

矿井系统可靠性工程基础

王永建 李化敏 编著

焦 作 矿 业 学 院

一 九 九 二 年 八 月

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,应用计算机定量分析以达到最优化的目的。系统可靠性工程正是最优化手段的一个重要方面。所以系统观念,数学方法,计算机工具是系统可靠性研究中不可缺少的三大要素。

矿井生产系统是多工序、多环节、多设备组成的复杂系统,加之地下作业的特殊环境和作业场所的动态性,因而存在着大量影响生产的随机因素,致使我国多数矿井存在生产不均衡,单产低,投入大,效益低的局面。其重要的原因之一就是影响生产的诸多随机因素的影响规律掌握不够。在矿井生产的设计、管理上缺乏科学依据,很少考虑系统的可靠性及改善其不可靠性的对策,只是在个别环节考虑一些富裕和安全系数。致于从系统整体出发,用系统的观点,用可靠性工程的理论研究这个复杂系统,还是很不够的。随着煤炭科学技术的不断发展,技术革命的不断深化以及大设备集中的高度集约化生产,矿井生产系统可靠性的研究就显得越来越重要。

为了适应矿井系统可靠性工作的需要,为了扩大学生的知识领域,增强科学决策、科学管理的意识,并考虑到目前国内已出版的可靠性书籍中,结合煤矿生产系统可靠性的较少,我们编写了此书,以作为本科生的选修课教材及研究生的参考书籍。

本书力图让读者了解系统可靠性工程的基本概念、研究的内容和范围,掌握系统可靠性工程的主要研究方法。并紧密结合煤矿生产实际介绍如何根据实际问题建立系统的可靠性数学模型;如何进行定性的分析和评价;如何进行定量计算;如何根据计算结果对系统进行分析评价;如何寻找系统的薄弱环节和提高系统可靠性的措施;如何对系统进行设计,使系统达到最良好的运行状态,最高的可靠性和最佳的经济效益等。此外,对马氏可修系统的可靠性指标计算,故障树分析还提供了电算程序,以解决大系统、复杂系统的可靠性分析问题。对非马氏可修系统还介绍了计算机模拟的分析方法和研制的通用模拟程序。

全书共分六章,其中第一章、第三章、第四章、第五章、附录A和附录B由王永建同志编写,第二章和第六章由李化敏同志编写。全书由王永建同志主编、统稿,由李定生副教授审定。

在编写过程中,魏方图教授、李定生副教授及杨运良同志曾提供宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促,编著者水平有限,书中一定存在不少错误和不足之处,敬请读者批评指正。

编 著 者

一九九二年八月

目 录

第一章 可靠性概述	1
§ 1、1 可靠性问题的提出	1
§ 1、2 可靠度的定义	2
§ 1、3 失效率及其特征	4
1、3、1 失效率函数的定义	4
1、3、2 可靠性特征量间的关系	6
1、3、3 失效率特征及分类	7
§ 1、4 不可修系统的可靠性数量指标	8
§ 1、5 可修系统的可靠性数量指标	9
1、5、1 有关首次故障前过程的数量指标	10
1、5、2 有关维修过程的数量指标	10
1、5、3 有关运行周期的数量指标	11
§ 1、6 可靠性工程中常用的概率分布	14
第二章 不可修系统的可靠性	23
§ 2、1 可靠性框图	23
§ 2、2 串并联系统的可靠性	26
2、2、1 串联系统	26
2、2、2 并联系统	29
2、2、3 混联系统	31
§ 2、3 贮备系统的可靠性	32
2、3、1 冷贮备系统	33
2、3、2 温贮备系统	35
§ 2、4 网络系统的可靠性	36
2、4、1 网络的基本概念	37
2、4、2 化简网络方法	38
第三章 马氏可修系统的可靠性	44
§ 3、1 可维修性与可靠性贡献	44
§ 3、2 马氏可修系统可靠性指标的求解	46
3、2、1 马尔柯夫过程	46
3、2、2 状态转移概率矩阵	47
3、2、3 状态转移率矩阵	50
3、2、4 系统的可用度	52
3、2、5 系统的可靠度及首次故障前平均时间	56

