们越来越深刻地认识到可靠性对保证产品全面质量的重要作用。同时,人们还将可靠性问题从“质量”中独立出来加以研究,其触及的范围与深度也在逐步增加。我国台湾的《工商时报》1996年2月7日载文“服务品质的五大决定因素”,把可靠度列为五大决定因素之首,即“服务品质的决定因素有五:可靠度、反映度、保证、同情心、有形化。可靠度是指可令人信赖且正确地执行所承诺的服务的能力,它是服务品质最重要的决定因素”。按照上述顺序,文中还给出了各因素占服务品质重要性的百分比依次是32%、22%、19%、16%和11%。

1.2 可靠性的基本概念

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。可靠性的定义经历了一个逐步完善的演变过程。定义中的“产品”已并非只指元件、器件、设备等硬件及硬件系统,从广义上讲还应包括软件与软件系统、科学研究方法与方案、探测与科学研究成果以及人的行为决策等。

产品的可靠性与规定的条件有密切关系。规定的条件包括使用时的环境条件(如湿度、温度、振动、冲击、辐射、作业对象等),使

用时的应力条件,维护方法与保护设施,贮存时的贮存条件,以及使用时操作人员能够达到的技术等级要求等。规定的条件不同,即使是同一种产品,其可靠性也会产生差异。

产品的可靠性与规定的时间密切相关。产品的可靠性随时间的增长而下降。不同的产品对应的时间概念也不同,如火箭发射装置的可靠性对应的时间以秒计,海底通信电缆或光缆则可以年计;对于采矿设备,人们更关心其无故障工作小时数。显然,这里的时间具有广义含义,即对某些产品可以用次数或周期来计算。

产品的可靠性与规定的功能密不可分。规定的功能就是产品应具备的技术性能。只有事先明确怎样才算完成规定的功能,才能对产品是否发生故障做出确切的判断。所谓故障系指产品丧失规定的功能。对于不可修复产品也可称故障为失效。可见,“功能”与“故障”在此是一对相互依存的概念。在实际生活中常会遇到这样的情况,同一种产品对于某些用户来说已经处于故障状态,但对于另一些用户而言则处于正常状态。如某些电子产品作为军品来说是不合格产品,但作为民用品却是合格的。这就需要依据产品应达到的功能来区分。

产品可靠性可以分为基本可靠性、任务可靠性、固有可靠性和使用可靠性。

基本可靠性指产品在规定的条件下无故障持续工作的能力。它反映了产品对维修和后勤保障的要求。显然,组成系统的任何单元(包括贮备单元)发生故障后都需要维修或更换,因此系统中的一切单元均构成串联模型。贮备单元越多,系统的基本可靠性越低。

任务可靠性指产品在规定的任务剖面内完成规定功能的能力。“任务剖面”指产品在完成规定任务这段时间内所经历的事件和环境的时序描述。很明显,系统中贮备单元越多,其任务可靠性越高。在进行可靠性设计时,一般需要同时建立基本可靠性及任务

可靠性模型,以便在人力、物力、费用和任务之间进行权衡,在现有条件下获取最佳设计方案。

固有可靠性是指产品从设计到制造整个过程中确定了了的内在可靠性,是产品的固有属性。而使用可靠性则考虑了使用及维修对产品可靠性的影响,包括使用与维护方法、程序以及操作人员的知识水平和技术熟练程度等都会对产品的寿命及功能的发挥产生重大影响。

掌握可靠性的基本概念对于可靠性分析与设计是必不可少的。在不同专业领域中具体应用时,既应注意概念的相对性、外延性和广义性,又应在概念界定时遵循可靠性分析的一般原则。

1.3 可靠性的主要量化指标

1.3.1 可靠度和累积故障分布函数

假设规定的工作时间为 t , 产品从 $t=0$ 时刻开始工作,至 ξ 时刻发生故障。若 $\xi > t$, 则认为产品在规定的时间内完成了规定的功能。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称为产品的可靠度,记为

$$R(t) = P(\xi > t) \quad (1.1)$$

把产品在规定的条件下和规定的时间内丧失规定功能的概率称为不可靠度或故障概率,记为

$$F(t) = P(\xi \leq t) \quad (1.2)$$

对于某台采煤机,24h 内故障的概率为 $F(24) = P(\xi \leq 24)$, 48h 内故障的概率为 $F(48) = P(\xi \leq 48)$ 。显然 48h 前的情况包含了 24h 前的情况,即 $F(t)$ 含有累积故障的概念。因此,亦称 $F(t)$ 为累积故障概率。

由概率论可知,某种产品在一定时间内的可靠度及累积故障概率,可以通过对此类产品进行大量试验来确定。设 N_0 为产品个数, $r(t)$ 为从时刻 0 至 t 时间段内产品累积故障个数,则有以下式:

$$F(t) = \frac{r(t)}{N_0} = \int_0^t \frac{1}{N_0} \frac{dr(t)}{dt} dt \quad (1.3)$$

