



系统设计 和应用的 可靠性工程

〔加〕B.S.迪隆 著
周广涛 译
梁思礼 校

宇航出版社

内 容 简 介

本书分十二章。前三章是可靠性工程概况和基础知识；第四章介绍补充变量法、干涉理论、人的可靠性、共模失效、故障树、软件可靠性和更新理论；第五、六章阐述可靠性优化和可靠性增长模型；第七章讨论系统安全性；第八、九章对失效数据分析技术和寿命周期费用两个重要新课题进行了论证，为经济分析技术提供了几个寿命周期费用模型和系统使用费用模型；第十章讨论维修性工程；最后两章介绍可靠性工程从军用向民用转移的两个例子，即医疗设备可靠性和电力系统可靠性。全书列举了1400多篇参考文献。

本书是一本知识新颖、内容较全、涉及面较广的可靠性工程书籍。可供系统设计、应用方面的工程师和技术人员和可靠性、维修性、质量管理方面的工程师和技术人员以及有关专业大学生、研究生阅读参考。也可作为大学教课书和培训班教材。

系统设计和应用的可靠性工程

〔加〕 B.S.迪 隆 著

周广涛 译

梁思礼 校

☆

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

三河县燕郊镇四街印刷厂印刷

☆

开本：850×1168 1/32 印张：10.5 字数：230千字

1987年11月 第1版第1次印刷 印数：1—3300册

统一书号：15244·0217 定价：2.40元

ISBN7-80034-017-1/TB·002

著者为中译本作序

为了中国可靠性研究者和专业人员能同样迅速地读到本书，中国宇航学会可靠性专业委员会决定将本书翻译成中译本。因此，我对宇航学会可靠性专业委员会秘书长周广涛同志为本书所做的翻译工作深表感谢；同时还对原著出版公司Van Nostrand Reinhold的帮助与协作表示谢意。

系统可靠性工程的领域已经发展到这样一个水平，即开始划分各种专门的研究范围，例如可靠性优化、寿命周期费用和可靠性增长模型等等。在系统设计和应用中求最小费用下的系统最大可靠性的知识以及其他与各种可靠性有关的范畴对于工程师和可靠性分析工作者来说是不可缺少的。本书作者的目的是想对常用的传统的和先进的可靠性与可靠性有关的领域作简单的更新。

例如，与可靠性工程直接有关的领域是维修性工程 and 安全性工程。当进行系统设计和应用时，这些学科的知识对工程师是非常重要的。在获得各种不同领域的可靠性信息和有关材料方面工程师们面临着极大的不便，因为这些主题的资料或在各种文件中，或在技术评论中出现，但没有集中在单独的一卷内。本书的写作就是为了满足有一本单独的参考书籍这个紧迫的要求。这本书的对象是实用工程师和对此学科没有预备知识的大学生和研究生。本书强调的是概念结构而不是数学的严密性和细致的叙述。如果读者希望在某一专题想要深入钻研的话，在本书参考文献中给出了书中所介绍材料的绝大部分的出处。全书收集了1400多篇参考文献，列于每章的最后。这些参考文献将提供给读者在每一主题上更多的信息。此外，书中还包括一些例子和它们相应的解答。

第一章简要地讨论可靠性工程历史、可靠性出版物、对可靠性工程计划的需求、系统工程、基本定义和本书的范围。在该章的最后，介绍了在可靠性方面军用出版物和其他重要出版物的清单。

第二章包含理解本书其他章节所需的数学和概率理论的述评。

第三章由基本可靠性概念组成。第二和第三两章对于不熟悉可靠性工程领域的读者是有益的。在第四章中介绍了补充变量方法、干涉理论、人的可靠性、共模失效、故障树、软件可靠性和更新理论等内容。

在第五和第六章中分别介绍当前感兴趣的两个题目即可靠性优化和可靠性增长模型。这两方面内容在系统设计阶段用来确定可靠性时是很重要的，所以，用较重的份量介绍这两章的材料。

第七章讨论系统安全性工程这个主题。这个主题是与可靠性紧密联系的，特别是在系统设计阶段。在这章中讨论了它的各种重要的领域，例如：系统安全性管理、系统安全性分析技术和安全性的法律侧面等。

在第八章中讨论了失效数据分析技术。第九章介绍了当前感兴趣的一个重要课题“寿命周期费用”。此外，在经济分析技术方面，这章还含有几个寿命周期费用和系统使用费用的模型。第十章介绍了与系统应用阶段有关的科目，即维修性工程。这章讨论维修管理方法、设备维修模型和维修性。第八到第十章的内容对于系统设计和应用阶段将是有用的。

