

CAMBRIDGE



现代数学译丛

13

最优可靠性设计： 基础与应用

〔美〕Way Kuo V.Rajendra Prasad 著
Frank A.Tillman Ching-Lai Hwang

郭进利 阎春宁 译
史定华 校



科学出版社

现代数学译丛 13

最优可靠性设计：基础与应用

〔美〕 Way Kuo V. Rajendra Prasad 著
Frank A. Tillman Ching-Lai Hwang

郭进利 阎春宁 译
史定华 校

本书获得

国家自然科学基金项目(批准号: 70871082)资助

上海市重点学科建设项目(批准号: S30504)资助

科学出版社

北 京

图字: 01-2009-7760

内 容 简 介

本书提供了系统可靠性和可靠性最优化的详细介绍。从元件可靠度提高和冗余排列的角度,论述了最大化系统可靠度的最新技术,展示了几个研究案例,并说明了最优化技术是如何应用于实际问题的。也特别注意寻找可靠性和费用之间平衡的最优化方法。

本书开始回顾了关键的背景材料,讨论了许多最优化模型,接着涉及了最优化工具,如启发式方法、离散最优化、非线性规划、混合整数规划、最优指派和智能化启发式算法,也描述了这些工具的计算机实现。案例研究涵盖了工程应用的不同领域,包括微电子组装、软件开发及核反应堆维护。

本书有大量的数值例子,还包含了超过180道习题。因此,本书适合作为可靠性工程和运筹学研究生水平的教材,对工程师也有参考价值。

本书第一作者郭位(Way Kuo)是美国国家工程院院士,台湾“中央研究院”院士,中国工程院外籍院士,国际品质学院院士及国际电机电子工程学会、工业工程学会等的会士,现任香港城市大学校长, *IEEE Trans. On Rel.* 杂志主编。

Optimal Reliability Design, ISBN 978-0521-031912 by Way Kuo, V. Rajendra Prasad, Frank A. Tillman, and Ching-Lai Hwang first published by Cambridge University Press 2001

All rights reserved.

This **simplified Chinese** edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & Science Press Ltd. 2011

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Science Press Ltd.

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾省)销售。

图书在版编目(CIP)数据

最优可靠性设计:基础与应用/(美)郭位(Kuo,W.)等著;郭进利,阎春宁译.
—北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-030273-1

I. ①最… II. ①郭… ②郭… ③阎… III. ①最优化-可靠性-设计 IV. ①TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011) 第 022183 号

责任编辑:王丽平 房 阳/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011年3月第一次印刷 印张:22.12

印数:1—2500 字数:423 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译 者 序

很高兴《最优可靠性设计：基础与应用》中译本与大家见面了。

可靠性理论诞生于 20 世纪 40 年代末, 首先应用于通信和运输系统. 随着社会的发展和技术的进步, 可靠性理论也逐步成熟, 其应用领域涵盖了所有的工业部门.

Way Kuo, V. Rajendra Prasad, Frank A. Tillman 和 Ching-Lai Hwang 著的《最优可靠性设计：基础与应用》提供了系统可靠性和可靠性最优化的详细介绍. 读者通过本书的学习, 不仅可以掌握系统可靠性及其最优化方面的基础知识, 还可以了解大量的实际应用案例. 本书内容对于大学高年级学生和研究生深入学习和掌握运筹学及其相关理论极有帮助, 而书中的案例研究对于从事具体工作的工程师有着很好的指导意义.

上海大学阎春宁教授翻译了第 1~6 章, 研究生林斐、曹盼盼、周伟、侯卜魁、鲁姣、张伟、海蕴博、祝罗骁等参加了前 6 章的研讨和稿件录入工作. 上海理工大学郭进利教授翻译了其余部分, 研究生王卿、周章金、张恬以及上海理工大学 2007 级“质量控制与管理”课程的研究生参加了研讨和稿件录入工作.

译者诚挚地感谢史定华教授对全书进行了译文润色和专业术语的校订. 感谢王丽平编辑及科学出版社诸多同志对全书作了极其认真和辛苦的编辑工作.

中译本的出版得到了国家自然科学基金项目 (批准号: 70871082) 和上海市重点学科建设项目 (批准号: S30504) 资助.

将一本高水平且涵盖面甚广的可靠性优化专著原汁原味地翻译成中文, 是一项艰巨的工作. 限于译者水平, 对原著的理解和翻译难免有不妥之处, 敬请读者不吝批评指正. 如能将译著中的纰漏之处用电子邮件的方式告诉我们 (phd5816@163.com, chniyan@shu.edu.cn), 译者将不胜感激.