3.2.6	系统的故障频度	58
3.2.7	系统的平均工作时间、平均停工时间和平均周期	59
3.2.8	维修工利用率	60
3.2.9	马氏可修系统可靠性指标的求解步骤	60
§ 3.3	串联系统的可靠性	62
3.3.1	串联系统的基本模型及求解	62
3.3.2	回采工作面生产系统	66
§ 3.4	并联系统的可靠性	70
3.4.1	并联系统的基本模型及求解	70
3.4.2	系统的功能有效度	77
3.4.3	采区生产系统	79
3.4.4	煤仓可靠性及贮运系统	81
§ 3.5	冷贮备系统的可靠性	89
3.5.1	冷贮备系统的基本模型及求解	89
3.5.2	煤矿排水系统	92
3.5.3	煤矿供电系统	97
§ 3.6	可修系统可靠性指标的电算法	101
3.6.1	电算程序	102
3.6.2	程序的使用	104
§ 3.7	系统的分析与改善	106
3.7.1	系统可靠性指标的直观分析	106
3.7.2	部件重要度	107
3.7.3	矿井生产系统综合分析	112
第四章	可修系统可靠性分析的计算机模拟	122
§ 4.1	问题及意义	122
§ 4.2	模拟程序设计	122
4.2.1	模拟程序模型的建立	122
4.2.2	子程序功能及程序框图	124
4.2.3	模拟程序	127
第五章	故障树分析	128
§ 5.1	故障树分析法概述	128
5.1.1	故障树分析法	128
5.1.2	故障树分析的特点及应用范围	128
5.1.3	故障树分析的步骤	129
§ 5.2	故障树的建造	130
5.2.1	事件符号	130

5.2.2	逻辑门符号	131
5.2.3	故障树的演绎建立法	133
5.2.4	故障树的简化	135
§ 5.3	故障树的定性评定	139
5.3.1	布尔代数运算律	139
5.3.2	故障树的数学表示	139
5.3.3	最小割的求法	141
5.3.4	对偶树及最小路的求法	143
5.3.5	最小割与最小路的分析	146
§ 5.4	故障树的定量评定	147
5.4.1	顶端事件概率的精确计算	147
5.4.2	最小割的不交化	149
5.4.3	部件重要度计算	154
5.4.4	顶端事件概率的近似计算	156
§ 5.5	故障树分析的电算法	157
5.5.1	SRNT—2 程序的功能	157
5.5.2	SRNT—2 程序的使用	158
§ 5.6	矿井自然火灾的故障树分析	168
第六章	系统可靠性优化	177
§ 6.1	系统可靠性分配最优化	177
6.1.1	系统可靠性最优设计	177
6.1.2	系统可靠性最优改进	181
§ 6.2	维修策略最优化	184
6.2.1	定时计划维修策略	185
6.2.2	成批更换策略	187
6.2.3	故障小修的周期更换策略	189
6.2.4	使系统可用度最大的定时维修策略	191
6.2.5	时间检修策略	195
附录 A.1	概率论及数理统计概述	197
§ A.1	概率论基本知识	197
A.1.1	基本术语	197
A.1.2	事件的逻辑运算	197
A.1.3	概率的定义	198
A.1.4	概率的运算	198
§ A.2	随机变量及概率分布	201
A.2.1	随机变量	201

A、2、2	分布函数	201
A、2、3	概率密度及其与分布函数的关系	203
§ A、3	随机变量的数字特征	203
A、3、1	数学期望	203
A、3、2	方差	203
§ A、4	随机抽样与参数估计	205
A、4、1	总体与样本	205
A、4、2	期望与方差的点估计	207
§ A、5	总体分布的估计和检验	208
A、5、1	总体分布估计的直方图形	208
A、5、2	总体分布的 χ^2 假设检验	211
附录B	拉普拉斯变换	216
参考文献		219

第一章 可靠性概述

§ 1.1 可靠性问题的提出

什么是可靠性,为什么要研究可靠性,可靠性工程要解决什么问题,它的任务和目的是什么?在回答这些问题之前,先看以下一些引例。

EP 1: 飞机在一次飞行中不故障的可能性有多大?