令
$$f(t) = \frac{1}{N_0} \frac{dr(t)}{dt} \quad (1.4)$$

称 $f(t)$ 为故障密度函数,它表示在任意时刻 t_0 后的单位时间内,产品的故障数与产品总数之比。因此,式(1.3)可写成

$$F(t) = P(\xi \leq t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1.5)$$

所以
$$R(t) = P(\xi > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1.6)$$

式(1.5)为产品的累积故障分布函数,式(1.6)为产品的可靠度函数。图 1.1 给出了 $F(t)$ 、 $R(t)$ 和 $f(t)$ 之间的关系, $f(x)$ 曲线下的面积为 1,即

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1.7)$$

由式(1.5)得

$$f(t) = dF(t)/dt \quad (1.8)$$

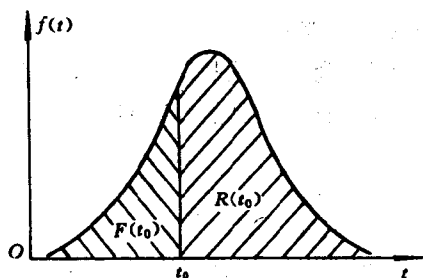


图 1.1 $R(t)$ 与 $F(t)$ 的关系

再由式(1.7)得

$$f(t) = -dR(t)/dt \quad (1.9)$$

$R(t)$ 与 $F(t)$ 具有下列性质:

- ① $R(0)=1, F(0)=0$;
- ② $R(\infty)=0, F(\infty)=1$;
- ③ $0 \leq R(t) \leq 1, 0 \leq F(t) \leq 1$;
- ④ $R(t)+F(t)=1$;
- ⑤ $R(t)$ 是时间 t 的单调减函数, $F(t)$ 是时间 t 的单调增函数 (见图 1.2)。

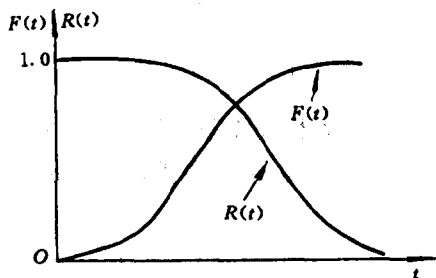


图 1.2 $R(t)-t$ 与 $F(t)-t$ 曲线

1.3.2 故障率函数及其特征

工作到某时刻 t 尚未出现故障的产品,在该时刻后单位时间 dt 内发生故障的概率称为产品的故障率,即

$$\lambda(t) = \frac{dr(t)}{N_s(t)dt} \quad (1.10)$$

式中 $\lambda(t)$ ——产品的故障率;

$dr(t)$ —— t 时刻后单位时间 dt 内出现故障的产品数;

$N_s(t)$ ——到 t 时刻尚未故障的产品数。

故障率是时间 t 的函数, 也称 $\lambda(t)$ 为瞬时故障率, 或称为故障分布函数。

在实际工作中常用下式计算 $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta r(t)}{N_s(t) \Delta t} \quad (1.11)$$

式中 Δt ——取定的时间间隔;

$\Delta r(t)$ ——在 Δt 时间间隔内故障的产品数。

大量的实验结果表明, 电子及机电产品的故障率随时间的变化具有明显的特征, 即 $\lambda(t)-t$ 曲线随时间的变化大致可划分为三个阶段(见图 1.3), 曲线形状很像浴盆, 因此也叫浴盆曲线。

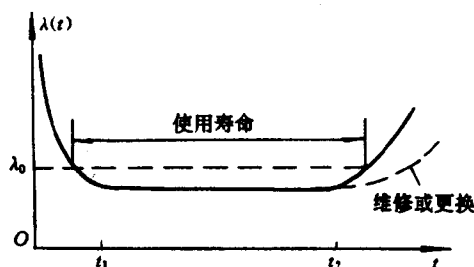


图 1.3 产品故障率曲线

$0 \sim t_1$ 为早期故障阶段, 其特点是开始时故障率 $\lambda(t)$ 较高, 但随时间 t 的增加而迅速下降。这主要是由于设备制造工艺上有缺陷及选材或装配不当等导致的产品故障。

$t_1 \sim t_2$ 为偶然故障阶段。在此期间产品的故障率低且稳定, 近似为常数。这一阶段占据了产品使用寿命(也称有效寿命)的绝大部分(见图 1.3), 故障的发生主要是由偶然或随机因素引起的。

在 t_2 以后为损耗故障阶段。本阶段的特点是故障率 $\lambda(t)$ 迅速上升, 很快导致产品报废。故障是由元件磨损、疲劳、老化等引起的。 λ_0 是产品规定的故障率, 若能事先预测到此值, 即可在损耗初