译 者

2010 年 5 月

前 言

诞生于 20 世纪 40 年代末 50 年代初的可靠性工程首先应用于通信和运输系统. 许多早期的工作局限于系统可靠性分析. 这些基于假设所发展的理论, 并没有认真考虑由设计者和用户提出的实际问题. 例如, 在平衡费用和性能这个传统与现代工业的关键内容方面, 早期的理论既没有受到实际工作的系统验证, 也没有分析人员应用后提出的完整报告. 进一步, 理论假设与实际涉及的问题常有脱节, 因此, 大量的现有理论已无法解决许多现存的可靠性问题. 自从 20 世纪 80 年代起, 工业界增强了质量意识, 可靠性工作者更专注于理论结合实际地在设计和维修阶段去寻找提高产品和过程可靠性的途径. 为了胜出对手, 在有竞争力的费用下保证高的系统可靠性是基本前提. 本书将介绍系统可靠性及其最优化方面的基础和应用. 这些基础知识能成为有用的设计工具. 贯穿本书的是各种算法的释例和拓广情况研究.

第 1 章呈现了可靠性系统基础知识的完整框架, 包括许多重要的系统结构和建模方法. 通过仔细的设计和分析, 在经济和物理约束限制下, 说明了高可靠性是如何进入系统的. 这一章非正式地讨论了后面各章将深入展开的可靠性最优化问题. 而建模技巧的应用在案例研究中能被找到. 提高系统可靠性的某些重要原则如下:

- (1) 保持系统尽可能简单, 同时尽可能与性能要求相符;
- (2) 提高系统中元件的可靠度;
- (3) 对低可靠元件使用并联冗余;
- (4) 当工作元件失效时, 若能自动接入, 则使用储备冗余;
- (5) 若不能自动接入, 则通过修理去替换故障元件;
- (6) 一旦元件故障或某个固定时间周期先出现, 采用预防维修用新元件替换旧元件;
- (7) 对可互换的元件采用更好的安排;
- (8) 采用大的安全系数和产品改进管理程序;
- (9) 如 Kuo 等^[174] 指出的那样, 采用老化元件避免高的早期失效率.

上述步骤的实现通常会消耗更多的资源. 因此, 系统可靠性最优化问题一般都较为困难. 本书提供了问题的完整讨论和可靠性最优化技巧. 可靠性最优化可以分成以下几方面: ① 冗余分配问题, 决策变量是冗余数; ② 可靠性分配问题, 决策变

量是元件可靠度; ③ 可靠性-冗余分配问题, 决策变量是冗余数和元件可靠度的组合; ④ 元件指派问题, 决策变量是元件的安排, 它能使系统可靠度不同. 从计算复杂性角度来看, 即使串联系统中具有线性约束的简单冗余分配问题也是 NP 困难的. 要得到 NP 困难问题的精确最优解, 几乎不可能存在计算上有效的算法.

第 2 章介绍了 8 种类型可靠性最优化问题的概况, 以及简化问题规模的方法. 大多数系统可靠性最优化问题是具有特殊结构的非线性规划问题, 而决策变量或是整数、实数、0 和 1 或两者的混合. 尽管对非线性规划问题提出了许多算法, 但用于大规模问题时仅有少数算法是有效的. 对求解一般的非线性规划问题, 没有一种能被分类为“算法”的方法证明它肯定优于另一种. 为冗余分配问题开发的几种强有力的启发式方法, 以及某些具有优势的周知的数学规划方法, 已被巧妙地用于可靠性最优化. 事实上, 某些启发式方法也是建立在非线性规划方法的基础上. 20 世纪 90 年代, 智能化算法开始用于求解各种可靠性最优化问题. 那时, 遗传算法、禁忌搜索法、模拟退火法及多目标最优化方法同时被提了出来. 可靠性最优化技术大致分类如下:

- (1) 解冗余分配的启发式方法;
- (2) 解冗余分配的智能化方法, 包括遗传算法、禁忌搜索法及模拟退火法;
- (3) 解冗余分配的精确算法:
 - (i) 动态规划;
 - (ii) 隐枚举法;
 - (iii) 分支定界方法;
 - (iv) 字母顺序搜索法;
 - (v) 整数规划;
 - (vi) 混合整数规划;
 - (vii) 非线性规划技术;
- (4) 解可靠性-冗余分配的近似方法 (基于非线性规划);
- (5) 多目标最优化方法;
- (6) 单调关联系统中的元件最优指派;
- (7) 效用函数最优化.