EP 2: 一批日光灯管的平均寿命有多长?

EP 3: 煤矿综采工作面的开机率有多大,平均月产量有多高?

EP 4: 矿井提升系统平均每小时发生多少次故障?

EP 5: 矿井排水泵设多少台备用最优?

EP 6: 综采设备的最佳大修周期为多长,才能使运营费用最低?

以上各引例提出的问题,已从不同的侧面回答了可靠性工程所要解决的部分问题。如EP 1提出了产品或部件或系统的可靠度问题;EP 3提出了系统的可用度问题;EP 5提出了提供多少贮备件的问题;EP 6提出了最优维修策略问题等等。当然,可靠性工程要解决的远不止以上提出的问题。

可靠性问题起源于本世纪三十年代,最早被研究的问题是机器维修问题。然而可靠性真正被受到重视还是在第二次世界大战前后的事情。当时,美军运往远东的设备、装置在运输和保管过程中,有半数以上因不能使用而报废。这种不经使用就遭到重大损失的情况成了美国投入力量进行可靠性研究的开端。

可靠性问题之所以受到重视,首先是因为系统、设备所承担的工作在质的方面高级化了;在量的方面复杂化了。因彼此相关的任意一部分失效而导致整个系统发生故障或失效的机会增加了;而整个系统的故障将使生产受到严重影响,使企业遭受重大经济损失;尤其是军工系统的故障可能使国家安全受到威胁,使军队、社会、人民生活受到危害。

其次,由于人—机系统日益庞大、复杂化;新技术、新材料开发应用速度大大加快;尚未发现、尚未研究开发的领域还很广阔,所有这些都是产生不可靠、不安全的因素。由于机器设备的高精度、高性能致使由人所担负的工作责任更加重大,因而就存在着由人为失误而引起重大事故的可能性。例如,美国向火星发射的“水手”1号火箭,就是仅仅因为电子计算机的程序系统脱离了一个字符而告失败。这是属于软件方面的可靠性问题。解决这样的问题不是现场所能应付得了的,需要进行全面的、全过程有组织的可靠性工作。

再其次,产品的质量是衡量一个国家工业技术水平的重要标志之一。一个国家工业

技术力量是否强大，基础是否牢固，不仅要看产品的产量，更重要的要看产品达到什么水平，也就是要看产品的质量。产品的质量是指产品满足使用要求所具备的固有属性。通常，产品的质量主要包含三个指标：产品的功能（或性能）指标；可靠性指标和有效性指标。产品若不具备其必要的功能指标，可靠性指标也就无从谈起。但只有功能指标，没有可靠性指标，产品的性能也是不完全的。一台设备，尽管它的各项功能指标都很先进，如果不可靠，那也没有多大使用价值；或是有效性太差，经常发生故障，维修时间太长，使生产受到影响，运营费增高。由此可见，产品的功能能否得到发挥，在很大程度上取决于产品的可靠性水平如何。水平高才能使产品的功能得到充分发挥，否则就不能保证产品的规定功能。

矿井生产系统是多工序、多环节、多设备组成的复杂系统，加之地下作业的特殊环境和作业场所的动态性，因而存在着大量影响生产的随机因素，致使我国多数矿井存在生产不均衡，单产低，投入大，效益低的局面。其重要的原因之一就是影响生产的诸多随机因素的影响规律掌握不够，在矿井生产的设计、管理上缺乏科学依据，很少考虑系统的可靠性及改善不可靠性的对策，只是个别环节考虑一些富裕和安全系数，致于从系统总体出发，用系统的观点，用系统可靠性工程的理论研究这个复杂系统，还是很不够的。随着技术革命和企业经营战略思想的不断深化，那种广种薄收的局面已远远不适应现代化建设的需要，取而代之的是高科技、大设备集中的高度集约化生产。因此矿井生产系统可靠性的研究就显得更为重要和十分必要。目前，我国已有为数不少的综采队年产超过百万吨，甚至二百万吨，也就是说，有的矿只用一个综采面生产来保证全矿井的产量。显而易见，如果系统的可靠性不高，经常发生故障影响生产，它不只是影响一个工作面的生产，而是影响整个矿井的生产问题。

