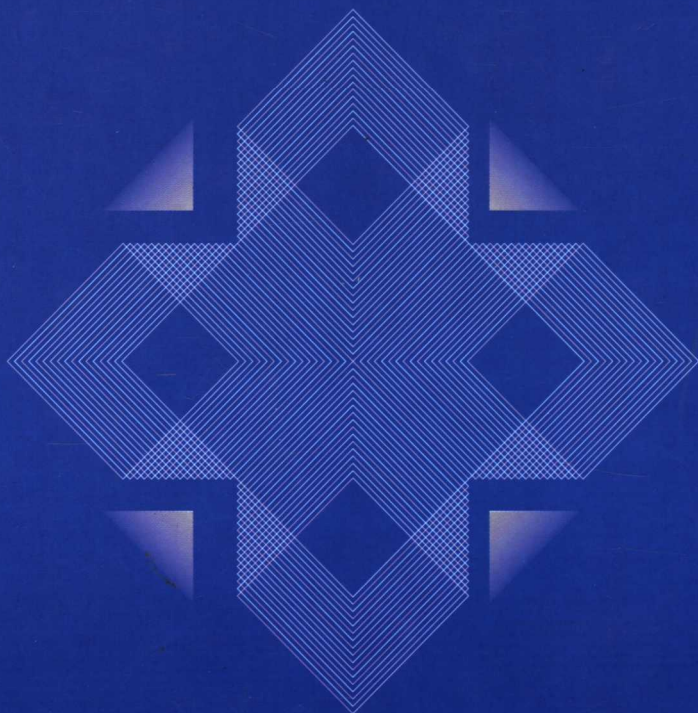


系统可靠性 与可用性分析方法

XITONG KEKAOXING YU KEYONGXING FENXI FANGF

金星 洪延姬 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

系统可靠性与 可用性分析方法

金星 洪延姬 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

针对工程中大型复杂系统可靠性与可用性分析方法的迫切需求,本书在精练地介绍可靠性和维修性的基本概念和指标基础上,重点研究了不可修复系统可靠性分析方法;可修复系统的可靠性和可用性分析方法。

本书通过工程应用背景突出的大量精选例题,专题讨论了单输入/多输出系统、多输入/单输出系统、考虑节点可靠度系统、重复单元系统的可靠性与可用性分析方法,并且对不可修复系统的可靠性与可修复系统的可靠性、可用性分析的马尔可夫模型方法与单元可用度相互独立的近似方法,进行了详细讨论。

本书内容安排合理、实例丰富、精讲多练、实用性强。可供高等院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

系统可靠性与可用性分析方法 / 金星, 洪延姬编著.

北京: 国防工业出版社, 2007. 2

ISBN 7-118-04882-8

I. 系... II. ①金... ②洪... III. ①系统可靠性 - 系统分析 - 分析方法 ②系统工程 - 可用性 - 系统分析 - 分析方法 IV. N945.17-34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 144789 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{3}{4}$ 字数 188 千字

2007 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

序

系统可靠性工程是一门新兴的边缘性学科,它是运用系统工程的观点和方法,针对产品的设计、生产、使用和管理过程,研究提高和控制产品可靠性的方法和途径,已经渗透到航空、航天、核能、机械等各个领域。

系统可靠性与可用性分析方法,是系统可靠性工程的核心内容之一。针对大型复杂系统可靠性与可用性分析需求,本书在精练地介绍可靠性和维修性的基本概念和指标基础上,重点研究了不可修复系统可靠性分析方法,可修复系统的可靠性和可用性分析方法。

本书具有以下突出特点:

(1) 通俗易懂、重基础。从基本概念讲起,文字叙述准确、简洁,只要求读者具备本科微积分和概率论知识。

(2) 系统性强、重深度。简明介绍基本概念基础上,系统、深入地讨论了重点和难点内容。内容由浅入深、前后呼应、环环相扣、深入浅出。

(3) 新颖性强、重前沿。专题讨论了单输入/多输出系统、多输入/单输出系统、考虑节点可靠度系统、重复单元系统等。

(4) 举一反三、重应用。通过精选的大量例题,讲解

分析方法，并且同一个例题分别采用不同分析方法，进行比较说明。

本书内容安排合理、概念清晰、侧重工程实际实用。可供高等院校师生和工程技术人员参考。

中国工程院院士
国家安全生产综合组组长
北京航空航天大学教授
钟群鹏
2006 年 9 月

前 言

近年来,随着工程系统和装备所采用技术越来越先进、越来越复杂,对系统可靠性与可用性分析方法,提出了越来越高的要求,体现在:(1)大型复杂系统可靠性与可用性分析方法的迫切需求。(2)应用、普及系统可靠性工程知识,使其转化为现实生产力。