第 3~8 章描述了这些方法并提供了释例. 在第 3~7 章的基础上, 第 8 章介绍了几种可靠性-冗余分配方法. 第 8 章提出的问题都是混合整数规划类型, 系统设计师可以选择特定的设计参数.

第 9 章提出了可靠性系统中可互换元件的最优指派, 此时全局最优解总是存在. 第 9 章描述的问题不是典型的数学规划, 它们是顺序统计量的特殊情形. 对 n

中取 k 和 n 中连续取 k 的结构, 第 9 章给出了各种最优设计样式.

第 10 章讨论具有多个准则和目标的可靠性最优化. 可靠性最优化的其他方法(如效用函数极小化方法) 在第 11 章介绍.

大量案例的详细讨论呈现在第 12~15 章. 对由集成电路组装的产品, 在有限资源下老化试验的最优化在第 12 章介绍. 同时还讨论了一个实际的案例, 该案例包括在老化方案、老化设备以及通过老化提高可靠性之间取得平衡. 随着现代系统的复杂性增加, 大量使用各种软件. 关注软件可靠性的软件设计最优化在第 13 章有所涉及. 在那里, 由不同软件公司开发的冗余软件往往存在共因失效. 设计参数是困难的混合整数型问题, 包括确定软件调试时间和选择冗余软件数目. 第 14 章介绍最优维修计划策略的一个案例研究, 其中一种实现多个准则的决策方法被用于可靠性最优化问题. 其他三个重要的最优化案例研究在第 15 章中, 包括涉及维修性模型的案例、压水堆 (PWR) 冷却系统的案例以及天然气管道设计的案例.

在案例研究中, 会出现无法达到最优解的情况. 进一步, 认识到在可靠性最优化问题中, 存在估计可靠性和经济与物理约束两方面参数的不确定性. 然而, 为了作出一个好的决策, 基于第 3~11 章的原理和算法, 用一种优化的思考过程去替代试探式的方法是必要的.

在每章末尾附有练习, 书末包括了 4 个附录.

目 录

译者序

前言

图目录

表目录

第 1 章	系统可靠性简介	1
1.1	背景	1
1.2	问题的一般描述	1
1.3	系统的硬件, 人的因素, 软件及环境	2
1.3.1	硬件可靠性	2
1.3.2	人的因素	3
1.3.3	软件	3
1.3.4	物理和经济约束	4
1.4	系统有效度模型	5
1.4.1	系统有效度的指标	5
1.4.2	系统有效度中人的因素	7
1.4.3	任务有效度	8
1.5	基本系统结构与可靠度函数	9
1.5.1	串联结构	9
1.5.2	并联结构	10
1.5.3	串-并联结构	11
1.5.4	并-串联结构	11
1.5.5	层次型的串-并联结构	13
1.5.6	n 中取 k 系统	14
1.5.7	复杂结构	14
1.5.8	单调关联系统	18
1.5.9	单元件系统的冷储备冗余	20
1.5.10	开关有缺陷的冗余系统	22

1.5.11 多因失效模型	24
练习	26
第 2 章 可靠性最优化模型分析与分类	29
2.1 引言与符号	29
2.2 最优化模型	30
2.3 问题的简化	34
2.4 系统可靠性最优化分类	35
2.5 可靠性最优化的新发展	39
2.5.1 冗余分配的启发式算法	40
2.5.2 冗余分配的智能启发式算法	41
2.5.3 冗余分配的精确方法	46
2.5.4 冗余可靠性分配的启发式算法	47
2.5.5 可靠性系统中的多目标最优化	48
2.5.6 单调关联系统中可互换元件的最优指派	49
2.5.7 效用函数的最优化	52
2.6 应用	52
2.7 讨论	52
练习	54
第 3 章 用启发式方法进行冗余分配	55
3.1 引言	55
3.2 定义和例子	55
3.3 基于 1 阶邻域解的启发式方法	59
3.3.1 Misra 和 Sharma 及 Venkateswaran 的方法	60
3.3.2 Gopal Aggarwal 和 Gupta 的方法	62
3.3.3 Nakagawa-Nakashima 的方法	64
3.3.4 NN 方法针对复杂系统的一种扩展	66
3.3.5 史定华方法	67
3.4 其他启发式方法	70
3.4.1 Kohda-Inoue 方法	70
3.4.2 Kim-Yum 方法	70
3.4.3 Ushakov 的启发式方法	73
3.4.4 Misra 方法	74

