



普通高校“十一五”规划教材

赵宇 杨军 马小兵 编著

可靠性数据分析教程



北京航空航天大学出版社

TB114.3
Z349

普通高校“十一五”规划教材

可靠性数据分析教程

赵宇 杨军 马小兵 编著

TB114.3
Z349

北京航空航天大学出版社

内容简介

本书在跟踪国内外可靠性数据分析理论和方法发展的基础上,结合国内可靠性工程的实践经验,从工程角度出发,对可靠性数据分析的理论、方法和应用,进行了系统的整理、编写。

本书共分3篇19章。在阐述可靠性数据分析所需的基本概念与统计学基础知识的基础上,讲述了针对单元产品的可靠性评估,包括参数方法、非参数方法、无失效数据分析与Bayes方法等;最后全面阐述了系统可靠性综合评估方法,包括系统可靠性建模、可靠性增长数据分析、系统可靠性评估的经典统计方法与WCF方法。

本书着重强调了可靠性数据分析理论方法与工程实际的紧密结合,力求简洁实用,可供高等院校本科生和研究生学习使用,也可供工程技术人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性数据分析教程/赵宇,杨军,马小兵编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.6
ISBN 978-7-81124-554-7

I. 可… II. ①赵…②杨…③马… III. 可靠性数据—分析—高等学校—教材 IV. TB114.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第038711号

可靠性数据分析教程

赵宇 杨军 马小兵 编著
责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhp@263.net

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:21.75 字数:487千字
2009年6月第1版 2009年6月第1次印刷 印数:3000册
ISBN 978-7-81124-554-7 定价:36.00元

前 言

可靠性数据分析是贯穿于产品研制、试验、生产、使用和维修全过程的一项基础性工作,在可靠性工程中始终发挥着重要作用。因此,编写本书有着重要的价值。

本书从工程角度出发,在讲清楚基础概念的基础上,力求简洁实用,同时涵盖国内外在该领域的重要进展。全书按照数据产生—收集—分析—单元可靠性评估—系统可靠性评估的评估过程编写。本书共分3篇19章。第1篇包括第1~5章,介绍可靠性的基本概念、可靠性数据的收集方法与常用的寿命分布等。第2篇包括第6~15章,讲述针对单元产品的可靠性评估:第6~8章介绍连续性分布产品的可靠性评估,包括指数分布、威布尔分布、正态分布与对数正态分布;第9章介绍可靠性数据分析中常用的分布检验方法;第10章介绍针对离散产品的可靠性数据分析;第11章介绍可靠性数据分析的非参数方法;第12章分析无失效数据的可靠性;第13章介绍加速寿命试验的数据分析;第14章扼要介绍耐久试验数据分析与寿命评估;第15章介绍可靠性评估的贝叶斯方法。第3篇包括第16~19章,全面阐述系统可靠性综合评估与数据分析:第16章介绍系统可靠性模型;第17章介绍针对可靠性增长试验的数据分析;第18章介绍系统可靠性评估的经典统计方

法;第 19 章介绍系统可靠性评估的 WCF 方法。为便于理解和应用,各章节均有例题和习题,书后附有数据分析时常用的表格。

本书第 1~5 章由赵宇教授编写,第 6~13 章与第 15~19 章及附录由杨军讲师编写,第 14 章及习题由马小兵讲师编写。全书由赵宇教授主编,韩於羹教授主审。在本书编写过程中,得到了北京航空航天大学贺国芳教授、许海宝教授、黄敏副教授,中国科学院数学与系统科学研究院于丹研究员、北京大学概率统计系房祥忠教授的指导和帮助,李进、洪东跑、熊小云、申丽娟等同学为本书部分章节的修改做了很多工作,在此一并致谢。

