

舰船产品可靠性工程

可靠性设计

吴德健

李守仁 等编著

王 松

哈尔滨工程大学出版社

U662.3

W75

425762

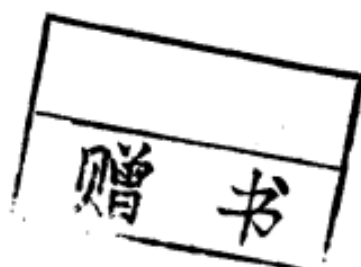
舰船产品可靠性工程

可靠性设计

吴德铭
李守仁 等编著
王 善



00425762



哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书阐述了可靠性的基本概念、基本理论、基本技术和方法,结合大量具体实例,说明了其在舰船产品可靠性设计中的应用,同时介绍了可靠性工程领域的某些最新发展。

本书共十八章,第一章和第二章介绍了可靠性的基本概念和基本理论;第三章到第七章介绍了可靠性的基本技术和方法;第八章到第十六章介绍了可靠性设计中的某些特定问题,包括软件可靠性设计、维修性设计、人机工程设计、结构可靠性设计以及费用分析、效能分析、权衡技术和设计过程中的可靠性增长;第十七章和第十八章介绍了可靠性设计管理和评审及生产和使用中的可靠性问题。

本书既注意了理论的系统性和完整性,也注意了各章节的相对独立性,能够满足不同专业设计人员的需要。本书是从事舰船产品可靠性设计的工程技术人员教材,同时也可作为工程技术人员进行产品可靠性设计的参考资料及大专院校本科生和研究生教学参考书。

DZ11/25

舰船产品可靠性工程 可靠性设计

编著者:吴德铭 李守仁 王善 等
责任编辑:李英

哈尔滨工程大学出版社出版发行
新华书店经销
哈尔滨华升电脑排版有限公司排版
黑龙江省新华印刷二厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 42 字数 1000 千字
1995 年 12 月 第 1 版 1995 年 12 月第 1 次印刷
印数:1~2000 册

ISBN 7-81007-556-X
TH·22 定价:60.00 元

编 著 者

主 编	吴德铭		
副主编	李守仁	王 善	
编著者	荆兆寿	张志俭	乐慧康
	付毓维	顾苏林	黄世斌
	赵连惠		

序

可靠性工程作为一门新兴学科仅有半个世纪的历史。而从 70 年代起,由于航空航天工业和武器装备竞争的需要,可靠性工程的理论研究和应用技术研究进入了全面发展阶段,取得了许多令人瞩目的成果。在诸如中东和海湾战争中,技术精良的武器装备长期无故障的工作及良好的维修性,对于取得战争的决胜性胜利,起到了至关重要的作用。性能优良的武器装备必须同时具备高可靠性,才能称其为高技术装备。所以开展武器装备的可靠性研究,具有极其重要的现实意义。

在民用生产设备和机电产品中,可靠性同样具有重要意义。在经济效益高的生产设备和生产线中,在技术含量高以及价值高的产品中,对其自身的可靠性要求也高,这种产品才具有生命力和竞争力。

我国的可靠性工作是 60 年代起步的,与国际先进水平相比,存在不少差距。对于舰船可靠性系统工程的研究和实践,与国内先进水平相比,又有差距。作为舰船装备的研制工作者,不论是工程技术人员还是工程管理人员,在努力提高舰船装备性能和研制水平的同时,还要努力提高装备的可靠性和维修性,使研制的装备和产品(无论军用或民用)的寿命周期必需费用不断降低,使其综合效能有较大提高,这是舰船工业发展的必然趋势。