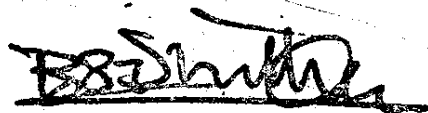
最后两章即第十一和第十二章涉及可靠性理论在医疗设备和电力设备上的应用。这两章在此介绍是因为这些题目近年来是非常引人注目的。

除了系统设计工程师和系统操作工程师以外，本书对于可靠性专业的学生、管理工程师、可靠性工程师、维修性工程师、安全性工程师和检修工程师等亦都是有用的。本书除了作为全

面的系统可靠性教材之外，还可以用于各种短训班教材，例如介绍系统可靠性时用一到三章和第八章；高级可靠性教材可用四到六章和第七章；可靠性最优化用一到三章和第五章；可靠性增长模型用一到三章和第六章；寿命周期费用用一到三章和第九章；医疗系统可靠性用一到三章和第十一章；电力系统可靠性用一到三章和第八章与第十二章；系统安全性用一到三章和第七章；维修性工程用一到三章和第八章与第十章。

我要对机械工程系协助进行本书许多章节的打字工作表示感谢。我尤其要对 D.Champion-Demers 小姐的杰出的打字技术致谢。作者对以前的同事所作的帮助表示感谢，并且亦对在安大略 Hydro 的专业人员和现在渥太华大学的同事对这一课题感兴趣表示感谢。

我要感谢我的父母、亲戚和朋友自始至终经常性的鼓励。最后，我还要感谢我的妻子 Rosy 对手稿主要部分的打字和所有图表的准备。当手稿准备中她的耐心和容忍亦是值得赞许的。



渥太华

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 可靠性工程历史.....	(1)
1.2 可靠性刊物.....	(2)
1.3 可靠性保证计划的需求.....	(3)
1.4 系统工程.....	(4)
1.5 系统可靠性.....	(4)
1.6 可靠性工程的分支及其现代发展趋势.....	(4)
1.7 定义.....	(5)
1.8 本书的范围.....	(5)
1.9 小结.....	(6)
1.10 参考文献.....	(8)
第二章 工程可靠性数学	(11)
2.1 概述.....	(11)
2.2 概率基础知识.....	(11)
2.2.1 统计独立事件概率.....	(11)
2.2.2 m 事件并的概率.....	(11)
2.3 概率分布.....	(12)
2.3.1 指数分布.....	(12)

2.3.2	浴盆风险率分布.....	(12)
2.3.3	极值分布.....	(13)
2.3.4	均匀分布.....	(13)
2.3.5	正态分布.....	(14)
2.3.6	威布尔分布.....	(14)
2.3.7	对数正态分布.....	(14)
2.3.8	贝塔分布.....	(15)
2.3.9	风险率模型 I	(15)
2.3.10	风险率模型 II	(16)
2.3.11	混合威布尔分布	(17)
2.3.12	疲劳寿命分布	(17)
2.3.13	瑞利分布	(18)
2.3.14	伽玛分布	(18)
2.3.15	泊松分布	(18)
2.3.16	二项分布	(18)
2.4	最优化数学方法.....	(19)
2.5	特殊函数的积分.....	(20)
2.6	拉普拉斯变换方法.....	(21)
2.7	常用的理论和定义.....	(23)
2.8	小结.....	(23)
2.9	参考文献.....	(25)
第三章	工程可靠性的入门概念.....	(26)
3.1	概述.....	(26)
3.2	浴盆形风险率曲线的概念.....	(26)
3.3	两状态装置网络的可靠性评估.....	(28)
3.3.1	串联网络.....	(28)
3.3.2	并联网络.....	(30)
3.3.3	m取k个装置的网络.....	(32)
3.3.4	备份冗余系统.....	(33)
3.4	三状态装置的网络可靠性评估.....	(33)
3.4.1	并联网络.....	(34)
3.4.2	串联网络.....	(35)