本书可供高等院校本科生和研究生学习使用,也可供工程技术人员学习与参考。由于作者水平有限,若书中存在缺点和错误,望读者和专家不吝指正。

作者

2009 年 3 月

目 录

第 1 篇 可靠性数据分析基础

第 1 章 绪 论	1
1.1 可靠性数据分析的目的和意义	1
1.1.1 什么是可靠性数据分析	1
1.1.2 可靠性数据分析的目的和任务	2
1.1.3 可靠性数据分析的工程意义	2
1.2 可靠性数据分析的内容和方法	3
1.2.1 可靠性数据分析的主要内容	3
1.2.2 可靠性数据分析的基本方法	5
习 题.....	6
第 2 章 常见的可靠性指标及其概率解释	7
2.1 可靠度和可靠寿命	7
2.2 失效分布函数和平均寿命	8
2.2.1 失效分布函数	8
2.2.2 平均寿命	9
2.3 失效率.....	10
2.3.1 失效率的概念.....	10
2.3.2 失效率的性质.....	11
2.3.3 失效率反映的产品故障规律.....	12
2.4 维修性数量指标.....	13
习 题	14
第 3 章 可靠性数据的收集	16
3.1 可靠性数据的来源及特点.....	16
3.1.1 收集可靠性数据的目的.....	16
3.1.2 可靠性数据的来源.....	16
3.1.3 可靠性数据的特点.....	17
3.2 试验数据和现场数据.....	17

3.2.1	试验数据	17
3.2.2	现场数据	19
3.3	可靠性数据的收集要求和程序	21
3.3.1	数据的需求	21
3.3.2	数据的质和量	21
3.3.3	可靠性数据的收集程序和方法	22
3.4	故障数据的判定及记录	24
3.4.1	故障及关联故障	24
3.4.2	故障模式及失效机理	25
3.4.3	故障影响及等级划分	26
3.5	可靠性数据的利用及效果	27
习 题		28
第4章	可靠性数据的初步整理分析	29
4.1	直方图	29
4.2	样本的经验分布函数	33
4.2.1	定 义	33
4.2.2	经验分布函数的计算	33
4.3	随机截尾寿命试验的可靠度函数计算	36
4.3.1	用残存比率法计算产品的可靠度	36
4.3.2	用平均秩次法计算经验分布函数	39
习 题		41
第5章	常用的寿命及故障分布	43
5.1	二项分布及有关分布	44
5.1.1	二项分布	44
5.1.2	超几何分布	45
5.1.3	负二项分布	45
5.2	指数分布及有关分布	46
5.2.1	泊松分布	46
5.2.2	指数分布	46
5.2.3	伽马分布	49
5.3	正态分布及有关分布	50
5.3.1	正态分布	50
5.3.2	对数正态分布	53
5.4	威布尔分布	54

5.4.1	推导及物理背景	54
5.4.2	性 质	55
5.5	混合分布与竞争性故障模型	58
5.5.1	混合分布	58
5.5.2	竞争性故障模型	60
5.6	统计量的分布	62
5.6.1	顺序统计量的分布	62
5.6.2	样本经验分布函数 $F_n(t)$ 的分布	64
5.6.3	各种截尾样本的联合分布	64
5.6.4	常用的线性型统计量的分布	65
习 题		67

第 2 篇 单元可靠性评估

第 6 章	指数分布的统计推断	69
6.1	指数分布参数的极大似然估计	69
6.1.1	单参数指数分布的极大似然估计	69
6.1.2	两参数指数分布的极大似然估计	76
6.2	指数分布参数的区间估计	78
6.2.1	定数截尾试验子样的参数估计	78
6.2.2	定时截尾试验子样的参数估计	80
6.2.3	定时间隔测试试验子样的参数估计	81
6.2.4	两参数指数分布的区间估计	82
习 题		83
第 7 章	威布尔分布的统计推断	85
7.1	参数的点估计	85
7.1.1	参数的极大似然估计	85
7.1.2	定数截尾试验下参数的线性估计	86
7.1.3	参数的最小二乘估计	91
7.1.4	威布尔分布的图估计	92
7.2	参数的区间估计	103
7.2.1	基于线性估计的区间估计	103
7.2.2	基于极大似然估计的区间估计	104
习 题		108