为了适应以上要求,跟踪、消化、吸收和总结国内外相关理论与方法,结合多年来从事国防科研和研究生教学的经验与体会,根据国内工学本科数学教学体系现状,编著了《系统可靠性与可用性分析方法》,通过工程应用背景突出的大量精选例题,系统地讲解要点和难点内容,目的是奉献给读者一部重基础、重前沿、重应用,有理论深度的参考书籍。

本书第一章介绍可靠性的基本概念和指标;第二章介绍典型不可修复系统的可靠性分析方法;第三章介绍一般不可修复系统的可靠性分析方法;第四章介绍故障树分析方法;第五章介绍维修性的基本概念和指标与单元可用度;第六章介绍典型可修复系统可用性分析方法;第七章介绍一般可修复系统可用性分析方法。

本书得到了中国人民解放军总装备部“1153”人才工程专项经费资助。本书在编著过程中得到了中国人民解

放军装备指挥技术学院各级领导的大力支持,在此表示衷心感谢。作者的研究生文明、李俊美、张明亮、李倩、叶继飞、曹正蕊、翟英敏等同学也付出了大量劳动,特别是叶继飞和翟英敏同学认真核对了部分例题,在此表示感谢。

由于时间仓促、水平有限,书中难免存在许多缺点和不足,希望读者批评指正。

编著者

2006年6月

目 录

第一章 可靠性的基本概念和指标	1
1.1 可靠性的基本概念	1
1.1.1 寿命剖面与任务剖面	1
1.1.2 可靠性定义	1
1.1.3 不可修复系统和可修复系统	2
1.2 基本可靠性指标	2
1.2.1 可靠度和不可靠度	2
1.2.2 故障概率密度函数	4
1.2.3 故障率	5
1.2.4 可靠度、不可靠度、故障概率密度和故障率 之间关系	6
1.2.5 平均寿命	7
1.2.6 基本修复	8
1.3 常用分布函数	9
1.3.1 指数分布	9
1.3.2 正态分布	10
1.3.3 对数正态分布	11
1.3.4 威布尔分布	12
1.3.5 常用分布函数的图形特点	13
1.4 应用举例	17
第二章 典型不可修复系统的可靠性分析方法	22
2.1 典型不可修复系统的可靠性分析模型	22

2.1.1	串联模型	22
2.1.2	并联模型	23
2.1.3	n 中取 k 模型 (k/n 模型)	25
2.1.4	旁联模型	26
2.2	可靠性建模需要考虑的几个问题	27
2.2.1	共因故障	27
2.2.2	相关故障	29
2.2.3	多种故障模式的影响	32
2.3	应用举例	33
第三章	一般不可修复系统的可靠性分析方法	44
3.1	系统的网络图与可靠性框图	44
3.2	网络系统的基本概念和假设	46
3.3	网络系统的最小路集和最小割集	47
3.3.1	路集和最小路集	47
3.3.2	割集和最小割集	48
3.3.3	网络系统状态同最小路集和最小割集 之间的关系	48
3.4	最小路集与最小割集之间的相互转换	49
3.4.1	集合的运算法则	49
3.4.2	最小路集与最小割集之间的相互转换	50
3.5	求网络系统最小路集的联络矩阵方法	52
3.5.1	联络矩阵	52
3.5.2	联络矩阵的乘方规则	53
3.6	求大型网络系统最小路集的节点遍历法	56
3.6.1	节点遍历法的基本思想	56
3.6.2	大型网络系统最小路集的计算机算法 (节点遍历法)	58
3.7	采用最小路集计算网络系统的可靠度	61

3.8	网络系统可靠度计算的直接不变化算法	63
3.8.1	采用最小路集不变化计算系统可靠度	63
3.8.2	采用最小割集不变化计算系统可靠度	65
3.9	提高网络系统可靠性的方法	66
3.9.1	网络系统的可靠度计算	66
3.9.2	网络系统可靠度的敏感性分析	66
3.10	应用举例	69
第四章	故障树分析方法	89
4.1	故障树分析方法的基本概念	89
4.1.1	事件	89
4.1.2	部件	89
4.1.3	故障的分类	89
4.1.4	故障树常用事件符号	90
4.1.5	故障树中常用逻辑门符号	91
4.2	故障树的数学描述	92
4.2.1	故障树的结构函数	92
4.2.2	单调关联系统的故障树	93
4.3	故障树的规范化、简化	94
4.3.1	故障树的规范化	94
4.3.2	故障树的简化	96
4.4	故障树的定性分析	100
4.4.1	割集和最小割集	100
4.4.2	路集和最小路集	100
4.4.3	最小割集计算方法	100
4.4.4	最小路集计算方法	102
4.4.5	故障树的最小割集、最小路集与结构函数	104
4.5	故障树的定量分析	105

