

可靠性数学

[美] B. L. 阿姆斯特朗 著

科学出版社

可 靠 性 数 学

〔美〕B. L. 阿姆斯特塔特 著

彭兴文 译

敖硕昌 何国伟 校

科 学 出 版 社

1 9 7 8

内 容 简 介

本书讲述数理统计方法在系统可靠性方面的应用,介绍了可靠性统计的一些方法和步骤。本书侧重于实际应用,而不作严格的理论阐述,只要具备微积分学的知识就可阅读本书。

前两章介绍一些基本概念和公式;第三,四,五章介绍一些常用的统计分布,假设检验和有关统计方法;第六,七,八章为数据考虑,系统逻辑图和数学模型;第九,十,十一,十二章为可靠性预测、分配和增长;第十三,十四,十五章为可靠性估计和验证;第十六章讲系统可靠性。

读者对象为从事可靠性工作的工程技术人员以及科学工作者。

Bertram L. Amstadter

RELIABILITY MATHEMATICS

McGraw-Hill

可 靠 性 数 学

[美] B. L. 阿姆斯塔特 著

彭兴文 译

敖硕昌 何国伟 校

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年9月第一版 开本: 787×1092 1/32

1978年9月第一次印刷 印张: 13 1/4

印数: 0001—62,100 字数: 298,000

统一书号: 13031·809

本社书号: 1157·13—1

定 价: 1.35 元

序

本书是作者在可靠性方面工作经验的总结,是为仅学过统计学入门课程或有关课程(比如统计质量控制入门课程)的大专学生和实际工作者而写的.读者最好懂得微积分,若愿意不求证明而接受书中的公式,也能了解到基本的可靠性方法.即使没有学过理论统计和高等数学的专业课程,阅读本书也能从本书的内容中得到充分的收获.

本书侧重统计方法在可靠性工作和直接有关的活动中的应用.它向专业设计、试验和可靠性工作人员概要介绍一些可靠性统计的方法和步骤.从这个意义上讲,可以说本书是一本应用统计书,而不是一本理论统计书.书中没有对所讲的全部公式作完全的推导,也没有对所列全部数表和曲线一一加以推算.但是,无疑本书对技术人员提供了一些有用的工具,他们在使用这些工具的过程中将会得到好处;书中对于如何选择、应用和利用这些工具也提供了一些可供遵循的途径.同时,本书介绍了处理具体可靠性统计问题所用的各种方法,从这点讲本书对技监人员、管理人员和大专学校学生是一本合用的、简明的参考书.书中也介绍了一些从前其它书中没有介绍过的、更有效的新方法.

本书处理问题的一个重要特点是它面向实际,而不作严格的理论阐述.不应认为这是牺牲精确性或者是损伤完善的理论原则,而应当看做是有选择地利用这些原则.主要重点不是放在数学推证上,而是放在实际处理整个计划的有效性上.比如,过分考虑试验和分析的容易也许会降低理论的严

谨。这种折衷考虑有优点也有缺点，在具体统计应用中碰到这种问题时再作讨论。

各章是按课题而不是按统计方法编写的。头两章介绍一些基本概念和公式。这些概念和公式或者是后面各章要反复使用的，或者是理解后面介绍的一些方法的基本原理所必不可少的。这里首先引入置信度概念和概率概念。接下一章介绍可靠性中最常用的一些统计分布。这儿只一般地介绍了这些分布，没有讨论它们复杂的数学推导。换句话说，重点放在：解释确定这些分布的各个参数的意义，说明什么时候使用这些分布，介绍选择、利用这些分布的简单方法以及解释一些结果。再下一章是比较详细地解释这些分布的应用，使读者有机会把附录 B 中的统计表与书里的内容联系起来并且熟悉这些表。在后面的几章里，当理解可靠性原理要求对各种统计方法和步骤作进一步解释时，又作了更详细的讨论。还讲到可靠性分析中常用的许多辅助统计方法。