3.5	可靠性的确定方法	(36)
3.5.1	网络简化技术	(36)
3.5.2	路径跟踪技术	(37)
3.5.3	分解技术	(38)
3.5.4	最小割集技术	(40)
3.5.5	三角形——星形方法	(41)
3.5.6	马尔柯夫模型(连续时间和离散状态)	(46)
3.5.7	二项式方法	(48)
3.6	小结	(49)
3.7	参考文献	(50)
第四章	新的可靠性评估概念	(54)
4.1	概述	(54)
4.2	补充变量技术	(54)
4.2.1	此技术应用一例	(55)
4.3	干涉理论	(58)
4.3.1	单项应力——强度可靠性模型	(60)
4.3.2	冗余设备应力——强度可靠性模型	(64)
4.3.3	确定零件可靠性的图解法	(69)
4.4	人的可靠性	(72)
4.4.1	人为差错分类	(72)
4.4.2	任务可靠性预计程序	(73)
4.4.3	人的可靠性量度	(74)
4.5	共模失效	(75)
4.5.1	冗余系统共模失效分析	(75)
4.5.2	具有共模失效和单个备份设备的多状态设备冗余系统	(78)
4.6	故障树	(85)
4.6.1	符号和定义	(85)
4.6.2	故障树建立步骤	(87)
4.6.3	门分析的发展	(88)
4.6.4	布尔代数的性质	(89)
4.6.5	故障树的概率估计	(90)

4.7	软件可靠性预计.....	(93)
4.7.1	硬件和软件可靠性.....	(93)
4.7.2	软件可靠性模型.....	(94)
4.8	更新理论.....	(97)
4.9	小结.....	(99)
4.10	参考文献	(100)
第五章	可靠性最优化.....	(112)
5.1	概述.....	(112)
5.2	最优化技术.....	(113)
5.3	冗余优化.....	(113)
5.3.1	并联系统.....	(113)
5.3.2	串—并网络(均质情况)	(114)
5.3.3	串—并网络(一般情况)	(115)
5.3.4	串联网络最优可靠性分配.....	(121)
5.3.5	在一定系统可靠性要求水平下的 最小网络费用.....	(122)
5.3.6	在费用约束条件下最大系统可靠性 (具有最优冗余分配)	(122)
5.3.7	没有串—并网络的最大可靠性.....	(123)
5.4	具有两个失效模式元件冗余结构的 可靠性优化.....	(123)
5.4.1	并联网络.....	(124)
5.4.2	串联网络.....	(125)
5.4.3	串—并网络.....	(125)
5.4.4	并—串网络.....	(126)
5.5	机械零件可靠性最优化.....	(128)
5.5.1	当应力和强度为独立与正态分布 时零件的最小设计费用.....	(128)
5.5.2	当应力和强度为独立正态分布时, 在 资源约束条件下的零件最大可靠性.....	(129)
5.6	最优维修决策.....	(130)
5.7	小结.....	(132)

5.8 参考文献	(133)
第六章 工程可靠性增长模型	(141)
6.1 概述	(141)
6.1.1 简单回顾	(141)
6.2 可靠性增长管理	(142)
6.2.1 可靠性增长管理基本工具	(144)
6.3 可靠性增长模型	(144)
6.3.1 杜安模型	(144)
6.3.2 Weiss模型	(145)
6.3.3 通用模型	(145)
6.3.4 双曲线模型	(146)
6.3.5 修正指数模型	(146)
6.3.6 通用双曲线模型	(150)
6.3.7 Gompertz模型	(150)
6.3.8 指数模型	(150)
6.3.9 Golovin模型	(151)
6.3.10 威布尔增长模型	(152)
6.3.11 其他可靠性增长模型	(153)
6.4 增长模型参数估计	(153)
6.4.1 杜安模型参数估计	(153)
6.4.2 威布尔增长模型参数估计	(154)
6.4.3 Gompertz模型的参数估计	(154)
6.4.4 双曲线模型参数估计	(157)
6.5 软件可靠性增长模型	(158)
6.6 小结	(158)
6.7 参考文献	(159)
第七章 系统安全性工程	(163)
7.1 概述	(163)
7.2 系统安全性功能	(164)
7.3 产品安全性计划	(165)
7.3.1 方案阶段	(165)
7.3.2 设计和研制阶段	(166)

7.3.3	制造阶段	(166)
7.3.4	使用阶段	(167)
7.4	系统安全性分析技术	(167)
7.4.1	系统安全性分析要素	(168)
7.4.2	系统安全性分析等级	(169)
7.4.3	概念性系统安全性分析	(169)
7.4.4	系统设计和研制中安全性分析	(171)
7.4.5	功能系统安全性分析	(179)
7.5	安全性的法律侧面	(179)
7.6	小结	(180)
7.7	参考文献	(181)
第八章	失效数据分析	(187)
8.1	概述	(187)
8.2	失效数据库	(187)
8.3	不可修系统失效数据分析技术	(188)
8.3.1	不完全失效数据风险率图示技术	(189)
8.3.2	最大似然估计技术	(197)
8.4	可修系统的失效数据分析	(207)
8.5	小结	(208)
8.6	参考文献	(209)
第九章	寿命周期费用	(214)
9.1	概述	(214)
9.2	经济性分析	(215)
9.2.1	单利	(215)
9.2.2	复利(单项支付, 合成总数利率法)	(216)
9.2.3	现值法(单项支付)	(216)
9.2.4	等支付级数合成总数法	(216)
9.2.5	偿债基金法(等支付级数)	(218)
9.2.6	现值法(等支付级数)	(218)
9.2.7	资本恢复法(等支付级数)	(219)
9.2.8	经济分析技术应用于寿命周期费用问题	(219)