第 8 章 正态分布与对数正态分布的统计推断	109
8.1 参数的点估计	109
8.1.1 参数的极大似然估计	109
8.1.2 定数截尾情形下参数的线性估计	109
8.1.3 参数的最小二乘估计	112
8.1.4 参数的图估计——正态概率纸与对数正态概率纸	114
8.2 参数的区间估计	117
8.2.1 正态分布的参数区间估计	117
8.2.2 对数正态分布的参数区间估计	120
习 题	121
第 9 章 分布的拟合优度检验	122
9.1 皮尔逊 χ^2 检验	122
9.2 柯尔莫哥洛夫检验	126
9.2.1 完全样本情形的柯尔莫哥洛夫检验	126
9.2.2 截尾样本情形的柯尔莫哥洛夫检验	127
9.3 指数分布检验	131
9.3.1 F 检验法	132
9.3.2 χ^2 检验法	133
9.4 威布尔分布检验	134
9.4.1 F 检验法	134
9.4.2 χ^2 检验法	136
9.5 正态分布检验	137
9.5.1 Shapiro - Wilk 检验	137
9.5.2 偏峰度检验	138
9.6 分布的似然比检验	139
9.6.1 区分正态分布和指数分布的检验	140
9.6.2 区分对数正态分布和威布尔分布的检验	142
习 题	144
第 10 章 几种离散型分布的统计推断	145
10.1 二项分布的统计分析	145
10.1.1 参数 p 的估计	145
10.1.2 可靠度的区间估计	146
10.2 超几何分布的统计分析	148
10.3 泊松分布的统计分析	148

习 题	149
第 11 章 非参数统计推断	150
11.1 可靠度的非参数估计	150
11.1.1 贝塔分布法	150
11.1.2 F 分布法	151
11.2 分布分位数的非参数估计	152
11.2.1 分位数的点估计	152
11.2.2 分位数的区间估计	153
11.3 Bootstrap 方法	154
11.3.1 Bootstrap 方差估计	155
11.3.2 Bootstrap 区间估计	155
11.4 估计生存函数的非参数方法	156
11.4.1 寿命表法	156
11.4.2 乘积限估计(PL 估计)	157
习 题	159
第 12 章 无故障数据分析	160
12.1 指数分布下无故障数据的分析	161
12.2 威布尔分布下无故障数据的分析	162
12.2.1 形状参数已知时的可靠性分析	162
12.2.2 形状参数未知时的可靠性分析	164
12.3 正态分布和对数正态分布下无故障数据的分析	166
12.3.1 正态分布	166
12.3.2 对数正态分布	167
12.4 分布未知时无故障数据的分析	169
习 题	170
第 13 章 加速寿命试验及其统计分析	171
13.1 基本概念和基本模型	171
13.1.1 加速寿命试验的类型	171
13.1.2 加速模型与加速系数	172
13.2 恒定应力加速寿命试验	176
13.2.1 指数分布场合下恒加试验数据的统计分析	176
13.2.2 威布尔分布场合下恒加试验数据的统计分析	184
13.2.3 对数正态分布场合下恒加试验数据的统计分析	187
13.3 步进应力加速寿命试验	188

13.3.1	指数分布场合下步加试验数据的统计分析	189
13.3.2	威布尔分布场合下步加试验数据的统计分析	190
13.3.3	对数正态分布场合下步加试验数据的统计分析	192
习 题		194
第 14 章	耐久试验数据分析与寿命评估	196
14.1	极小样本情形下寿命分析的工程经验法	196
14.2	参数蜕化情况下的使用寿命分析	198
14.3	裂纹扩展寿命分析	200
14.4	疲劳寿命分析	202
习 题		203
第 15 章	可靠性评估的 Bayes 方法	205
15.1	Bayes 统计简介	205
15.1.1	Bayes 统计的基本出发点	205
15.1.2	先验分布与后验分布	206
15.1.3	Bayes 推断	212
15.2	可靠性的 Bayes 评估	216
15.2.1	二项分布的 Bayes 估计	216
15.2.2	指数分布的 Bayes 估计	217
15.2.3	系统可靠性 Bayes 评估的基本流程	218
习 题		219

第 3 篇 系统可靠性评估

第 16 章	系统可靠性模型	220
16.1	串联系统	220
16.2	并联系统	221
16.3	表决系统	221
16.4	储备系统	222
16.5	单调系统	223
16.6	网络系统	225
习 题		225
第 17 章	可靠性增长数据的分析	227
17.1	可靠性增长的趋势检验	227
17.1.1	趋势检验的图示法	227