4.5.1	采用最小割集求顶事件发生的概率 (不可靠度)	105
4.5.2	采用最小路集求顶事件不发生的概率 (可靠度)	106
4.5.3	底事件重要度计算	110
4.5.4	故障树与可靠性框图	112
4.6	应用举例	114
第五章	维修性的基本概念和指标与单元可用度	126
5.1	维修性的基本概念	126
5.1.1	维修与维修性	126
5.1.2	使用过程中产品的不同经历	127
5.2	维修性指标	127
5.2.1	维修度函数	127
5.2.2	维修概率密度函数	128
5.2.3	维修率函数	128
5.3	维修性模型中常用的分布函数	130
5.3.1	正态分布	130
5.3.2	对数正态分布	131
5.3.3	指数分布	133
5.4	“正常→故障→正常→故障”过程中指标	134
5.4.1	有条件故障强度	135
5.4.2	无条件故障强度	135
5.4.3	平均故障次数	135
5.4.4	有条件修复强度	136
5.4.5	无条件修复强度	136
5.4.6	平均修复次数	136
5.4.7	可用度和不可用度	137
5.5	单元的可用度计算方法	138

5.5.1	可修复单元的故障频率、修复频率和可用度 计算模型	138
5.5.2	可修复单元的故障频率、修复频率、可用度 计算的拉普拉斯变换方法	139
5.5.3	可修复单元的故障频率、修复频率、可用度 计算的微分方程组方法	141
5.5.4	寿命和维修时间任意分布单元的故障频率、 修复频率、可用度变化规律	142
5.6	应用举例	146
第六章	典型可修复系统可用性分析方法	150
6.1	马尔可夫模型的基本假设	150
6.2	可修复单元的可用度	151
6.2.1	单元的可用度分析	151
6.2.2	求稳态可用度的简易方法	153
6.3	可修复串联系统的可用度	154
6.3.1	2个单元串联系统的可用度	154
6.3.2	n 个单元串联系统的可用度	156
6.4	可修复并联系统的可用度	158
6.4.1	相同分布单元并联系统的可用度	158
6.4.2	不同分布单元并联系统的可用度	161
6.5	可修复 k/n 系统的可用度	162
6.5.1	相同分布单元 $2/3$ 系统的可用度	162
6.5.2	相同分布单元 k/n 系统的可用度	163
6.6	可修复旁联系统的可用度	165
6.7	应用举例	169
第七章	一般可修复系统可用性分析方法	174
7.1	一般可修复系统可用性分析的马尔可夫模型	174

7.1.1	系统状态转移微分方程组	174
7.1.2	系统可用度、不可用度	177
7.1.3	系统可靠度	177
7.1.4	系统的平均首次故障前时间	178
7.1.5	系统的稳态指标	179
7.1.6	应用举例	181
7.2	系统可能状态和状态转移概率矩阵分析方法	185
7.2.1	寻找系统可能状态的方法	186
7.2.2	寻找单元可能状态的方法	187
7.2.3	通过系统状态转移图求系统状态转移 概率矩阵	188
7.2.4	通过单元状态转移概率求系统状态 转移概率矩阵	190
7.2.5	应用举例	192
7.3	单元可用度相互独立条件下计算系统可用度的 近似方法	200
7.3.1	可修复单元不可用度和可用度计算	200
7.3.2	可修复系统不可用度和可用度近似计算	201
7.3.3	可用度的敏感性分析	203
7.3.4	可修复系统故障频率和平均可用 时间(MUT)计算	203
7.3.5	应用举例	204
7.4	寻找系统可能状态的计算机算法	216
7.4.1	算法步骤	216
7.4.2	应用举例	217
参考文献		221

第一章 可靠性的基本概念和指标

工程中为了控制产品可靠性,在产品的设计、生产和使用等过程中,所采用的可靠性研究方法,就是工程可靠性方法。为了定量分析和判断产品可靠性高低,所采用的表征产品可靠性大小的特征量,称为可靠性指标。

工程可靠性中所指产品,就是研究对象,可以是一个单元,也可以是一个系统。

1.1 可靠性的基本概念

1.1.1 寿命剖面与任务剖面

寿命剖面:是指产品从制造到寿命终结或退出使用这段时间内所经历的全部事件和环境的时序描述。寿命剖面包含一个或多个任务剖面。通常把产品的寿命剖面分为后勤和使用两个阶段。后勤阶段包括采购、包装、运输、发送等内容,使用阶段包括运输、任务剖面、维修、报废等内容。

任务剖面:是指产品在规定任务这段时间内所经历的事件和环境的时序描述。一个产品完成不同任务时有不同任务剖面。

1.1.2 可靠性定义

可靠性:是指产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。产品不能完成规定功能,称为故障(或失效)。可靠性一般采用概率表示,也可以根据实际需要,采用平均无故障工作时间,或平均无故障里程(汽车、坦克等)表示。