9.2.9	无盈亏分析法	(220)
9.3	寿命周期费用模型	(221)
9.3.1	寿命周期费用模型 I	(222)
9.3.2	寿命周期费用模型 II	(223)
9.3.3	寿命周期费用模型 III	(223)
9.3.4	寿命周期费用模型 IV	(225)
9.3.5	寿命周期费用模型 V	(225)
9.3.6	寿命周期费用模型 VI	(225)
9.3.7	寿命周期费用模型 VII	(226)
9.3.8	寿命周期费用模型 VIII	(226)
9.4	使用在工作状态下设备费用模型	(227)
9.4.1	后勤支援费用模型	(228)
9.4.2	支援费用模型	(228)
9.4.3	概率模型	(229)
9.5	研制费用模型	(229)
9.6	费用估计的方法	(230)
9.7	费用模型选择	(231)
9.7.1	分析模型的好处	(231)
9.8	可靠性改进保证	(232)
9.8.1	可靠性改进保证费用模型	(233)
9.9	小结	(235)
9.10	参考文献	(236)
第十章	维修性工程	(244)
10.1	概述	(244)
10.2	维修性工程中使用的定义	(245)
10.3	维修管理方法	(245)
10.3.1	维修组织机构	(246)
10.3.2	预防维修	(247)
10.3.3	维修计划	(248)
10.3.4	维修任务日程安排	(248)
10.3.5	工作命令	(249)
10.3.6	工作测量	(249)

10.3.7	维修费用的预算	(250)
10.3.8	维修培训	(250)
10.3.9	贮存和备件的控制	(251)
10.4	库存量控制模型	(251)
10.5	维修计划和控制技术	(253)
10.5.1	CPM与PERT的符号与定义	(253)
10.6	维修测量指标	(259)
10.7	在维修中应用的数学模型	(262)
10.7.1	设备更换模型	(262)
10.7.2	设备零件更换模型	(263)
10.8	可维修性	(265)
10.8.1	可维修性量度	(265)
10.8.2	可维修性函数	(267)
10.9	小结	(268)
10.10	参考文献	(270)
第十一章	医疗设备可靠性	(280)
11.1	概述	(280)
11.2	美国保健情况数据	(281)
11.3	医疗设备	(281)
11.4	美国政府在医疗设备上的规定	(283)
11.5	医疗装置可靠性改进程序和技术	(284)
11.5.1	医疗设备设计要求	(284)
11.5.2	生产可靠医疗设备的Bio-Optronics 方法	(284)
11.5.3	可靠性评估技术	(285)
11.6	可靠性模型	(286)
11.6.1	单个设备可靠性预计	(286)
11.6.2	并联系统	(287)
11.6.3	备份冗余	(288)
11.7	对保健专业人员和可靠性工程师 的建议	(290)
11.7.1	对保健专业人员的建议	(290)

11.7.2 对可靠性工程师的建议	(290)
11.8 航天和医疗设备可靠性比较	(291)
11.9 小结	(291)
11.10 参考文献	(293)
第十二章 电力设备可靠性	(296)
12.1 概述	(296)
12.2 电力系统可靠性定义和指标	(296)
12.3 设备可靠性模型	(298)
12.3.1 单发电机装置模型	(298)
12.3.2 具有降额状态单发电装置模型	(300)
12.3.3 具有预防维修的发电装置模型	(303)
12.3.4 汽轮机超速控制系统模型	(305)
12.3.5 家用太阳能热水系统模型	(306)
12.3.6 输电系统双气候模型	(307)
12.3.7 有一个备份的单相变压器	(309)
12.3.8 碎煤机模型	(311)
12.3.9 具有有限维修的两装置系统模型	(313)
12.4 输电线共模中断供电模型	(314)
12.5 寿命周期维修费用模型	(316)
12.6 小结	(318)
12.7 参考文献	(319)