由以上分析可知，为了适应现代科技的高速发展，现代化装备的日益复杂，就需要有一整套科学的方法，将可靠性工作贯穿于研制、生产和使用维修的全过程。可靠性工程的任务就是要研究产品的质量，产品和系统的可靠性设计，对部件和系统进行可靠性评估，寻找系统的薄弱环节；讨论可修设备的可靠性，维修性；讨论产品可靠性检验和质量控制等等。可靠性工程的目的是：提高产品质量，提高产品的技术水平，提高系统的可靠性，提高系统的运行水平，提高经济效益和提高科学研究水平。

§ 1.2 可靠度的定义

简单地说，系统是由一些基本部件（元件、零件，也可以包括人）组成的完成某种特定功能的整体。“系统”和“部件”是相对的，比如整个矿井的生产可视为一个系统，其中的采煤、运输、提升、通风、排水等等可看作为它的“部件”；但若专门研究“提升”，那么又可以把它看作是由电气设备和元件、提升机、提升容器等组成的“提升系统”。部件可以有形的，也可以是无形的。比如采煤机故障，沼气超限都将影响采煤生产，我们把采煤机和沼气都看成是回采工作面采煤系统的部件，而采煤机是有形的部

件，沼气是无形的部件。在可靠性工程分析中，系统又分为不可修系统和可修系统。比如电灯泡是一种不可修产品，人造卫星是一种不可修系统。而煤矿生产中的绝大部分设备是可修部件，同理，提升系统是一种可修系统。

系统（部件或产品）丧失规定功能称为失效或故障。通常对不可修系统称为失效，对可修系统称为故障。

既然系统是由部件（或元件，或子系统）组成的，那么要研究系统的可靠性，就必然离不开研究部件的可靠性。而研究部件的可靠性是从部件的寿命分布入手的，用非负随机变量 T 来描述部件的寿命， T 相应的概率分布函数为

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1.1)$$

其中 $f(t)$ 为部件的寿命分布密度函数。

定义：部件（系统）从时刻 $t = 0$ 开始，在规定的条件下，规定的时间 t 内，完成规定功能的概率称为该部件（系统）的可靠度（Reliability），记为 $R(t)$ 。

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1.2)$$

由（1.2）式进一步理解为部件的可靠度 $R(t)$ 是部件的寿命 T 大于规定时间 t 的概率，或者说部件在 $[0, t]$ 时间内不失效的概率，见图 1.1。

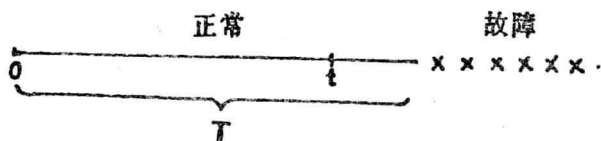


图 1.1

$R(t)$ 还可理解为：一批 N 个同型部件在相同条件下同时独立地工作到 t 时刻，残存的未发生失效的部件数占总部件数 N 的百分比。

部件或系统的可靠度是可靠性的主要数量特征之一，它反映了部件或系统在一定时间内能完成任务的可能性的。可靠度是表示产品质量的主要指标之一。它与规定的条件和规定的时间有着密切的关系。

规定的条件是指部件在工作时所处的环境，如温度、湿度、介质、应力、负荷等等。比如 8 吨蓄电池电机车拉 25 个一吨矿车组成的列车运行 2 km，要比拉 50 个一吨矿车组成的列车运行 2 km 的可能性要大。又如电机在高温、潮湿的环境下连续运转 100 小时要比在常温、干燥的环境下连续运转 100 小时的可能性要小。

规定的时间是指部件的性能有一定时间要求，或某项任务的时间要求，部件的可靠度是随要求的时间而改变的。比如同等型号的飞机连续飞行50小时要比连续飞行10小时的可能性小。

规定的功能是指部件某特定的技术性能指标，这种功能是根据使用的需要和生产的可能技术指标来规定的。

公式(1.1)中的 $F(t)$ 说明部件的寿命不大于规定时间 t 的概率，又称为部件的失效函数或失效分布或不可靠度。根据概率的性质有

$$F(t) + R(t) = \int_0^t f(t) dt + \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (1.3)$$