3.5 讨论	75
练习	76
第 4 章 用动态规划进行冗余分配	78
4.1 引言	78
4.2 基本动态规划方法	80
4.3 使用拉格朗日乘子的动态规划方法	85
4.4 使用优势序列的动态规划方法	92
4.5 层次型串-并联系统的动态规划方法	98
4.6 讨论	101
练习	101
第 5 章 用离散最优化方法进行冗余分配	105
5.1 引言	105
5.2 0-1 线性规划形式	107
5.3 分支定界方法	108
5.3.1 串联系统的冗余分配	109
5.3.2 复杂系统的冗余分配	114
5.4 部分枚举法	117
5.5 字母顺序法	119
5.6 讨论	123
练习	123
第 6 章 用非线性规划方法进行可靠性最优化	125
6.1 引言	125
6.2 拉格朗日方法	127
6.3 惩罚式方法	131
6.3.1 障碍法	131
6.3.2 惩罚法	134
6.3.3 混合惩罚函数法	135
6.3.4 带拉格朗日乘子的惩罚法	135
6.4 讨论	139
练习	140
第 7 章 可靠性系统最优化的智能启发式算法	142
7.1 引言	142

7.2 遗传算法	142
7.2.1 用于系统可靠性优化的遗传算法	147
7.3 模拟退火方法	160
7.3.1 模拟退火用于可靠性优化	162
7.3.2 非平衡模拟退火算法	165
7.4 禁忌搜索法	167
7.4.1 禁忌搜索用于可靠性优化	169
7.5 讨论	173
练习	174
第 8 章 可靠性—冗余分配	176
8.1 引言	176
8.2 Tillman, Hwang 及 Kuo 的方法	178
8.3 Gopal, Aggarwal 及 Gupta 的方法	180
8.4 Kuo, Lin, Xu 及 Zhang 的方法	182
8.5 Xu, Kuo 及 Lin 的方法	183
8.6 替代约束方法	186
8.6.1 用 DP 法解替代问题 $S(u)$	190
8.7 进化算法	192
8.7.1 用于可靠性冗余最优化的遗传算法	192
8.7.2 用于可靠性冗余最优化的进化算法	193
8.8 讨论	197
练习	197
第 9 章 可靠性系统中元件指派	200
9.1 引言	200
9.2 串—并联系统中元件的最优指派	200
9.2.1 串—并联系统中元件的最优指派	202
9.2.2 用于元件最优指派的启发式方法	208
9.2.3 两路径集的最优指派: 双目标法	211
9.3 并—串联系统中元件的最优指派	213
9.3.1 并—串联系统中元件的最优指派	214
9.3.2 两个割集的最优指派: 双目标法	219
9.4 单调关联系统的元件指派	223

9.4.1 通过成对互换元件的最优指派	223
9.4.2 Malon 的贪婪算法	225
9.4.3 Lin 和 Kuo 的贪婪算法	225
9.4.4 不变最优指派	228
9.5 讨论	230
练习	231
第 10 章 多目标可靠性系统	233
10.1 引言	233
10.2 多目标决策的分类	235
10.3 多目标决策的解	236
10.4 多目标的可靠性问题	238
10.5 有多目标的可靠性冗余分配	239
10.5.1 问题描述	239
10.5.2 多目标优化方法	242
10.6 模糊多目标优化	244
10.7 讨论	248
练习	249
第 11 章 系统可靠性最优化的其他方法	250
11.1 引言	250
11.2 效用函数的最优化	250
11.2.1 串联系统的 Albert 方法	251
11.2.2 单调关联系统的 Dale 和 Winterbottom 方法	252
11.3 讨论	254
练习	254
第 12 章 有限资源下老化测试的最优化	255
12.1 引言	255
12.2 问题的描述	256
12.2.1 目标函数和可靠性约束	257
12.2.2 老化测试资源	257
12.2.3 问题形式	258
12.3 最优化与决策树	258
12.4 应用于电子产品	261