17.1.2	趋势检验的 Laplace 法	228
17.2	可靠性增长的 Duane 模型	230
17.2.1	Duane 模型的数学描述	230
17.2.2	Duane 模型参数的图估计	231
17.2.3	Duane 模型参数的最小二乘估计	231
17.2.4	模型的拟合优度检验	232
17.2.5	多台系统同步增长的情形	233
17.3	可靠性增长的 AMSAA 模型	234
17.3.1	AMSAA 模型的数学描述	234
17.3.2	定数截尾试验	234
17.3.3	定时截尾试验	236
17.3.4	模型的拟合优度检验	237
17.4	可靠性增长的其他常用模型	238
17.4.1	Gompertz 模型	238
17.4.2	Lloyd - Lipow 模型	239
17.4.3	EDRIC 模型	240
习 题	242
第 18 章	系统可靠性评估的经典统计方法	243
18.1	成败型数据情形下系统的可靠性	243
18.1.1	成败型数据情形下系统可靠性的精确置信限	244
18.1.2	成败型数据情形下系统可靠性的近似置信限	247
18.2	单元寿命服从指数分布情形下系统的可靠度	249
18.2.1	有替换定总时寿命试验	250
18.2.2	无替换定数截尾寿命试验	251
18.3	混合数据情形下系统的可靠度	253
18.3.1	MMLII 法	253
18.3.2	不同分布类型试验数据的转换	254
习 题	255
第 19 章	系统可靠性综合评估的 WCF 法	256
19.1	预备知识	256
19.1.1	累量及其性质	256
19.1.2	分位点的 Cornish - Fisher 展开	257
19.1.3	Fiducial 方法	258
19.2	系统可靠性综合评估的框架	258

19.2.1	综合评估的基本模型	258
19.2.2	系统可靠性评估 CF 方法	260
19.2.3	系统可靠性评估 WCF 方法	260
19.3	设备级数据处理方法	262
19.3.1	成败型设备试验数据的处理方法	262
19.3.2	指数型设备试验数据的处理方法	262
19.4	系统可靠性评估部分 WCF 方法	263
19.4.1	系统可靠性综合评估部分 WCF(1)方法	263
19.4.2	系统可靠性综合评估部分 CF 方法	265
19.4.3	系统可靠性综合评估部分 WCF(2)方法	265
习 题		267
附录 A	统计学的基本知识	269
A.1	样本及其统计量	269
A.1.1	总体、样本、简单随机样本	269
A.1.2	统计量和样本矩	269
A.1.3	顺序统计量	270
A.2	点估计	270
A.2.1	矩估计	271
A.2.2	极大似然估计	271
A.2.3	图估计	272
A.2.4	最小二乘估计	272
A.3	估计量的特征及评价标准	275
A.3.1	无偏估计	275
A.3.2	最小方差无偏估计	275
A.3.3	最小均方误差估计	276
A.3.4	相合估计	276
A.3.5	最优线性无偏估计	276
A.3.6	加权最小二乘估计	277
A.3.7	最优线性不变估计	278
A.3.8	简单线性无偏估计	279
A.3.9	简单线性不变估计	281
A.4	区间估计	281
附录 B	相关计算用表	283
附表 B.1	最优线性估计用表(极值分布、威布尔分布)	283

附表 B. 2	简单线性无偏估计表(极值分布、威布尔分布)	289
附表 B. 3	最好线性无偏估计表(正态分布、对数正态分布)	292
附表 B. 4	简单线性无偏估计表(正态分布、对数正态分布)	298
附表 B. 5	W 分布的分位数表	302
附表 B. 6	V 分布的分位数表	304
附表 B. 7	超几何分布单侧置信下限表	306
附表 B. 8	泊松分布均值的置信区间	307
附表 B. 9	柯尔莫哥洛夫检验的临界值表	308
附表 B. 10	经验分布 $F_n(t_i)$ 的置信限	317
附表 B. 11	计算统计量 Z 必需的系数 $\alpha_{k,n}$	321
附表 B. 12	统计量 Z 的 p 分位数 Z_p	324
附表 B. 13	经验修正系数 K, K_1, K_0 表	325
附表 B. 14	相关系数 $\rho=0$ 时, 经验相关系数 $\hat{\rho}$ 的临界值 $\hat{\rho}_\alpha$ 表	326
附表 B. 15	Cramer - Von Mises 统计量 C_M^2 的临界值 $C_{M,\alpha}^2$ 表	327
参考文献	328