另一章讨论数据问题和有关问题，这些问题是时常碰到的，并且最好在应用统计方法之前解决。这章包括比如有必要定义失效之类的考虑。诚然，讨论数据统计处理的这一章里是无需考虑非数学问题的，但是，数据及其分析的有效与否直接牵连到产生数据之前这些非数学问题的解决是否满意。这就要研究我们关心的实际数据——它的产生、收集、分析和解释。

余下几章就按所论方法的应用安排。因此接连几章讨论可靠性预测、可靠性目标或指标分配和可靠性增长，最后几章讨论可靠性估计、评价和验证。即使在所用方法是类似的甚至利用的几张表也是相同的情况下，应用仍然是考虑的主要方面，因此按应用的不同分开安排。例如，从历史数据预测元件性能符合设计规范的概率时，使用了正态分布；用实测数

据估计应致失效的测量结果和计算失效概率时，也用了正态分布。虽然这两种分析都用同一统计分布，但却没有把它们放在同一章里讨论，这是因为各章是按应用而不是按统计方法安排的。

讨论应用的这几章依次包括如下课题：可靠性预测、分配和增长，可靠性估计和验证以及系统的可靠性研究。其中有些方法是作者的研究所得，还没有广泛推广。可是作者的这些方法大大简化了从前花时甚长的某些可靠性计算；已经证实，在用过这些方法的计算中，它们是非常有益的。

附录中除了包括一些太长而不能容纳在正文里的推导之外，还有一系列图表。这些图表的一部分是统计用分布表，另一些是为可靠性应用而特地计算和绘制的。书中为那些打算对介绍过的、但未作充分理论证明的方程和公式研究它们的数学根据的读者列举了一些参考文献。其它参考文献是为这样一些读者列举的：他们想在理论统计领域作进一步研究，或者更主要的想在第一章介绍过的其它两个可靠性领域——可靠性工程和工作分析——作更深入的工作。

B. L. 阿姆斯特特

目 录

第一章 绪论	1
1.1 可靠性概念	1
1.2 可靠性的必要性	3
1.3 可靠性工作范围	4
1.4 不可靠的原因	6
1.5 失效类型	8
1.6 提高可靠性的方法	10
第二章 基本统计概念	15
2.1 概率	15
2.2 集中趋势的量度	22
2.3 离散度的量度	24
2.4 抽样与置信度	29
第三章 可靠性使用的分布	32
3.1 引言	32
3.2 二项分布	33
3.3 普阿松分布	36
3.4 负指数分布	38
3.5 高斯(正态)分布	42
3.6 学生氏 t 分布	46
3.7 χ^2 分布	49
3.8 χ^2 /自由度分布	51
3.9 F 分布	52
3.10 威布尔分布	54
3.11 切贝谢夫不等式	56
第四章 假设检验	59

4.1	引言	59
4.2	置信度与风险	59
4.3	自由度	61
4.4	均值与方差的假设	62
4.5	关于均值的假设	62
4.6	关于离散度的假设	73
4.7	结语	80
第五章	有关统计方法	82
5.1	符合度	82
5.2	回归与相关	90
5.3	正态化	98
第六章	数据考虑	105
6.1	引言	105
6.2	数据要求	106
6.3	数据收集	107
6.4	数据来源	113
6.5	数据适用性	115
6.6	结语	118
第七章	逻辑图	119
7.1	必要与描述	119
7.2	例子	121
7.3	典型系统的逻辑图	125
7.4	某些近似法	129
第八章	数学模型	135
8.1	串联系统	135
8.2	并联工作系统	139
8.3	后备系统	149
8.4	第七章中的某些逻辑图的数学模型	158
第九章	元件可靠性预测	164
9.1	定义与应用	164