第一章 绪 论

1.1 可靠性工程历史

可靠性工程的领域并不是新的，它的历史要追溯到第二次世界大战，当时德国人在改进他们V-I和V-II火箭的可靠性时已经第一次引入了可靠性的概念。

美国海军、陆军、空军等单位于1945到1950年期间进行了设备修理、维护费用和电子设备失效等方面的研究。根据这些研究的成果1950年国防部成立了可靠性特别委员会。到1952年这个委员会改变成常设的顾问组，它就是大家知道的电子设备可靠性顾问组(AGREE)。

五十年代初期电气及电子工程师学会(IEEE)的可靠性学报和可靠性与质量控制会议录的出现就是美国对可靠性重视的结果。1957年AGREE公布了一个报告，它直接导致军用电子设备可靠性规范的出现。

六十年代初出版了许多可靠性方面的书籍。此外，在此期间Pergamon出版社也出版一种国际性杂志名叫“微电子学与可靠性”(Microelectronics and Reliability)。

至今，有关可靠性和维修性工程的几本书籍和其他出版物已经发行。这个专题的主要书籍和其他出版物列在第一和第三章末尾。

如今，在许多工业界、政府机构中已有不少专家被称为可靠性工程师、可靠性组织领导者和可靠性经理。可靠性领域也已发展成为许多专门分支，其中有：软件可靠性、机械可靠性、人的

可靠性、电力系统可靠性、维修性工程、寿命周期费用等。最后，可以说，可靠性领域将长期存在下去，因为它有许多效益，这一领域的重要性还在不断地提高。

1.2 可靠性刊物

在全世界关于可靠性领域有专门的各种杂志和会议录，这些杂志和会议录专门用来发表可靠性领域的文章或者至少每年在这方面发表一些著作。作者无意在这里把它们全都列出来。下面三种杂志和会议录特定发表可靠性工程方面文章，它们特别重要：

1. 电气及电子工程师学会可靠性学报，由电气及电子工程师学会(IEEE)和美国质量控制学会(ASQC)联合出版，每年出版五期。

2. 微电子学和可靠性(Micoelectronics and Reliability)是一种国际性刊物，由在英国牛津的Pergamon Press出版，为双月刊。

3. 可靠性和维修性年会会议录，由包括美国电气及电子工程师学会和美国机械工程师协会等九个美国专业协会所创办。该年会每年在美国召开一次。

从“微电子学与可靠性”刊物名称可见，它只部分地刊登可靠性的文章，通常每期在可靠性方面发表的著作多于总数的一半。这三种研究性刊物全世界可靠性专业人员都是熟知的。有时可靠性方面的文章发表在下列的杂志和会议录上：

1. 美国海军后勤学研究季刊(Naval Research Logistics Quarterly)

2. 技术度量(Technometrics)

3. 美国环境科学学会技术年会会议录 (Proceedings of the Annual Technical Meeting of the Institute of Environmental Sciences, U.S.A)

4. 美国工业工程师协会会刊(AIIE "American Institute of Industrial Engineers" Trasaction)

5. 匹兹堡模型建立和模拟年会会议录(Proceedings of Annual Pittsburgh Conference on Modeting and Simulation)

6. 美国运筹学会杂志 (Journal of the Operations Research Society of America)

7. 美国机械工程学会各种会议录(Various Conference Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers)

8. 应用概率论杂志(英)(Journal of Applied Probability)

9. 应用力学杂志(美)(Journal of Applied Mechanics)

10. 美国电气与电子工程师学会动力装置与系统学报 (IEEE Transactions on Power Apparatus and System)

11. 电力工业可靠性工程会议录(Proceedings of the Reliability Engineering Conference for the Electric Power Industry)

如前所述, 作者的意图不是想列出在可靠性学科上间断地发表文章的杂志和会议录的全部清单。但主要的杂志与会议录已列于上面清单中。此外, 有关可靠性领域的重要美军标准、手册和其他文件列于本章最后的〔1〕到〔54〕参考文献中。

1.3 可靠性保证计划的需求

为了使一个系统整体费用最小, 高可靠性是极为重要的。在一些美国军事研究中已经发现有些系统在它们工作状态下, 每年的维修费用已经达到原来采购费用的10倍。其他需要强调高系统可靠性的因素是: 先进的技术、高的采购费用、不方便、声誉的损失、国家安全的损失、竞争等。由于这些原因在系统的计划、设计和运行中考虑可靠性是至为重要的。由于在系统研制的早期阶段能够在可靠性与费用和性能参数之间权衡轻重, 所以在系统