第 1 篇 可靠性数据分析基础

第 1 章 绪 论

1.1 可靠性数据分析的目的和意义

1.1.1 什么是可靠性数据分析

可靠性是产品在规定的时间内和规定的条件下,完成规定功能的能力,而这种能力的表示通常归结于一个概率值。对产品的可靠性仅进行一般意义上的定性分析远远不能满足工程需求,必须进行可靠性的定量分析。事实上,当给出可靠性的各种定量表示后,就有可能对产品的可靠性提出明确而统一的要求,即产品的各种可靠性指标要求。这包括两方面的含义:其一是根据这种统一的要求及产品的需要和可能,在设计和生产时就考虑可靠性因素,利用各种方法分析得出结论,如利用 FMECA、FTA、可靠性预计和分配等,这是演绎的方法;其二是当产品生产出来以后,为获知产品的可靠性,可按一定的试验方法进行试验,根据观测数据评价它们的可靠性,这是归纳的方法,可靠性数据分析就是从这个角度进行研究。

可靠性的定量表示有其自身的特点。首先它很难只用一个量来表示,实际上,可靠性是产品全部的可靠性数量指标的总称。在不同的场合,应使用不同的数量指标来表示产品的可靠性。如产品从开始使用到某一时刻 t 这段时间,维持规定功能的能力就可用一个称为可靠度的量来表示,这一量愈大,表示产品完成规定功能的能力愈强,即产品愈可靠。因此,可靠度可作为表示产品可靠性的一个数量指标。但是并非任何场合使用这个指标都方便,对元器件来说,往往用寿命这个指标更直观,即产品从开始使用到丧失规定功能这段时间的长短;而对一个可修复的产品,则关心它两次故障间工作时间有多长。有时人们需要了解产品在某个瞬间的失效率有多大。当然还有许多其他可靠性指标,所有这些都有一一给予定量表示。

可靠性定量表示的另一特点是它的随机性。对一个特定的产品来说,在某个特定时刻只能处于故障或不故障这两种状态,不存在任何其他的中间状态,因此产品的规定功能或判断产

品是否有故障的技术指标必须十分明确。由概率论可知,在一定条件下可能发生也可能不发生的事件称为随机事件。“一个产品在规定的时间内不故障”就是一个随机事件,随机事件的发生与否带有随机性,因此在讨论可靠性的数量特征时,就必须使用概率论和数理统计的方法,确定产品的可靠性数量指标,最后都归结为统计推断问题。

需要注意,在本书中经常用到“单元”和“系统”两个词汇。一般来说,“单元”是指作为单独研究或单独试验对象的任何元器件、零件,甚至一台完整的设备;而“系统”是指设备、技能以及能担当或保障某项任务执行的各因素的总和。本书在使用“单元”时,是泛指的词,它可以指系统、设备,也可以指组成系统或设备的单元;而在使用“系统”时,不仅包括了组成系统的各单元,还包括了各单元间的可靠性结构。

综上,可靠性数据分析是通过收集系统或单元产品在研制、试验、生产和维修中所产生的可靠性数据,并依据系统的功能或可靠性结构,利用概率统计方法,给出系统的各种可靠性数量指标的定量估计。它是一种既包含数学和可靠性理论,又包含工程分析处理的方法。