9.2	元件失效率	165
9.3	任务失效率	170
9.4	具体例子	175
9.5	数据估计	180
第十章	系统预测	182
10.1	引言	182
10.2	数学模型的应用	191
10.3	蒙特卡洛法	193
10.4	上下限法	197
第十一章	分配	212
11.1	目的与要求	212
11.2	串联系统	214
11.3	冗余系统	218
11.4	多方面任务	222
11.5	其它重要考虑	224
11.6	具体分配例子	231
第十二章	可靠性增长	243
12.1	引言	243
12.2	三个有用的增长公式	245
12.3	其它增长公式	263
第十三章	估计方法: 属性法	266
13.1	估计方法	266
13.2	失效与试验比法	271
13.3	等效任务法	274
第十四章	估计方法: 变数法	277
14.1	与规范比较	277
14.2	耗损	285
14.3	过应力法	299
14.4	系统估计	300
第十五章	可靠性验证	305

15.1	可靠性验证的定义	305
15.2	统计验证	307
15.3	能力验证	315
15.4	验证要求的分析	317
第十六章 系统可靠性考虑		318
16.1	引言	318
16.2	首要考虑	319
16.3	系统改进	322
16.4	效率的其它标准	332
16.5	结束语	337
附录 A 数学推导		339
A.1	式(5.3)和(5.4)的推导	339
A.2	式(5.6), (5.7a)和(5.7b)的等价性的证明	340
A.3	式(8.12)推导与罗比达法则的进一步应用	341
A.4	式(8.40)的推导	344
A.5	式(8.44)的证明	348
A.6	将三枝后备冗余系统的可靠度表达式变换成象式(8.40) 那样的由每枝提供的可靠度表示的表达式	350
附录 B 统计用表		353
B.1	负指数分布值	353
B.2	正态曲线的面积	358
B.3	t 分布值	359
B.4	χ^2 分布的分位数	360
B.5	χ^2 /自由度 分布的分位数	362
B.6	F 分布值	364
B.7	平方与平方根	372
附录 C 可靠性用表		377
C.1	并行工作冗余系统的可靠度	377
C.2	在如下置信度下, 由试验数和失效数确定的可靠度	380
a.	50% 置信度	380

b. 75%置信度	381
c. 90%置信度	382
d. 95%置信度	383
e. 99%置信度	384
C.3 在如下置信度下, 由等效任务数和失效数确定的可靠度	385
a. 50%置信度	385
b. 75%置信度	387
c. 90%置信度	389
d. 95%置信度	391
e. 99%置信度	393
C.4 按如下子样容量算得的安全系数所确定的可靠度:	395
a. 子样容量为 3	395
b. 子样容量为 4	395
c. 子样容量为 5	396
d. 子样容量为 6	396
e. 子样容量为 7	397
f. 子样容量为 8	397
g. 子样容量为 9	398
h. 子样容量为 10	398
i. 子样容量为 12	399
j. 子样容量为 15	399
k. 子样容量为 20	400
l. 子样容量为 25	400
m. 子样容量为 30	401
n. 子样容量为 40	401
o. 子样容量为 50	402
p. 子样容量为 60	402
q. 子样容量为 80	403
r. 子样容量为 100	403

s. 子样容量为 250	404
C.5 失效率数据参考资料.....	404

第一章 绪 论

1.1 可靠性概念

可靠性概念并不是新的概念。事实上长期以来人们已经在关心他们使用的产品的可靠性。虽然没有特地使用“可靠”这个术语,但指的就是这个意思。时常听到人们抱怨“东西不如从前耐久”,这就是人们对他们所用的东西的过去的可靠性和现在的可靠性的一种比较,尽管这种比较是主观的。可靠性的这些讲法都是定性的,没有包括数值量度。

朝鲜战争开始以后,定量的可靠性才广泛应用,在可靠性的测定中才采用统计方法。可靠性的定义有一个演变过程,现在被广泛接受的可靠性的定义是,一个设备在给定的时间内、在预期的应用中能正常工作的概率。对一次使用设备¹⁾,比如爆炸装置,对不依赖时间的特性,定义有所不同,不过,本质上还是可以采用上述定义的。上面的定义包括了概率这个术语,这说明采用了定量量度。概率是一个特定形式的事件(上述定义中就是正常工作)出现的可能性。任何一种民用或军用设备的正常工作概率都是可以测定的,只是测量方法随设备种类不同而异。