由公式(1.3)有

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 - \int_0^t f(t) dt = 1 - F(t) \quad (1.4)$$

根据(1.4)式又有

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (1.5)$$

以上各式中的 $f(t)$ 是部件寿命分布的概率密度函数，在可靠性工程中它又称为失效(或故障)密度函数。

可靠度具有下列性质：

- (1) $R(0) = 1$ ，这表示部件在初始时刻处于良好状态；
- (2) $R(t)$ 是时间 t 的单调减函数；
- (3) $0 \leq R(t) \leq 1$ ；
- (4) $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$ ，即当时间无限长时，部件不失效成为不可能事件。

若部件的寿命 T 服从指数分布时，由于指数分布的密度函数为 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ ，则部件的可靠度函数为

$$R(t) = \int_t^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda t}$$

显然 $R(t)$ 满足可靠度的四个性质。

§ 1.3 失效率及其特征

1.3.1 失效率函数的定义

定义：设部件的失效密度函数为 $f(t)$ ，可靠度函数为 $R(t)$ ，则称

$$r(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.6)$$

为部件的瞬时失效率或失效率函数，简称失效率或故障率 (Failure rate)。

$r(t)$ 可用条件概率来解释其意义。若部件工作到时刻 t 仍然正常，则它在时间区间 $(t, t + \Delta t)$ 内失效的概率为

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

则在单位时间内失效的概率为

$$r(t, \Delta t) = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t P(T > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)}$$

令 $\Delta t \rightarrow 0$ 两端取极限有

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} r(t, \Delta t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} \\ &= \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = r(t) \end{aligned}$$

由此可知，失效率是部件工作到 t 时刻时，瞬时失效概率的变化率。

在工程应用中，失效率可理解为部件工作到 t 时刻，在单位时间内失效的次数，或有多台同型部件同时工作，单位时间内失效的部件数。

若部件的寿命为指数分布时，其失效率为

$$r(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda$$

可见寿命为指数分布的部件的失效率是一常数，与时间 t 无关。本书讨论的绝大部分问题属于这类情况。

失效率的值域是 $0 < r(t) < \infty$ ，它的单位是时间的倒数，如 $1/h$ ， $1/min$ 等。

1.3.2 可靠性特征量间的关系

由(1.6)式和(1.5)式得

$$r(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{d}{dt} \ln R(t)$$

由初始条件(性质1) $R(0) = 1$ 解此微分方程得

$$R(t) = e^{-\int_0^t r(t) dt} \quad (1.7)$$

上面, 已介绍了可靠性分析中的四个特征量: 失效密度 $f(t)$, 失效函数 $F(t)$, 可靠度函数 $R(t)$ 和失效率 $r(t)$ 。若已知其中一个, 则可根据(1.4)、(1.5)、(1.6)和(1.7)式间的关系相互确定。它们的曲线特点及相互关系如图1.2所示。

