

可靠性·维修性·保障性技术丛书 ⑤

丛书主编 王自力

RMTS

可靠性数据分析

Data Analysis of Reliability

主编 赵宇

Reliability
Maintainability
Supportability



国防工业出版社

National Defense Industry Press

可靠性·维修性·保障性技术丛书

可靠性数据分析

Data Analysis of Reliability

主 编 赵 宇

副主编 杨 军 马小兵



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书从工程角度出发,按照数据产生—收集—初步整理分析—单元可靠性数据分析—系统可靠性数据分析的过程编写,可靠性数据分析方法以经典统计方法为主,兼顾贝叶斯方法以及一些成熟的工程经验方法。在阐述可靠性数据分析的基本概念、常用参数和分布的基础上,梳理了可靠性数据收集的程序和方法以及故障判据与统计原则;通过数据初步整理分析、分布检验和参数估计等,系统阐述了单元产品可靠性数据分析方法;最后,全面讲述了系统可靠性数据分析方法。为便于理解和应用,对每种方法,均给出具体示例说明;各章均配有小结,对各种方法的优缺点、适用范围和注意事项等进行系统的梳理和总结,为工程人员合理进行方法选取提供指导。

本书可供从事可靠性工作的工程技术人员参考和使用,也可作为相关专业大学本科和研究生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性数据分析/赵宇主编. —北京:国防工业出版社,
2011.4

(可靠性·维修性·保障性技术丛书)

ISBN 978-7-118-07285-3

I. ①可... II. ①赵... III. ①可靠性数据—分析
IV. ①TB114.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第009856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100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 25 字数 446千字

2011年4月第1版第1次印刷 印数1—4000册 定价62.00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

《可靠性·维修性·保障性技术丛书》 编辑委员会

主任委员 王自力

副主任委员 康 锐 屠庆慈

委 员 (按姓氏笔划排序)

于永利 马 麟 石君友 田 仲 付桂翠

吕 川 吕明华 朱小东 刘 斌 刘春和

阮 镰 孙有朝 孙宇锋 李建军 宋晓秋

陆民燕 陈 新 罗汉生 金惠华 房祥忠

赵 宇 赵廷弟 姜同敏 章国栋 曾天翔

曾声奎 曾曼成 徐居明 戴慈庄



1995年,国防科技及教育界著名专家杨为民教授组织编辑出版了国内第一套《可靠性·维修性·保障性丛书》,对推动武器装备质量观念的转变,提高武器装备的可靠性、维修性、保障性水平,发挥了重要的推动作用。

15年后的今天,树立现代质量观,持续提高可靠性、维修性、保障性水平,已成为武器装备建设与国防科技发展中的共识,特别是《武器装备质量管理条例》的颁布实施,表明可靠性、维修性、保障性在现代质量观中具有战略性、全局性和基础性的地位和作用,高可靠、长寿命、好维修、易测试、能保障、保安全已成为武器装备研制、生产和使用中的普遍要求,可靠性、维修性、保障性工程活动已全面进入武器装备寿命周期各阶段,为提高武器装备的效能、降低寿命周期费用发挥了不可替代的作用。

在上述背景下,在武器装备建设与国防科技发展中,无论在技术上还是在管理上,都对可靠性、维修性、保障性提出了更高的要求。为适应这种新形势,我们组织有关专家重新编辑出版了这套《可靠性·维修性·保障性技术丛书》,共12册,以满足广大工程技术和管理人员的迫切需求。

本套丛书认真总结了15年来国内外武器装备可靠性、维修性、保障性最新实践经验,全面吸收了我国在预先研究和技术基础研究领域取得的主要研究成果,从装备、系统、设备、元器件等多个产品层次和硬件、软件等不同产品类别,可靠性、维修性、测试性、保障性、安全性等多种质量特性,以及论证、研制、生产和使用与保障等寿命周期各阶段,全方位地论述了相关领域的基本概念、技术方法、实践经验及发展方向,具有系统性、实用性和前瞻性,从而有助于读者全面、系统地了解 and 掌握该项技术的全貌。本套丛中阐述的可靠

性、维修性、保障性理论与技术,对武器装备和一般民用工业产品均具有普遍的适用性。

《可靠性·维修性·保障性技术丛书》是一套理论与工程实践并重的著作,它不仅可以为广大工程技术和管理人员提供有用的指导和参考,也可作为有关工程专业本科生、研究生的教学参考书。我们相信,这套丛书的出版,对我国武器装备可靠性、维修性、保障性工程的全面深入发展将起到重要的推动和促进作用。