期采取维修或更新措施,从而降低其故障率,如图 1.3 中虚线所示。

1.3.3 故障率与可靠度及故障密度函数的关系

由式(1.3)得

$$R(t) = 1 - \frac{r(t)}{N_0}$$

上式两边对 t 微分

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{N_0} \frac{dr(t)}{dt}$$

则有

$$\frac{dr(t)}{dt} = -N_0 \frac{dR(t)}{dt}$$

由式(1.10)得

$$\frac{dr(t)}{dt} = \lambda(t)N_s(t)$$

代入上式得

$$\lambda(t) = -\frac{N_0}{N_s(t)} \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (1.12)$$

经整理得

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

对该式积分

$$\int_0^t \lambda(t)dt = -\ln R(t) \Big|_0^t$$

即

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

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (1.13)$$

该式即为可靠度函数的一般表达式。当 $\lambda(t)$ 为常数时,式(1.13)成为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.14)$$

式(1.14)就是可靠性计算中经常用到的指数分布可靠度函数的表达式。相应的累积故障分布函数为

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1.15)$$

由式(1.9)和式(1.12),得到故障率函数与可靠度函数及故障密度函数之间的关系式为

$$\lambda(t) = f(t)/R(t) \quad (1.16)$$

因此,可以总结出 $R(t)$ 、 $F(t)$ 、 $f(t)$ 和 $\lambda(t)$ 之间的相互换算关系,见图 1.4。

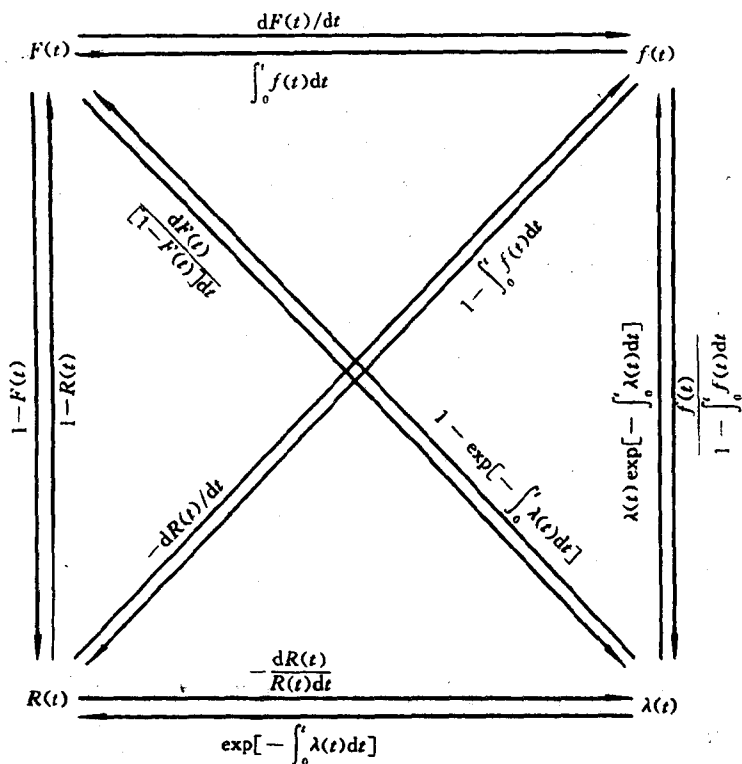


图 1.4 $R(t)$ 、 $F(t)$ 、 $f(t)$ 和 $\lambda(t)$ 之间的关系

故障率函数 $\lambda(t)$ 与故障密度函数 $f(t)$ 反映了不同的概念。故障率 $\lambda(t)$ 反映了某时刻 t 后单位时间 dt 内产品故障的概率。因此,

故障率也可称为故障强度；而故障密度 $f(t)$ 则反映产品在所有可能工作时间内的故障分布情况。

1.3.4 产品的寿命特征

不可修复产品的寿命指发生故障前的工作时间，对可修复产品是指其故障间隔时间。

平均寿命是产品最重要的特征之一。不可修复产品的平均寿命是指其失效前工作时间的平均值，通常记为 $MTTF$ (Mean Time To Failure)。可修复产品的平均寿命指故障间隔时间的平均值，记为 $MTBF$ (Mean Time Between Failures)。

产品的平均寿命 θ 实际上就是产品寿命的数学期望。用 t 表示产品的工作时间， $f(t)$ 为故障密度函数，由概率原理得

$$\theta = MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1.17)$$

把式(1.9)代入得

$$\begin{aligned} \theta &= \int_0^{\infty} t \left[-\frac{dR(t)}{dt} \right] dt \\ &= -tR(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \end{aligned} \quad (1.18)$$

当 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 时有

$$\theta = MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (1.19)$$

由此可知，当产品寿命服从指数分布时，其平均寿命 θ 为故障率 λ 的倒数。

对于可以完全修复的产品，修复后就与新产品完全一样。发生 N 次故障，就相当于 N 个新产品工作到失效。因此，也可以用式(1.17)、(1.18)和(1.19)来求产品的平均故障间隔时间 $MTBF$ 。