

国外大学优秀教材——工业工程系列（翻译版）

可靠性与维修性 工程概论

（美）Charles E. Ebeling 著

康锐 李瑞莹 王乃超 张叔农 等 译

$$N(t_2) - N(t_1) = j = \frac{m(t_1, t_2) e^{-m(t_1, t_2)}}{\beta} \quad A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

MTBF
AN INTRODUCTION TO

Pr{N(t_1, t_2) = j} = \frac{m(t_1, t_2) e^{-m(t_1, t_2)}}{\beta}

Reliability and Maintainability Engineering

Pr{N(t_1, t_2) = j} = \frac{m(t_1, t_2) e^{-m(t_1, t_2)}}{\beta}

CHARLES E. EBELING

$$MTTF = \theta \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})$$

$$A = \frac{BF}{MTBF + MTTR}$$

$$\Pr\{N(t_2) - N(t_1) = j\} =$$

$$N(t_2) - N(t_1) = j = \frac{m(t_1, t_2) e^{-m(t_1, t_2)}}{\beta} \quad MTTF = \theta \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})$$

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

$$R(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(t') dt']$$

$$R(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(t') dt']$$

$$A = \frac{MT}{MTBF +}$$

$$\Pr\{N(t_2) - N(t_1) = j\} = \frac{m(t_1, t_2) e^{-m(t_1, t_2)}}{\beta}$$



McGraw-Hill INTERNATIONAL EDITIONS
Electrical Engineering Series

$$MTTF = \theta$$

$$R(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(t') dt']$$

清华大学出版社

国外大学优秀教材——工业工程系列（翻译版）

可靠性与维修性 工程概论

（美）Charles E. Ebeling 著

康锐 李瑞莹 王乃超 张叔农 等 译

清华大学出版社
北京

An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering

by Charles E. Ebeling

EISBN: 0-07-115248-2

Copyright © 1997 by Charles E. Ebeling Reissued 2005 by Waveland Press, Inc.

The English language edition of this book is published by Waveland Press, Inc.

4180 IL Route 83, Suite 101, Long Grove, Illinois 60047 United States of America

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2010-4103

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

可靠性与维修性工程概论/(美)埃贝灵(Ebeling, C. E.)著; 康锐等译.--北京: 清华大学出版社, 2010. 8

(国外大学优秀教材·工业工程系列)

ISBN 978-7-302-23233-9

I. ①可… II. ①埃… ②康… III. ①可靠性工程—概论—高等学校—教材 ②维修性—概论—高等学校—教材 IV. ①TB114. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 127264 号

责任编辑: 张秋玲

责任校对: 刘玉霞

责任印制: 孟凡玉

出版发行: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 清华大学印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×230 印 张: 25.5 字 数: 556 千字

版 次: 2010 年 8 月第 1 版 印 次: 2010 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 58.00 元

产品编号: 028801-01

译者序

一般来说,翻译好一本书是一件很艰苦的工作,所以当清华大学出版社委托我翻译这本教材时,我犹豫再三,主要是担心不能集中时间投入足够的精力去保证翻译的质量。但是,经过认真学习这本英文版教材,我还是下决心组织我的教学、科研团队开始了这本教材的翻译工作。促成我做出这个决定的原因有两个方面。首先,这本书确实是一部优秀的可靠性与维修性工程基础知识教材。我从事了20多年的可靠性与维修性工程教育和科学研究工作,以我的经验来看,这本教材做到了基础理论与工程实践并重,既有详细的概率论和数理统计的基础知识,又有大量的工程应用案例,更重要的是做到了二者的有机结合。阅读这本教材,读者会产生“知其然,且知其所以然”,并能达到“学以致用”的目的。其次,这本书确实能满足国内大学开展可靠性与维修性工程教育的需求。随着我国社会经济的发展,我国工业界对可靠性与维修性技术日益重视起来,相应地对质量与可靠性专业高层次人才的需求也越来越迫切。1985年,我国可靠性工程的先驱杨为民教授在北京航空航天大学创办了我国第一个可靠性工程专业,如果说当时还有些“曲高和寡”、“孤独前行”的先行者的悲壮,那么20余年后的今天国内大学在工业工程专业、机械工程专业、电子工程专业、飞行器设计专业开设的可靠性工程课程犹如雨后春笋。2006年,教育部正式批准建立质量与可靠性工程本科专业,北京航空航天大学又率先在这个专业招收本科生,开始了新一轮的探索前进。这些可喜的变化预示着我国可靠性工程教育将进入快速发展的新时期。