可靠性的定义中除了有概率概念外,还有其它三方面的

1) 一次使用设备多指本身设计成只工作一次的设备,工作一次后就坏了,比如炸弹。但有时也指瞬时工作设备,即一次的工作时间非常短的设备,但工作后还可使用,比如后面提到的闪光灯——译校者注。

考虑：满意的工作、时间期限和预期应用。什么算是满意的工作，必须有一个定义。显然，一个设备不满意时，它不一定是完全不工作的。虽然当自动发动机的两个汽缸压缩能力低时发动机的性能算是不满意，但是所有希望的性能都百分之百地达到也不是满意性能的真正定义。有些性能没有达到百分之百的要求也是可以接受的。例如在美国有过许多载人的宇宙飞行，虽然并非每项设备都理想地工作，但可以说这些飞行仍然是非常成功的。这正好说明，要使可靠性的量度有意义，必须要定义什么算是满意的性能。

工作的时间期限是比较明确的。规定一项任务总包括一个具体的完成期限。保用书总是写明保用年月的。满意性能的标准定义后，便可按要求的时间期限将设备工作状况与标准进行比较。然而即使在这种情况下也有一定的灵活性。可接受的标准可能随时间而变，在工作后期认为满意的标准也许略低于初期认为满意的标准。一辆新汽车不因油量减少而多耗油，但一辆用过五年的旧汽车每行驶 1000 哩要多加四分之一加仑油才能很满意地运行。

最后一个考虑——预期应用——也必须是可靠性定义的一部分。人们设计的设备总是在某些特定的条件下、以一定的方式工作的。这些条件包括制造、运输、储存和使用中碰到的环境条件（温度、压力、湿度、加速度、振动、冲击和噪声等）和工作条件（电压、电流、转矩和大气腐蚀等）。如果设备在其预定的环境下工作时发生故障或性能过度降低，就算不满意；但如设备承受的应力超过设计容许的应力，便不能将故障或性能降低视为不可靠的合理的量度。

本书考虑的主要是和概率有关的问题，并讨论概率的定义、计算方法、从元件的概率推求系统的概率的方法以及可靠性数值方面的其它问题。一般总假定，满意的性能、时间期限

和预期应用都有适当的标准。不过，在数学问题的讨论中使用这些标准时，还要对它们再作叙述或研究。

1.2 可靠性的必要性

近年来人们已经认识到获得高可靠系统和高可靠元件的重要性。从纯经济观点讲，为了减少总费用，高可靠性也是必要的。维持某些军用设备处于可工作状态每年花的费用高达设备原价的十倍，这个使人不安的事实强调说明了高可靠的必要性。一个部件或元件失效不仅损坏失效的元、部件本身，而且往往也损坏使用这些元、部件的某些更大的设备或系统。正如俗话所说，马掌损坏马便不能奔跑。一个漏汽的制动汽缸如果导致事故，可能要花很大的修复费用。开关装置工作失灵或遥测系统不工作，可能使一个宇宙卫星完全无用。

安全考虑也是同样重要的。汽缸阀门漏气可能引起严重的人身事故和支付不应付的开支。飞机上的着陆装置损坏纵使乘客没有伤亡也会使飞机报废。不难看出，其后果可能会更加严重得多。美国三个宇宙飞行员不幸死亡，足以说明可靠性对人身安全的重要意义。

日程推迟、不方便、顾客不满、信誉损失（可能对一个国家）、更严重的甚至危害国家安全等，也都可能是由不可靠性引起的。这些情况也包括费用和安全因素。例如，费钱是每一失效所带来的必然后果，正如日程推迟、不方便是每一失效所带来的必然后果一样。大多数失效都要造成上述诸后果中的至少一个后果。有一个平常的例子，例如电视机中一个元件有毛病，也会引起经济损失、不方便、（制造者或出售者）信誉损失和用户不满。