丛书编辑委员会

2010年12月

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。随着我国型号可靠性工作的广泛深入开展,对可靠性数据分析有着非常迫切的需求,因此,编写该书具有十分现实的工程价值。

本书是《可靠性·维修性·保障性技术丛书》之一,主要供从事可靠性工作的工程技术人员参考和使用。因此,本书按照数据产生—收集—初步整理分析—单元可靠性数据分析—系统可靠性数据分析的过程编写,以叙述清楚数据分析方法、满足工程实用需求为目的,不深究各种方法的理论推导。目前,工程中普遍使用的是基于经典统计的可靠性数据分析方法,因此,在具体方法上以经典统计方法为主,兼顾贝叶斯方法与一些成熟的工程经验方法。为便于工程人员使用,对每种方法,均给出具体示例说明;并对不同方法的优缺点、适用范围和注意事项等进行了系统的比较、梳理和总结,在各章的小结中给出,指导工程人员合理进行方法取舍。

全书共分 13 章。第 1 章绪论,对可靠性数据分析的目的、发展现状、数据分析的基本方法和流程进行概述;第 2 章可靠性数据分析的基本概念,介绍常用可靠性参数和常用可靠性分布;第 3 章可靠性数据收集与初步整理分析,总结可靠性数据收集的来源、收集流程和方法,阐述故障的概念、判据和故障统计原则等;给出故障的主次和因果分析、初步分析故障数据的分布并粗略给出产品的可靠度;第 4 章分布类型检验,给出各种常用的分布检验方法,帮助确定数据的分布形式;第 5 章连续型分布的参数估计,针对连续型产品,给出寿命分布参数的点估计和区间估计,进而给出可靠性参数的数据分析;第 6 章离散型分布的参数估计,针对常用的二项分布和泊松分布等常用离散分布,给出可靠性数据分析方法;第 7 章无故障数据情形的可靠性数据分析,对常用的指数、威布尔、正态和对数正态分布,在没有故障的数据情形下,给出对应的可靠性数据分析方法;第 8

章加速寿命试验及其统计分析,阐述常用的恒加、步进与序进加速应力下,针对常用分布的加速寿命试验数据分析方法;第9章基于退化数据的可靠性数据分析,结合最近退化数据分析的研究与工程应用,从退化和加速退化两个方面介绍相应的数据分析方法;第10章基于贝叶斯方法的可靠性数据分析,在扼要介绍贝叶斯方法的基础上,介绍常用分布的基于贝叶斯理论的可靠性数据方法;第11章基于可靠性增长数据的可靠性数据分析,从增长趋势检验、常用可靠性增长模型以及及时纠正和延缓纠正两个方面进行系统阐述;第12章耐久性数据分析,阐述了耐久性评估中常用的安全系数法、约束参数法与累计损伤寿命数据分析;第13章系统可靠性综合数据分析,阐述常用的根据设备数据进行系统可靠性数据分析方法,包括精确方法、近似方法、贝叶斯方法与蒙特卡罗方法。

本书第1、2、3章由赵宇编写,第4至第7、10、11、13章及附录由杨军编写,第8、9、12章由马小兵编写。全书由赵宇统稿,由房祥忠与刘春和两位专家主审。

在本书编写过程中,得到了北京航空航天大学屠庆慈教授、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等专家的指导和帮助;李进、洪东跑、申丽娟、刚婷婷、朱欣、徐姜楠、李涛、刘震宇、李大宇、王晋忠、王亭亭等为本书部分章节的计算、修改和打印做了很多工作,在此一并致谢!