因此,从上述两个方面来看,把这本优秀的教材介绍到国内,也是我的一种责任。为了完成这个任务,我组织我的教学与科研团队中一批风华正茂的年轻教师,从2008年底开始了这本教材的翻译工作。他们是:北京航空航天大学的李瑞莹、王乃超、张叔农、何益海博士,清华大学的文美林、陈颖博士,东北大学的王正博士。他们的分工是:第1~6章由文美林翻译、王乃超校译;第7章由陈颖翻译、王乃超校译;第8章由陈颖翻译、李瑞莹校译;第9~11章由王乃超翻译、李瑞莹校译;第12,15和17章由何益海翻译、张叔农校译;第13,14和18章由王正翻译、张叔农校译;第16章由陈颖翻译、张叔农校译。最后,我对全书进行了认真的审校。在此过程中,黄小凯同学协助完成了第10章和第11章部分翻译工作,李

瑞莹老师负责完成了全书的文字梳理和编辑工作。正是他们卓有成效的工作,使得我对全书的审校过程成为一种愉悦的阅读过程。当然,虽然我们在翻译过程中尽了最大的努力,但是由于水平有限,不当和疏漏之处在所难免,敬请读者不吝指正。

康 锐

北京航空航天大学可靠性与系统工程学院

前 言

关于本书

本书是可靠性与维修性工程的教材,适用对象是高年级大学生和一年级研究生。本书大部分内容可以用一学期课时讲授,两个小学期就可以覆盖本书所有内容。本书内容分为以下3部分:第Ⅰ部分是可靠性模型基础,第Ⅱ部分介绍故障数据分析,第Ⅲ部分提供可靠性工程应用案例,并在其中介绍了可靠性与维修性工作项目的应用方法。当前大多数可靠性教材主要集中在建模或故障数据的统计分析上,要求学生具有广泛的概率论和统计学背景。本书内容涵盖的可靠性与维修性理论更广,但是在形式上避免了对理论方法的证明。本书鼓励对较深理论知识有兴趣的学生阅读高级课本或适合的技术期刊。

本书运用 MS-Dos 软件求解问题。因为故障和维修数据分析要求的计算精度较高,运用软件可以分担学生在计算方面的负担,作者鼓励学生使用可靠性商业软件求解问题。在工程实践中,计算机广泛应用于可靠性或维修性工程数据分析,因此,计算机软件应用也应该是可靠性知识学习的一部分。所获得软件只能用于教学。

目的

本书面向工科学生、工程师或对概率论和统计学有初步了解的技术管理人员介绍可靠性与维修性工程的相关知识,侧重于对概率论和统计学知识在可靠性中的运用。因此,本书中许多公式的推导过程都放在附录中,书中所用符号在坚持与惯例一致的前提下尽可能的简单化。书中将对相关知识深入介绍的参考书目放在了合适的位置,这样有利于那些对概率论和统计学知识只有初步了解的读者进一步学习。本书的另一个目的就是让读者为学习更高深的可靠性与维修性工程知识做好准备,并使其在文献资料的阅读中掌握更多的相关知识。

作者希望本书的素材能够帮助学生收集并分析故障与维修数据,建立合适的可靠性与维修性模型,并把这些模型应用到产品、部件和系统设计当中,最终提升产品和系统的可靠性与维修性设计水平。