基本可靠性:是指产品在规定条件下无故障的持续工作能力。是与寿命剖面相关的可靠性,反映了产品对维修和后勤保障的要求。

任务可靠性:是指产品在规定的任务剖面内完成规定功能的能力。是与任务剖面相关的可靠性。

为了提高任务可靠性,产品采用冗余单元,结构复杂,使得维修和后勤保障困难,即降低基本可靠性。如要提高基本可靠性,要求结构简单,组成单元少,就会降低任务可靠性。因此,对产品要进行基本可靠性和任务可靠性综合权衡。

产品正常工作是指产品在规定条件下和规定时间内,能够完成规定功能。产品故障(或不能正常工作)是指产品在规定条件下和规定时间内,不能完成规定功能。

1.1.3 不可修复系统和可修复系统

如果系统一旦出现故障,不再修复,作为报废处理,就是不可修复系统。如果系统出现故障,通过维修活动,将其恢复到正常工作状态,再使用,就是可修复系统。

可修复系统正常工作能力,不但与可靠性有关,还与维修性有关。一般产品的可靠性高,产品使用过程中不容易发生故障,因此,高可靠性是使产品性能得以持续发挥的保证。产品的维修性好,产品发生故障后,得以迅速恢复到正常工作状态。因此,不可修复产品要求可靠性要好;可修复产品要求可靠性和维修性都要好。

1.2 基本可靠性指标

1.2.1 可靠度和不可靠度

可靠度:是指产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的概率。

产品寿命 T 是随机变量,可靠度 $R(t)$ 为

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

式中: t 是规定时间。显然 t 时刻可靠度,是指产品在 $[0, t]$ 内完成规定功能(或正常工作)的概率,即 t 时间内正常工作的概率。

不可靠度 $F(t)$ 为

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

式中: t 是规定时间。显然 t 时刻不可靠度,表示产品在 $[0, t]$ 内发生故障(或不能正常工作)的概率,即 t 时间内发生故障的概率。
显然

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1.3)$$

对于有限样本,设考察的产品总数目为 N_0 ,经过 t 时间故障数目为 $r(t)$,则产品在 $[0, t]$ 内,可靠度和不可靠度的估计值为

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

$$F(t) = \frac{r(t)}{N_0}$$

如图 1-1 所示,随着时间增大,产品故障数目逐渐增多,可靠度由开始时 $R(0) = 1$ 逐渐降低至 $R(\infty) = 0$,不可靠度由开始时 $F(0) = 0$ 逐渐增加至 $F(\infty) = 1$ 。

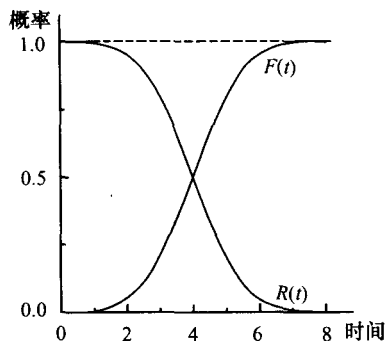


图 1-1 $R(t)$ 与 $F(t)$ 随时间变化示意图

〔例题1〕 取某产品 100 个,进行可靠性试验,当 $t = 30\text{h}$ 时故障产品数目 $r(30) = 40$ 个,试求 $t = 30\text{h}$ 时产品的可靠度和不可靠度。

解:根据可靠度和不可靠度的定义,可知

$$R(30) = \frac{100 - 40}{100} = 0.6$$

$$F(30) = \frac{40}{100} = 0.4$$

显然, $R(30)$ 表示全部 100 个正常产品,从整个时间集上考察,到 30h,正常产品存活概率为 0.6 (即存活概率为 60%); $F(30)$ 表示全部 100 个正常产品,从整个时间集上考察,到 30h,故障产品出现的概率为 0.4。

1.2.2 故障概率密度函数

故障概率密度函数 $f(t)$ 是不可靠度的导数

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

由于不可靠度 $F(t)$ 是不减函数,并且 $F(0) = 0$ 和 $F(\infty) = 1$,即不可靠度 $F(t)$ 是分布函数,所以 $f(t)$ 是概率密度函数。

对于有限样本,设考察产品总数目为 N_0 ,经过 t 时间故障数目为 $r(t)$,经过 $t + \Delta t$ 时间故障数目为 $r(t + \Delta t)$,则故障概率密度函数估计值为

$$f(t) = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{N_0 \Delta t} \quad (1.5)$$

即故障概率密度函数的物理意义,是表示产品总数目中,在任意时刻 t ,下一个单位时间内发生故障的概率。

〔例题2〕 取某产品 100 个,进行可靠性试验,当 $t = 30\text{h}$ 时故障产品数目 $r(30) = 40$ 个,当 $t = 31\text{h}$ 时故障产品数目 $r(31) = 42$ 个,试求 $t = 30\text{h}$ 时产品的故障概率密度。