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和谬误,诚望读者和专家不吝指正。

作者

2010年8月

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 可靠性数据分析概述	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	3
1.1.4 可靠性数据分析的利用及效果	3
1.2 可靠性数据分析的发展和现状	4
1.2.1 国外可靠性数据分析的发展和现状	4
1.2.2 国内可靠性数据分析的发展和现状	8
1.3 可靠性数据分析的基本方法和流程	8
1.3.1 可靠性数据分析方法的分类	8
1.3.2 可靠性数据分析方法的选取原则	10
1.3.3 可靠性数据分析的流程	13
1.4 小结	13
第 2 章 可靠性数据分析的基本概念	14
2.1 可靠性数据分析的概率统计基础	14
2.1.1 事件和概率	14
2.1.2 随机变量与概率分布	15
2.1.3 样本及统计量	16
2.2 可靠性常用参数	18
2.2.1 常用的可靠性指标	18
2.2.2 基本可靠性参数	31
2.2.3 任务可靠性参数	32
2.2.4 耐久性参数	32
2.3 可靠性工程中的常用分布	33
2.3.1 离散型分布	34

2.3.2	连续型分布	36
2.4	小结	55
第3章	可靠性数据收集与初步整理分析	56
3.1	可靠性数据的收集	56
3.1.1	可靠性数据的来源及特点	56
3.1.2	试验数据和现场数据	58
3.1.3	可靠性数据的收集要求和程序	61
3.2	故障判定与记录	64
3.2.1	故障及其分类	64
3.2.2	故障判据	69
3.2.3	故障统计原则	70
3.3	可靠性数据的初步整理分析	71
3.3.1	故障数据的主次及因果分析	71
3.3.2	数据分析的直方图	75
3.3.3	样本的经验分布函数	80
3.3.4	截尾数据下可靠度函数的计算方法	84
3.4	小结	90
第4章	分布类型检验	91
4.1	皮尔逊 χ^2 检验	92
4.2	柯尔莫哥洛夫检验	95
4.2.1	完全样本情形的柯尔莫哥洛夫检验	95
4.2.2	截尾样本的柯尔莫哥洛夫检验	97
4.3	指数分布的检验	100
4.3.1	F 检验	101
4.3.2	χ^2 检验	102
4.4	威布尔分布的检验	103
4.4.1	F 检验	103
4.4.2	χ^2 检验	105
4.5	正态分布检验	106
4.5.1	图检验	106
4.5.2	偏峰度检验	109
4.5.3	Shapiro - Wilk 检验	111
4.5.4	Epps - Pulley 检验	112
4.6	分布的似然比检验	113

4.6.1	区分正态分布与指数分布的检验	114
4.6.2	区分对数正态分布与威布尔分布的检验	116
4.7	数据分析中寿命分布的选择	118
4.8	小结	119
第5章	连续型分布的参数估计	120
5.1	参数估计的基本知识	120
5.1.1	参数的点估计	120
5.1.2	点估计优劣的评价标准	125
5.1.3	参数的区间估计	127
5.2	指数分布的参数估计	129
5.2.1	无替换定数截尾试验的参数估计	129
5.2.2	无替换定时截尾试验的参数估计	132
5.2.3	有替换定数截尾试验的参数估计	134
5.2.4	有替换定时截尾试验的参数估计	136
5.2.5	定时间间隔测试试验的参数估计	137
5.2.6	随机截尾试验的参数估计	140
5.3	威布尔分布的参数估计	141
5.3.1	参数的点估计	141
5.3.2	参数的区间估计	159
5.4	正态分布和对数正态分布的参数估计	164
5.4.1	参数的点估计	164
5.4.2	参数的区间估计	172
5.5	小结	176
第6章	离散型分布的参数估计	178
6.1	二项分布的参数估计	178
6.1.1	二项分布参数的点估计	178
6.1.2	二项分布参数的区间估计	178
6.1.3	可靠度的估计	180
6.2	超几何分布的统计分析	182
6.3	泊松分布的统计分析	183
6.4	小结	184
第7章	无故障数据情形的可靠性数据分析	185
7.1	指数分布下的无故障数据分析	186
7.2	威布尔分布下的无故障数据分析	187