致谢

我要感谢许多(匿名)审稿人针对本书所提的宝贵建议,针对这些意见作者尽最大努力对书稿进行了修改。由于作者能力有限,修改稿可能没有达到他们的期望。如果我没有对众多研究生对本书所做工作表示感谢,那就是我的疏忽了。Ken Beasley 和 Colleen Donohue 在很多方面都给予了帮助,接下来的每个人对算例、习题以及结果校对都作出了贡献: Wibur Bhagat, Annette Clayton, David Gels, Ronald Niehaus, John Stahl 以及 James Wafzig。特别感谢主编以及在 McGraw-Hill 出版社和出版服务机构工作的所有工作人员,他们的建议和主编的点评对于创作一本通俗易懂的教材来说是非常有价值的。最后,特别感谢我的妻子 Patricia,在我创作这本书的时候,她放弃了很多本属于她的假期和夜晚。我把这本书献给她。

Charles E. Ebeling

University of Dayton

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 可靠性与维修性研究	2
1.1.1 可靠性改进	3
1.1.2 随机性与确定性故障现象	3
1.2 概念、术语和定义	4
1.3 应用示例	5
1.4 可靠性简史	7
1.5 本书范围	8
附录 1A 基础概率知识	10
1A.1 随机事件	10
1A.2 贝叶斯公式	12
1A.3 随机变量	13
1A.4 离散分布	13
1A.5 二项分布	13
1A.6 泊松分布	14
1A.7 连续分布	14

第 I 部分 可靠性模型基础

第 2 章 故障分布函数	19
2.1 可靠度函数	19
2.2 平均故障前时间	21
2.3 故障率函数	23

2.4	浴盆曲线	25
2.5	条件可靠度	27
2.6	小结	28
附录 2A	式(2.8)的推导	29
附录 2B	式(2.12)的推导	30
附录 2C	条件可靠度与故障率	30
附录 2D	线性浴盆曲线的中值计算	30
附录 2E	积分表	31
2E.1	不定积分	31
2E.2	定积分	31
	习题	32
第 3 章	恒定故障率模型	34
3.1	指数型可靠性函数	34
3.2	故障模式	36
3.2.1	CFR 型的故障模式	37
3.2.2	转换故障	38
3.3	应用	39
3.3.1	更新过程	39
3.3.2	重复载荷	40
3.3.3	可靠性的界	41
3.4	双参数指数分布	42
3.5	泊松过程	43
3.6	冗余与 CFR 模型	44
	习题	45
第 4 章	时间相关故障模型	48
4.1	威布尔分布	48
4.1.1	设计寿命、中值和众数	51
4.1.2	威布尔分布的老练筛选	52
4.1.3	故障模式	52
4.1.4	相同威布尔型部件	53
4.1.5	三参数威布尔分布	54
4.1.6	考虑冗余设计的威布尔型故障	54

4.2	正态分布	55
4.3	对数正态分布	58
附录 4A	推导威布尔分布的 MTTF	61
附录 4B	推导威布尔分布的众数	61
附录 4C	最小极值分布	62
附录 4D	包含两个威布尔型部件冗余系统的故障率	62
	习题	63
第 5 章	系统可靠性	66
5.1	串联系统	66
5.2	并联系统	68
5.3	串并联混合系统	69
5.3.1	高层级与低层级冗余	69
5.3.2	k/n 冗余	70
5.3.3	复杂系统	71
5.4	系统结构函数、最小割集以及最小路集(选修)	74
5.4.1	关联系统	76
5.4.2	最小路集与最小割集	76
5.4.3	系统的边界	76
5.5	共模故障	78
5.6	三态设备	78
5.6.1	串联结构	79
5.6.2	并联结构	79
5.6.3	低层级冗余	80
5.6.4	高层级冗余	80
	习题	81
第 6 章	状态相关系统	86
6.1	马尔可夫分析	86
6.2	均分负载系统	88
6.3	备用系统	89
6.3.1	备用单元相同	91
6.3.2	存在转换故障的备用系统	91
6.3.3	三部件备用系统	92