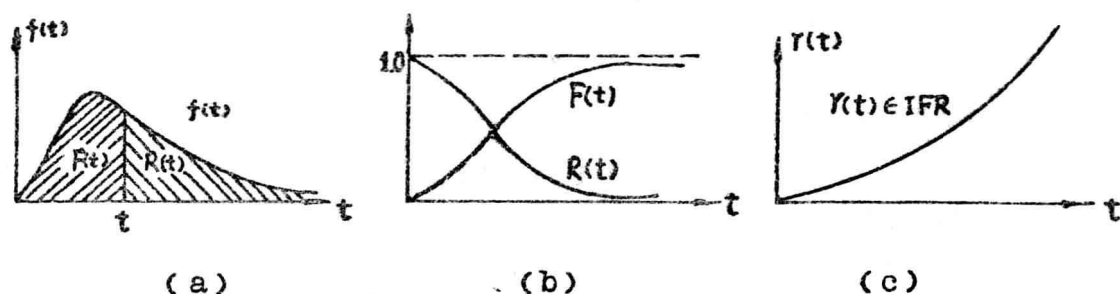


图 1.2

例 1.1 若采煤机截齿的寿命 T 服从参数 $\alpha = 2$, $\lambda = 0.03$ 的威布尔分布, 其失效密度函数为

$$f(t) = 0.0018 t e^{-(0.03 t)^2} \quad t \geq 0$$

求采煤机连续运行 50 h 时, 截齿的不可靠度 $F(t)$, 可靠度 $R(t)$ 和失效率 $r(t)$ 。

$$\text{解: 因有 } F(t) = \int_0^t 0.0018 t e^{-(0.03 t)^2} dt = 1 - e^{-(0.03 t)^2}$$

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-(0.03 t)^2}$$

$$r(t) = \frac{f(t)}{F(t)} = 0.0018t$$

$$\text{所以有 } F(50) = 1 - e^{-(0.03 \times 50)^2} = 0.8946$$

$$R(50) = e^{-(0.03 \times 50)^2} = 0.1054$$

$$r(50) = 0.0018 \times 50 = 0.09 (1/h)$$

1.3.3 失效率特征及分类

在图 1.2 中的 (c) 图所示的失效率 $r(t)$ 是随时间 t 呈递增的关系, 但并非所有部件的失效率都是如此特征。失效率随时间的变化规律有以下三种类型。

(1) 递减型 (早期失效型), 记为 DFR (Decreasing Failure rate) 其 $r(t)$ 随时间的增大而减小。

(2) 恒定型 (偶然失效型), 记为 CFR (Constant Failure rate), 其失效率 $r(t) = \lambda$ 与时间 t 无关。

(3) 递增型 (耗损失效型), 记为 IFR (Increasing Failure rate) 其 $r(t)$ 随时间的增大而增大。

三种类型的失效率曲线如图 1.3 中的 (a)、(b)、(c) 所示。

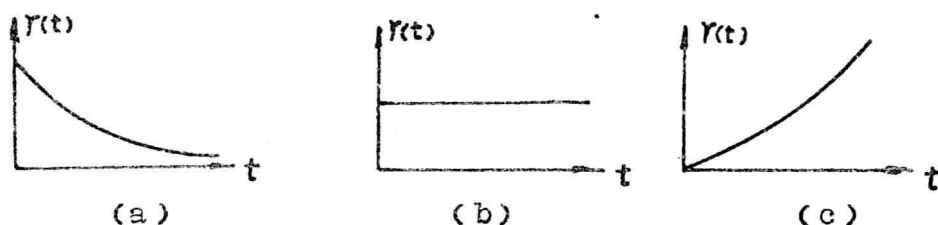


图 1.3 三种类型的失效率曲线

部件或产品的早期失效是由于设计不善, 内部材料、制造有缺陷, 装配不当, 检验疏忽等原因引起的, 造成部件的初期失效率较高。随着改进、调整、筛选、更换等, 使失效率随时间逐渐减小, 因而失效率呈递减型。

偶然失效型的失效, 是部件或产品在使用过程中, 失效是偶然发生的, 其失效率保持为恒定常数。将 $r(t) = r$ 代入 (1.7) 式得可靠度为 $R(t) = e^{-\lambda t}$, 为指数型函数, 亦即失效前的工作时间 T 服从指数分布。可以证明, 在连续时间的寿命分布中, 只有指数分布的失效率才是常数。而偶然失效期是部件、产品、系统的最佳工作期。因此, 指数分布是可靠性问题中最有代表性, 研究最多的分布类型。