7.2.1	形状参数已知时的威伯斯法	188
7.2.2	形状参数未知时的可靠性分析	189
7.3	正态分布和对数正态分布下的无故障数据分析	191
7.3.1	正态分布	191
7.3.2	对数正态分布	193
7.4	分布未知时的无故障数据分析	195
7.5	小结	196
第8章	加速寿命试验及其统计分析	197
8.1	基本概念和基本模型	197
8.1.1	加速寿命试验的类型	197
8.1.2	加速模型与加速系数	198
8.2	恒定应力加速寿命试验的统计分析	207
8.2.1	指数分布场合下恒加试验数据的统计分析	207
8.2.2	威布尔分布场合下恒加试验数据的统计分析	215
8.2.3	对数正态分布场合下恒加试验数据的统计分析	218
8.2.4	加速机理的一致性检验	220
8.3	步进应力加速寿命试验的统计分析	220
8.3.1	指数分布场合下步加试验数据的统计分析	221
8.3.2	威布尔分布场合下步加试验数据的统计分析	223
8.3.3	对数正态场合下步加试验数据的统计分析	225
8.4	小结	227
第9章	基于退化数据的可靠性数据分析	228
9.1	退化试验的基本问题	228
9.1.1	退化失效寿命变量的定义	228
9.1.2	退化数据的结构	229
9.1.3	退化数据模型	230
9.2	退化数据的统计分析	231
9.2.1	基于伪寿命分布的退化数据统计分析	232
9.2.2	基于退化量分布的退化数据统计分析	236
9.2.3	基于随机系数分布的退化数据统计分析	238
9.2.4	随机系数服从多元正态分布的退化数据统计分析	242
9.3	加速退化数据的统计分析	246
9.3.1	伪加速寿命数据分析方法	246
9.3.2	基于退化量分布的加速退化数据统计分析	248

9.3.3	基于随机系数的加速退化数据统计分析	249
9.4	小结	250
第 10 章	基于贝叶斯方法的可靠性数据分析	251
10.1	贝叶斯方法概述	251
10.1.1	贝叶斯的基本流程	252
10.1.2	共轭先验分布	255
10.1.3	超参数的确定	257
10.1.4	贝叶斯推断	259
10.2	二项分布的贝叶斯分析	262
10.3	指数分布的贝叶斯分析	263
10.4	威布尔分布的贝叶斯分析	265
10.5	正态与对数正态分布的贝叶斯分析	266
10.6	小结	271
第 11 章	基于可靠性增长数据的可靠性数据分析	272
11.1	可靠性增长概述	272
11.1.1	可靠性增长概述	272
11.1.2	可靠性增长技术的发展	274
11.1.3	可靠性增长的作用和意义	276
11.2	可靠性增长的趋势检验	277
11.2.1	趋势检验的图示法	277
11.2.2	趋势检验的拉普拉斯法	278
11.3	可靠性增长的 Duane 模型	280
11.3.1	Duane 模型的数学描述	281
11.3.2	Duane 模型参数的图估计	283
11.3.3	Duane 模型参数的最小二乘估计	284
11.3.4	模型的拟合优度检验	286
11.3.5	多台同步增长的情形	287
11.4	可靠性增长的 AMSAA 模型	288
11.4.1	AMSAA 模型的数学描述	288
11.4.2	定数截尾试验情形	289
11.4.3	定时截尾试验情形	291
11.4.4	模型的拟合优度检验	291
11.4.5	示例	293
11.5	Gompertz 模型及改进模型	294

11.5.1	Gompertz 模型	294
11.5.2	改进的 Gompertz 模型	297
11.6	延缓纠正的可靠性增长预测模型	298
11.6.1	模型概述	298
11.6.2	失效率的估计	301
11.6.3	可靠性增长潜力的估计	301
11.6.4	示例	301
11.7	小结	303
第 12 章	耐久性数据分析	304
12.1	耐久性评估的安全系数法	304
12.1.1	基于平均寿命的安全系数	304
12.1.2	基于最小寿命的安全系数	305
12.2	耐久性评估的约束参数法	306
12.2.1	最大标准差法	306
12.2.2	最大变异系数法	307
12.2.3	容限系数法	307
12.3	累积损伤寿命数据分析	309
12.3.1	线性累积损伤寿命数据分析	309
12.3.2	非线性累积损伤寿命数据分析	312
12.4	裂纹扩展寿命分析	314
12.5	小结	316
第 13 章	系统可靠性综合数据分析	317
13.1	系统可靠性数据分析的精确方法	317
13.1.1	成败型数据情形下的系统可靠性	317
13.1.2	单元寿命服从指数分布情形下系统的可靠度	321
13.2	系统可靠性数据分析的近似方法	324
13.2.1	LM 法	324
13.2.2	MML 法	326
13.2.3	近似最优法	328
13.2.4	不同分布类型试验数据的转换	329
13.3	系统可靠性数据分析的贝叶斯方法	330
13.3.1	成败型串联系统的贝叶斯综合分析	330
13.3.2	指数寿命串联系统的贝叶斯综合分析	331
13.3.3	系统可靠性贝叶斯综合数据分析的一般流程	333