6.4	降级系统	93
6.5	三状态设备	94
附录 6A	两部件冗余系统的求解过程	94
附录 6B	均分负载系统的求解过程	95
附录 6C	备用系统模型的求解过程	96
	习题	96
第 7 章	可靠性物理模型	99
7.1	协变量模型	99
7.1.1	比例风险模型	99
7.1.2	位置-尺度模型	101
7.2	静态模型	102
7.2.1	随机应力和定常强度	103
7.2.2	定常应力和随机强度	103
7.2.3	随机应力和随机强度	104
7.3	动态模型	107
7.3.1	周期性载荷	107
7.3.2	随机载荷	108
7.3.3	随机固定应力和强度	109
7.4	故障物理模型	109
	习题	112
第 8 章	可靠性设计	115
8.1	可靠性指标和系统度量	116
8.1.1	系统效能	117
8.1.2	经济性分析和寿命周期费用	118
8.2	可靠性分配	120
8.2.1	指数分布情况	120
8.2.2	最优分配	120
8.2.3	ARINC 法	122
8.2.4	AGREE 法	122
8.2.5	有冗余单元的分配	123
8.3	设计方法	124
8.3.1	零部件和材料选择	124

8.3.2	降额	126
8.3.3	应力-强度分析	127
8.3.4	复杂性和技术	128
8.3.5	冗余	128
8.4	故障分析	131
8.4.1	系统定义	131
8.4.2	故障模式识别	132
8.4.3	确定故障原因	132
8.4.4	故障影响评估	132
8.4.5	严酷度等级划分	133
8.4.6	故障发生概率评估	133
8.4.7	危害度计算	134
8.4.8	确定纠正措施	134
8.5	系统安全性与故障树分析	136
8.5.1	故障树分析	136
8.5.2	最小割集	139
8.5.3	定量分析	141
	习题	142
第9章	维修性	147
9.1	停机时间分析	147
9.2	维修时间分布	148
9.2.1	维修时间服从指数分布	149
9.2.2	维修时间服从对数正态分布	149
9.3	随机点过程	150
9.3.1	更新过程	151
9.3.2	最小维修过程	153
9.3.3	大修和大修间隔期	156
9.4	系统维修时间	157
9.5	预防性维修下的可靠性	159
9.6	可修状态相关系统	161
附录9A	预防性维修模型的MTTF	164
附录9B	可修热储备系统的求解过程	164
附录9C	可修备用系统的求解过程	165

习题	166
第 10 章 维修性设计	169
10.1 维修要求	169
10.1.1 度量参数及指标	170
10.1.2 维修概念和程序	171
10.1.3 部件的可靠性和维修性	173
10.2 设计方法	174
10.2.1 故障隔离与自诊断	174
10.2.2 零件标准化和互换性	175
10.2.3 模块化和可达性	176
10.2.4 修理与更换	176
10.2.5 主动维修	179
10.3 人因和工效学	182
10.4 维修和备件供应	184
10.4.1 备件的有限源排队服务模型	184
10.4.2 备用部件	187
10.5 维修性预计和验证	189
10.5.1 维修性预计	189
10.5.2 维修性验证	190
附录 10A 生灭排队模型	192
习题	193
第 11 章 可用性	197
11.1 概念及内涵	197
11.1.1 固有可用度	198
11.1.2 可达可用度	198
11.1.3 使用可用度	199
11.1.4 通用的使用可用度	199
11.2 指数可用度模型	199
11.3 系统可用度	200
11.3.1 备用系统的可用度	201
11.3.2 稳态可用度	202
11.3.3 矩阵方法	203