从政府工业和民用工业现在经常越来越强调可靠性已经

反映出可靠性的重要性的必要性了。国防部、国家宇航局和原子能委员会的大多数合同中，都对承包者的产品提出有某种程度的可靠性要求。要求的范围从系统可靠性指标的规定到成果的实际验证。大多数政府拨款的规划都明文规定要执行诸如国防部标准 MIL-STD-785、国家宇航局标准 NPC-250-1 或美国空军标准 MIL-R-26484 等可靠性文件；在这些文件里，详细地规定了可以接受的可靠性计划的要求。有许多技术规划都对可靠性工作拨了专款，要求发展和支持可靠性规划的设想，并规定要定期提出可靠性报告。

不过，民用工业在贯彻可靠性规划方面进展比较迟缓。过去有些民用商品生产者认为，在可靠性工作上花钱是得不偿失，因此只是阳奉而已。后来通过电视和其它宣传方式大力向公众宣传高质量和高可靠性，他们才在这方面作了一些实际努力。幸好，这种局面目前正在逐步改变，因为较多的公司开始发现，执行有效的可靠性计划从经济上讲是有好处的。

1.3 可靠性工作范围

在 60 年代里，可靠性工作得到了很大的推动，人们对它的认识大大提高，对它的意义越来越明确。现在，可靠性已成为一门人们熟悉的工程学科，有它自己的方法、体系和技术。达到目前这种情况并不是一帆风顺的，事实上在它的成长过程中，它曾经经历了类似于 20 年前质量保证所经历的一番波折。要使公司董事会相信可靠性在经济上是有利的，为此付出的精力并不亚于执行可靠性计划本身。因此，为了在企业管理方面和质量控制方面重视可靠性，曾不得不花出精力论证可靠性的必要性，论证在可靠性工作的组织和领导中采用企业管理原则的必要性。

在可靠性理论的成长过程中,开发了三个主要技术领域:
(1)可靠性工程,包括系统可靠性分析、设计评价和有关任务;
(2)可靠性分析,包括失效研究和纠正措施;(3)可靠性数学。
这些领域每一个都发展成为一门独立的学科。尽管一个领域的工作与另一领域的工作很难划出明确具体的界线,但实际上可靠性工作常常分成这样三个部分。头两个部分有些工作不一定总是由可靠性部门承担;例如,设计评价有时也由设计部门自己负责。因此在这种情况下可靠性部门通常就是监督执行上述工作,看是不是按管理条例或合同规定行事。但第三项工作——可靠性数学工作——却往往由可靠性部门承担。这是因为,第一,虽然所用方法并不是可靠性部门所特有,但大多数设计、试验和其它部门工作人员并不熟悉这些数学方法。第二,提到“可靠性”这个术语时,通常想到的就是数学方面的内容。事实上,可靠性的主要定义都是用数学术语(包括概率这个术语)给出的。

可靠性设计有如下工作:系统设计的分析,各种方案的比较,设计图纸和规范的评价,优选元件和材料表的编制,以及试验计划的编写与分析。一些特有的工作是,分析失效模式和影响,编排设计评价对照表,并作一些具体的研究和探讨工作。象供应方的可靠性估计要算在可靠性设计工作之内一样,环境设计常常也算在可靠性设计工作之列。在复杂系统例如精炼厂或宇宙飞船的可靠性组织中,可靠性设计工作可分成四组:系统设计组,机械设计组,电气设计组,第四组研究供应方的可靠性估计和元件应用。尽管各组各有自己的工作特点,但几乎所有各项工作都要用到数值方法。

可靠性分析工作将涉及到制造和组装工作、性能测试、失效分析和纠正措施、工作时间和工作次数的数据积累、现场工作报告以及完善和验证与设计有关的其它工作。作这项工作