13.4	系统可靠性数据分析的蒙特卡罗方法	334
13.4.1	系统可靠性点估计的蒙特卡罗方法	334
13.4.2	系统可靠性区间估计的蒙特卡罗方法	335
13.5	小结	340
附录	相关计算用表	341
附表 1	柯尔莫哥洛夫检验的临界值表	341
附表 2	检验统计量 $ C_s $ 的 $1 - \alpha$ 分位数表	349
附表 3	峰度检验 C_s 的临界值 (C_s 的 p 分位数)	349
附表 4	计算统计量 Z 必需的系数 $\alpha_{k,n}$	350
附表 5	统计量 Z 的 p 分位数 Z_p	353
附表 6	Epps - Pulley 检验: 检验统计量 T_{EP} 的 $1 - \alpha$ 分位数	353
附表 7	最优线性估计用表(极值分布、威布尔分布)	354
附表 8	简单线性无偏估计表(极值分布、威布尔分布)	356
附表 9	W 分布的分位数表	359
附表 10	V 分布的分位数表	361
附表 11	最好线性无偏估计表(正态分布、对数正态分布)	363
附表 12	简单线性无偏估计表(正态分布、对数正态分布)	368
附表 13	超几何分布单侧置信下限表	372
附表 14	泊松分布均值的置信区间	373
附表 15	相关系数 $\rho = 0$ 时, 经验相关系数 $\hat{\rho}$ 的临界值 $\hat{\rho}_\alpha$ 表	375
附表 16	Cramer - Von Mises 统计量 C_M^2 的临界值 $C_{M,\alpha}^2$ 表	376
附表 17	AMSAA 模型失效截尾区间估计系数 $[\rho_1, \rho_2]$ 表	377
参考文献		379

第 1 章 绪 论

可靠性数据分析作为描述、评价产品可靠性的理论方法,随着可靠性概念的提出和应用逐渐发展起来,成为可靠性工程的重要组成部分。可靠性作为一门工程技术,可以追溯到美国国防部“电子设备可靠性咨询组 (AGREE)”于 1957 年发表的研究报告《军用电子设备可靠性》,该报告首次给出了可靠性的定义、指标及其评价方法等一套系统的概念与方法,为可靠性发展奠定了牢固基础。因此,该报告所阐述的可靠性评价方法也被看作是最早的可靠性数据分析工作之一。

可靠性经历了 20 世纪 50 年代的起步阶段,70 年代的成熟阶段,90 年代进入了向综合化、智能化、自动化发展的阶段,到 21 世纪已发展到面向全寿命、全过程、全特性的综合集成阶段,最终发展成为一门综合性的可靠性工程技术学科。其研究对象不断扩大,从电子产品扩大到机械等非电子产品;从零部件到设备再到复杂装备或系统;从硬件到软件;从重视可靠性统计试验发展到强调可靠性工程试验以及仿真试验;从可靠性发展到维修性、保障性、安全性;从军工装备扩展到民用产品。在这些发展中,产品质量得到迅速提高,可靠性理论和实践得到丰富和完善。可靠性数据分析的研究对象也由简单到复杂,相关的可靠性数据从寿命数据扩展到非寿命数据;数据收集的范围从产品寿命试验延伸到整个产品的研制全过程和全寿命周期;数据分析方法从单元产品可靠性数据分析向系统可靠性数据分析发展,可以说,可靠性数据分析在可靠性工程实际需求下,理论和方法得到了很大的发展,形成了完整、系统的理论和方法体系。

1.1 可靠性数据分析的目的和意义

1.1.1 可靠性数据分析概述

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,只有给出可靠性的各种定量表示之后,才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 and 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、可靠性分配等,这是一种演绎的方法;其二是当产品生产出来以后,为获知产品的可靠性水平,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的。

可靠性的定量表示有其自身的特点。首先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以用一个称为可靠度的量来表示,这一量越大,表示产品完成规定功能的能力越强,即产品越可靠。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,一般使用失效率;对损耗型产品,一般使用寿命;而对可修复的产品,使用平均故障时间间隔。当然还有许多其他可靠性指标,所有这些都是有必要一一给予定量表示。

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正常这两种状态,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发生故障”就是一个随机事件。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。由此确定产品的可靠性数量指标最后都归结为统计推断问题。

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、生产和使用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求而决定的。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。通过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,评价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