11.4	检测和维修可用度模型	205
11.5	设计权衡分析	206
11.5.1	维修性分配	206
11.5.2	经济性分析	207
11.5.3	凹函数费用	208
11.5.4	凸函数费用	210
11.5.5	收益和寿命周期费用权衡	212
附录 11A	单个可修复单元的求解过程	213
习题	213

第 II 部分 故障数据分析

第 12 章	数据收集与经验分析法	219
12.1	数据收集	219
12.2	经验分析法	221
12.2.1	未分组完整数据	221
12.2.2	分组完整数据	227
12.2.3	未分组截尾数据	229
12.2.4	分组截尾数据	234
12.3	静态寿命估计	235
习题	236
第 13 章	可靠性试验	240
13.1	产品试验	240
13.2	可靠性试验	240
13.3	试验时间的计算	241
13.3.1	试验持续时间	242
13.4	老练试验	243
13.5	验收试验	246
13.5.1	二项验收试验	246
13.5.2	序贯试验	247
13.6	加速寿命试验	251
13.6.1	试验产品数	252

13.6.2	加速循环	252
13.6.3	恒定应力加速模型	253
13.6.4	其他加速模型	255
13.7	试验设计	258
13.8	竞争故障模式	261
附录 13A	试验时间期望的推导	261
附录 13B	试验时间期望(II型试验)	262
	习题	263
第 14 章	可靠性增长试验	266
14.1	可靠性增长过程	266
14.2	理想增长曲线	266
14.3	杜安增长模型	268
14.4	AMSAA 模型	271
14.4.1	幂律强度函数的参数估计	272
14.5	其他增长模型	275
	习题	277
第 15 章	故障与维修分布识别	279
15.1	识别候选分布	279
15.2	概率图和最小二乘曲线拟合	282
15.2.1	指数分布图	283
15.2.2	威布尔分布图	285
15.2.3	正态分布图	289
15.2.4	对数正态分布图	291
15.2.5	多重截尾时间图	293
15.3	参数估计	294
15.3.1	极大似然估计	295
15.3.2	指数分布的 MLE	295
15.3.3	威布尔分布的 MLE	296
15.3.4	正态分布和对数正态分布的 MLE	297
15.3.5	多重截尾数据的 MLE	298
15.3.6	位置参数估计	299
15.4	置信区间	300

15.4.1 常数故障率模型的置信区间	301
15.4.2 其他分布的置信区间	303
15.5 协变量模型的参数估计	304
附录 15A 威布尔极大似然估计	306
附录 15B 多重截尾数据下的威布尔极大似然估计	306
附录 15C 截尾数据下正态分布和对数正态分布的极大似然估计	306
习题	307
第 16 章 拟合优度检验	310
16.1 卡方拟合优度检验	311
16.2 指数分布的 Bartlett 检验	316
16.3 威布尔分布的 Mann 检验	317
16.4 正态与对数正态分布的 Kolmogorov-Smirnov 检验	319
16.5 幂律过程模型检验	322
16.6 关于拟合分布	324
习题	325

第Ⅲ部分 应 用

第 17 章 可靠性评价和应用	331
17.1 案例 1: 冗余设计	331
17.2 案例 2: 老练试验	333
17.3 案例 3: 预防性维修分析	336
17.4 案例 4: 可靠性分配	340
17.5 案例 5: 可靠性增长试验	341
17.6 案例 6: 可修复系统分析	342
17.7 案例 7: 多重截尾数据	344
习题	346
第 18 章 实施	347
18.1 目标、功能和过程	347
18.2 可靠性与维修性的经济性与系统设计	348
18.2.1 寿命周期费用模型	350

18.2.2 最小维修	352
18.3 对组织的考虑	353
18.4 数据源与数据收集方法	355
18.4.1 现场数据	356
18.4.2 过程可靠性与使用故障	357
18.4.3 外部数据资源	358
18.5 产品的责任、保证以及相关事项	359
18.6 软件可靠性	361
参考文献	362
附录 统计和数据表	368