12.4.1	假设	261
12.4.2	无约束最小化	261
12.4.3	系统可靠度	262
12.4.4	有约束最小化	262
12.5	讨论	264
	练习	265
第 13 章	软件可靠性最优化设计的案例研究	267
13.1	引言	267
13.2	基本执行时间模型	267
13.3	资源使用	268
13.4	可靠性建模	269
13.4.1	双元件模型	269
13.4.2	三元件模型	272
13.5	软件可靠性最优化问题的形式	273
13.5.1	一个纯软件系统	273
13.5.2	软硬件混合系统	274
13.6	讨论	276
	练习	277
第 14 章	定期最优维修策略案例研究	279
14.1	引言	279
14.2	评价函数	280
14.3	严格筛选	281
14.4	字母顺序法	282
14.5	Waltz 字母顺序法	283
14.6	SEMOPS: 交互方法	285
14.7	结论	288
第 15 章	可靠性最优化的案例研究	289
15.1	任务有效性维修的案例研究	289
15.2	PWR 冷却系统的案例研究	291
15.3	天然气管道设计的案例研究	296
	练习	300

参考文献	301
附录 1 动态规划概述	319
附录 2 Hooke-Jeeves (H-J) 算法	321
附录 3 从 U^k 到 U^{k+1} 的多面体推导	323
附录 4 n 中连续取 k 系统	325
索引	328

图 目 录

图 1.1	系统性能要素示意图	2
图 1.2	系统有效度的综合模型	6
图 1.3	串联结构	9
图 1.4	并联结构	10
图 1.5	一个串-并联系统	11
图 1.6	并-串联结构	12
图 1.7	并-串联与串-并联结构的比较	13
图 1.8	5 个元件组成的层次型串-并联结构	13
图 1.9	并-串联系统与复杂系统的比较	15
图 1.10	桥式网络	15
图 1.11	在图 1.10 基础上的 5 元件结构图	17
图 3.1	4 个状态间的转移	71
图 5.1	分支定界法的图形描述	108
图 6.1	复杂系统示意图	126
图 7.1	染色体 x 的设计	157
图 7.2	染色体 x 相应的设计	160
图 7.3	10 元件复杂结构	163
图 7.4	双桥结构系统	169
图 8.1	THK 方法的流程图	179
图 9.1	一个 7 元件单调关联系统	224
图 9.2	一个复杂单调关联系统	226
图 10.1	在目标函数空间中的解	236
图 10.2	最大化问题的一个最优解	237
图 10.3	燃气轮机的超速检测系统原理图	239
图 12.1	有和没有老化测试的元件失效率	256
图 12.2	示意图	257
图 12.3	决策的流程图	259

图 13.1	两元件软件的模型图	269
图 13.2	三个软件元件的模型图	272
图 13.3	n 个冗余元件的模型图	272
图 13.4	n 个冗余元件的一般 Markov 模型	273
图 14.1	用最严格挑选方法的最优替换年龄	281
图 14.2	通过字母顺序法找替换年龄	282
图 14.3	通过 Waltz 字母顺序法获得的替换年龄	284
图 15.1	目标决策树	289
图 15.2	PWR 冷却系统	291
图 15.3	有 n 条支路的 PWR 冷却系统	292
图 A2.1	Hooke-Jeeves 方法的流程图	322

表 目 录

表 1.1	硬件可靠度和软件可靠度的差异	4
表 1.2	硬件和人的可靠性对比表	7
表 2.1	按系统结构分类的参考文献	36
表 2.2	按问题类型分类的参考文献	37
表 2.3	按照最优化方法分类的参考文献	39
表 2.4	系统可靠度最优化方法的应用	52
表 3.1	例 3-1 中的系数	57
表 3.2	例 3-2 中的系数	57
表 3.3	例 3-4 中的系数	59
表 3.4	运用 MSV 方法所得例 3-1 的迭代结果	61
表 3.5	运用 GAG1 方法所得例 3-1 的迭代结果	64
表 3.6	运用 NN 方法所得例 3-3 的迭代结果	66
表 3.7	用扩展的 NN 方法所得例 3-2 的解	67
表 3.8	用史定华方法所得例 3-2 的解	69
表 4.1	动态规划方法分类	78
表 4.2	例 4-1 中阶段 1 的计算结果	82
表 4.3	例 4-2 的计算结果	84
表 4.4	对几个 λ 值的最优分配	88
表 4.5	$\lambda = 0.0015$ 时的 DP 解	89
表 4.6	$\lambda = 0.0015$ 时的 DP 解	90
表 4.7	$\lambda = 0.0015$ 时的 DP 解	91
表 4.8	1 阶分配	94
表 4.9	2 阶分配	95
表 4.10	3 阶分配	96
表 4.11	4 阶分配	96
表 4.12	优势的 5 阶分配	97
表 4.13	例 4-6 的可靠度和成本	99