耗损失效型的失效，通常是由于部件、产品的老化，性能的逐渐衰退引起的。因此失效率随时间的增大呈递增型。

大部分部件、系统在投入使用的全过程中，失效率随时间的变化集中了以上三种类型，分为三个阶段。这三种曲线的组合大致构成一种所谓的“浴盆曲线”，如图 1.4 所示。

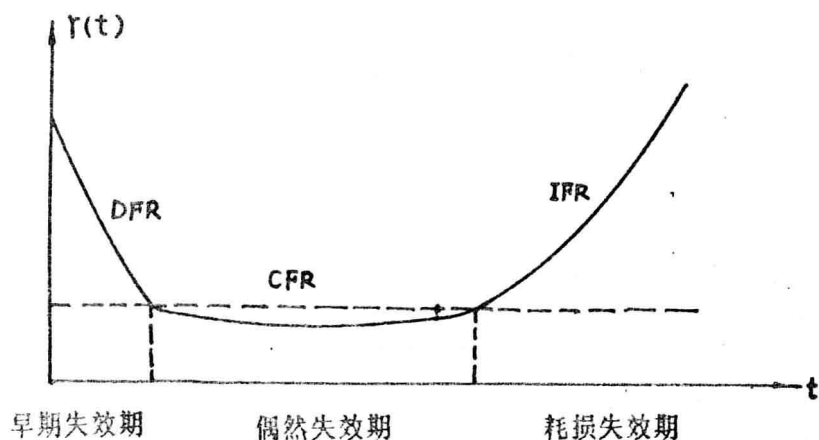


图 1.4 失效率的浴盆曲线

一般说来，早期失效期较短，其次是耗损失效期，偶然失效期阶段最长。因此，在可靠性问题的研究中，对失效率属于 C F R 的讨论较多。当然也有的零部件、元件和工具由于工作环境就是磨损较强的情况，如齿轮、采煤机截齿和机床上的刀具等的耗损失效期相对较长。对于递增失效率类的部件、系统在维修策略的优化中讨论较多。

§ 1.4 不可修系统的可靠性数量指标

在前几节中讨论的部件或系统的失效密度函数 $f(t)$ ，可靠度 $R(t)$ ，失效分布函数或不可靠度 $F(t)$ 以及失效率 $r(t)$ 都是不可修部件或系统的可靠性数量指标。此外，还有一个重要的指标，这就是失效前的平均时间 M T T F (Mean Time To Failure) 或说平均寿命，它就是部件寿命的数学期望 $E(T)$ 。

$$MTTF = E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1.8)$$

若将 (1.5) 式代入 (1.8) 式得

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \left(- \frac{dR(t)}{dt} \right) dt = \int_0^{\infty} -t dR(t)$$

$$= -[tR(t)]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt$$

可以证明, 当 $t=0$ 和当 $t \rightarrow \infty$ 时, 都有 $tR(t) \rightarrow 0$, 故有

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1.9)$$

(1.8) 式和 (1.9) 式都可用来计算部件的平均寿命或失效前平均时间 MTTF。

若 $R(t) = e^{-\lambda t}$, 则 $MTTF = \frac{1}{\lambda}$ 。

§ 1.5 可修系统的可靠性数量指标

对于不可修部件或系统, 一旦部件或系统失效, 则它们永远停留在失效状态, 其随时间的运行过程如图 1.5 所示。由于过程较简单, 所以描述不可修部件的可靠性数量指标不多, 也就是上一节所总结的那些指标。

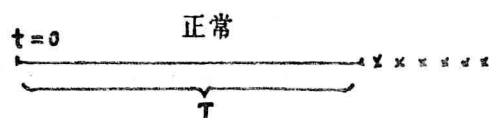


图 1.5 不可修部件的运行过程

而对于可修部件或系统, 情形要复杂一些。由于有修理的因素, 部件故障后可以修复。此时, 部件的运行是正常与故障交替出现的过程, 如图 1.6。

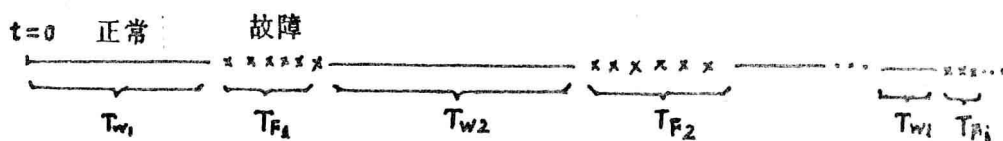


图 1.6 可修部件的运行过程

图中的 T_{W_i} , T_{F_i} 分别表示第 i 个周期内的正常工作时间和故障维修时间。由于可修部件的运行过程较复杂, 显然描述可修部件或系统的数量指标较多。本节只是提出这些数量指标的概念, 具体求解将在第三章讨论。