1.1.2 可靠性数据分析的目的和任务

可靠性数据分析贯穿于产品研制、试验、生产、使用和维修的全过程,进行可靠性数据分析的目的和任务也是根据在产品研制、试验、生产、使用和维修等过程中所开展的可靠性工程活动的需要而决定的。在研制阶段,可靠性数据分析用于对所进行的各项可靠性试验的试验结果进行评估,以验证试验的有效性。如进行可靠性增长试验时,应根据试验结果对参数进行评估,分析产品的故障原因,找出薄弱环节,提出改进措施,以使产品可靠性得到逐步增长。研制阶段结束进入生产前,应根据可靠性鉴定试验的结果,评估其可靠性水平是否达到设计的要求,为生产决策提供管理信息。在投入批生产后,应根据验收试验的数据评估可靠性,检验其生产工艺水平能否保证产品所要求的可靠性水平。在投入使用的早期,应特别注意对于使用现场可靠性数据的收集,及时进行分析与评估,找出产品的早期故障及其主要原因,进行改进或加强质量管理。加强可靠性筛选,可大大降低产品的早期故障率,提高产品的可靠性。使用中应定期对产品进行可靠性分析和评估,对可靠性低下的产品进行改进,使之达到设计所要求的指标。

1.1.3 可靠性数据分析的工程意义

随着可靠性、维修性工作的深入开展,可靠性数据分析工作越来越显示出其重要的价值和作用。在现代武器装备的质量中,可靠性占有突出的重要地位。可靠性只能通过设计与生产过程的可靠性活动获得,它是可靠性设计、可靠性试验和可靠性管理的结果。可靠性数据分析给可靠性设计和可靠性试验提供了基础,为可靠性管理提供了决策依据。可靠性数据分析的任务是定量评估产品可靠性,由此提供的信息,将作为“预防、发现和纠正可靠性设计以及元器

件、材料和工艺等方面缺陷”的参考,这是可靠性工程的重点,因而,借助有计划、有目的地收集产品寿命周期各阶段的数据,经过分析,发现产品可靠性的薄弱环节,进行分析、改进设计,可以使产品的质量与可靠性水平不断改进和提高。所以可靠性数据的收集和分析在可靠性工程中具有重要地位。

在产品的寿命周期中,可靠性数据的收集与分析伴随着各阶段可靠性工程活动而进行。在工程研制阶段,需要收集和分析同类产品的可靠性数据,以便对新产品的的设计进行可靠性预测,这种预测有利于进行方案的对比和选择。设计阶段的可靠性研究和试验产生的数据用于分析产品的初始可靠性、故障模式和可靠性增长规律,并为产品的改进和定型提供科学的依据。生产阶段为对产品的质量进行控制,必须定期进行抽样检查与试验,来确定产品合格与否,从而指导生产,保证质量。由于生产阶段产品数量和试验数量大大增加,此时所进行的可靠性数据的分析和评估,反映了产品的设计和制造水平;而使用阶段收集和分析的可靠性数据,对产品的设计和制造的评价最权威,因为它反映的使用及环境条件最真实,参与评估的产品数量较多,其评估结果反映了产品趋向成熟期或到达成熟期时的可靠性水平,是该产品可靠性工作的最终检验,也是今后开展新产品的可靠性设计和改进原产品设计的最有价值的参考。由此看来,可靠性数据分析在可靠性工程各项活动中是一项基础性的工作,始终发挥着重要作用。

1.2 可靠性数据分析的内容和方法

1.2.1 可靠性数据分析的主要内容

在工程中,进行可靠性数据分析的主要内容有以下几点。

(1) 单元可靠性的数据分析和可靠性评估

单元是系统的基础,同时,系统也可看作一个单元。因此,要进行系统的数据分析和可靠性评估,首先要进行单元的可靠性数据分析。其基本出发点是,根据单元的试验数据,运用各种统计推断的方法,给出单元的可靠性水平的定量估计;若单元的可靠性符合某种分布规律(如二项、指数、正态、对数正态、威布尔分布等),应给出分布参数的估计。这里有一点须注意,单元的寿命试验数据往往是截尾样本,不是完全样本,其统计推断比较困难。

(2) 系统可靠性评估与综合

对系统可靠性的评估,如果像单元一样,根据系统的试验数据来进行统计推断,在工程上会存在很大困难,甚至是不可能的。因为在工程中,系统试验一般符合金字塔式程序,如图1.1所示。

由此可见,一般“级”越高,试验的工程难度越大,所需费用越高,因此“级”越高,试验数量越少,全系统的试验数量就更少。要评定系统可靠性,必然面临信息量不足的问题。这就需要