1.5.1 有关首次故障前过程的数量指标

在图1.6中,如果只考虑首次故障前的过程,那就和不可修部件的运行过程一样了。所以不可修部件的可靠性数量指标 $f(t)$, $R(t)$, $F(t)$, $r(t)$ 和 MTTF 完全描述了这个过程的可靠性特征。为便于区别,失效前平均时间 MTTF 改为首次故障前平均时间 MTTFE (Mean Time To First Failure), 即:

$$MTTFE = E(T_{W_1}) = \int_0^{\infty} t f_1(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1.10)$$

其余指标同前,此处不再赘述。

1.5.2 有关维修过程的数量指标

这是讨论各 T_{F1} 过程的可靠性数量指标,它们是反映维修人员(设备)对部件的维修能力和水平的可靠性数量指标。

若把 T_{F1} 的起始时刻视为 0 时刻,有如下定义:部件或系统在规定的条件下,在规定的时间内 $(0, \tau)$ 内完成维修而恢复正常状态的概率,称为该部件或系统的维修度,记为 $M(\tau)$ 。并设维修密度函数为 $m(\tau)$, 则有

$$M(\tau) = P(T_F \leq \tau) = \int_0^{\tau} m(t) dt \quad (1.11)$$

从形式上看,维修度对应于时刻 τ 的不可靠度,而未维修度 $\bar{M}(\tau) = 1 - M(\tau)$ 对应于时刻 τ 的可靠度。

类似于定义失效率那样定义维修率为 $\mu(\tau)$

$$\mu(\tau) = \frac{m(\tau)}{M(\tau)} = \frac{m(\tau)}{1 - M(\tau)} \quad (1.12)$$

平均维修时间为 MTTR (Mean Time To Repair)

$$MTTR = \int_0^{\infty} \tau m(\tau) d\tau$$

若维修时间服从参数为 μ 的指数分布,则有

$$M(\tau) = 1 - e^{-\mu \tau}$$

$$\mu(\tau) = \frac{m(\tau)}{1 - M(\tau)} = \frac{\mu e^{-\mu \tau}}{e^{-\mu \tau}} = \mu$$

$$MTTR = \int_0^{\infty} \tau m(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} \tau \mu e^{-\mu \tau} d\tau = \frac{1}{\mu}$$

1.5.3 有关运行周期的数量指标

所谓周期是指部件或系统经历一次开工（正常工作）和停工（故障维修）时间。如图1.6中， $T_{Wi} + T_{Fi}$ 为第*i*个周期经历的时间。

1、平均开工时间 MUT (Mean Up Time)，或两次故障间的平均工作时间 $MTBF$ ，又称为平均无故障工作时间。

$$MUT = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(T_{Wi}) \quad (1.13)$$

2、平均停工时间 MDT (Mean Down Time)

$$MDT = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(T_{Fi}) \quad (1.14)$$

3、平均周期 MCT (Mean Cycle Time)

$$MCT = MUT + MDT \quad (1.15)$$

4、可用度（有效度）

定义：部件在规定的条件下，在任意时刻 t 正常工作的概率称为瞬时可用度（或瞬时有效度），用 $A(t)$ 表示。

$$A(t) = P(\text{时刻 } t \text{ 部件正常}) \quad (1.16)$$

瞬时可用度 $A(t)$ 只涉及时刻 t 部件是否正常，与 t 时刻以前部件是否发生故障无关。它与可靠度 $R(t)$ 有本质的区别， $R(t)$ 要求 $[0, t]$ 时间内一直正常工作，没发生过故障的概率。显然 $A(t) \geq R(t)$ 。

若极限

$$\lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = A$$

存在，则称 A 为稳态可用度。

可用度是可修系统中较重要的可靠性指标之一，它的重要程度不亚于不可修系统中的可靠度。在工程应用中特别感兴趣的是稳态可用度。它表示部件或系统在长期运行中，大约有 A 的时间比例处于正常工作状态，所以它又可以称为系统的时间利用率。在煤矿生产中尤其在采煤工作面生产系统中它又称为开机率。