近年来,我们开展了一系列舰船可靠性的研究工作。并逐步将这些研究成果应用于舰船的可靠性设计中。舰船及舰用设备在未来战争中,是一体化作战的一部分,必须用系统工程的概念,对舰船可靠性、维修性提出一定的指标和要求。这些指标和要求,必须体现在技术设计中。可靠性设计应成为舰船技术设计中不可缺少的重要内容。狠抓这一环节的工作,保证舰船装备应有的可靠性和维修性,才能在军事对抗中发挥其应有的作用,才能在市场竞争中获得成功,因此舰船及其装备的可靠性设计具有重要的现实意义。

在船舶工业和舰船装备发展的这一趋势引导下,在可靠性、维修性开展了一段工作的基础上,编写的舰船可靠性设计教材比较全面、系统地阐述了可靠性设计基本原理和方法在舰船装备上的应用。同时能紧密结合舰船产品的特点,应用现有的研究成果,列举了大量的实例,内容比较丰富。该书可用于指导和帮助工程技术人员在舰船设计和研制中解决亟待解决的,由传统的设计方法向包括技术性能和可靠性、维修性设计在内的全面技术设计的转变,使今后的舰船可靠性水平有较大的提高,并以此为起点向更高水平迈进。

衷心希望工程技术人员在应用本书的同时不断地总结新的经验,吸纳新的研究成果,充实舰船可靠性设计的内容,使舰船可靠性设计在实践中得到发展和提高。



1993. 12. 14

编者的话

随着现代化工业和科学技术的迅猛发展,人们对高技术产品及其系统的品质要求愈来愈高,不仅要求它有高性能,而且要求有高可靠性。可靠性是决定产品效能的重要因素。

为了达到产品的可靠性要求,在产品的设计、试验、生产和使用的各个阶段都要进行可靠性分析、设计并提供一系列相应保证措施。可靠性设计是产品在研制过程中不可缺少的重要内容,它赋予了产品固有可靠性。

本书是为适应我国船舶工业和舰船技术发展的迫切需要,以我国已颁布的一系列可靠性国家标准和国家军用标准为依据,紧密联系舰船产品的实际,详细阐明了可靠性基本理论和基本方法在舰船及舰船产品方面的应用,并以大量的具体实例进行说明,以便于工程技术人员掌握使用并能从事舰船及其产品的可靠性设计而编著的。

本书从可靠性的基本定义和基本概念讲起,由浅入深,全面、系统地介绍可靠性的基本理论、基本方法和可靠性设计的基本原理,同时也注意介绍了可靠性工程领域的某些最新发展。

由于舰船产品涉及的面很广,本书内容亦涉及到舰船及其产品可靠性设计的各方面,它既包括舰船设备、机电设备及武器装备的可靠性设计内容,也包括舰船结构和舰船机构的可靠性设计内容。同时,与可靠性设计有关的可靠性管理的内容也包括在内。

为了适应各不同专业的要求,本书的编著在考虑到系统性的同时,各章节之间又有相对的独立性,便于读者查阅使用。

本书也是为从事舰船及其产品设计的工程技术人员掌握可靠性设计而编著的培训教材,用以帮助舰船工程技术人员解决舰船设计中亟待解决的由传统性能设计向包括性能和可靠性设计在内的全面设计的转变问题。

本书的编著是在中国船舶工业总公司科技局的直接指导下进行的。在收集参考资料时,我们得到许多研究所、工厂企业和院校的热心帮助。在编著过程中还得到中船总公司舰船产品可靠性中心同志的指导和帮助,对此表示衷心的感谢。

由于水平有限,敬请读者对本书的错误和不足之处批评指正。

参加本书编著工作的有顾苏林(第一章)、李守仁(第二章、第九章、第十章)、张志俭(第三章、第四章)、荆兆寿(第五章、第六章、第七章)、乐慧康(第八章、第十四章)、付毓维(第十一章、第十七章)、王善(第十二章、第十五章、第十六章)、黄世斌(第十三章、第十八章)。编著本书的具体筹划组织工作由赵连惠完成。本书的修改、定稿工作由赵连惠、王善、李守仁完成。

吴德铭

1993.12

目 录

第一章 舰船可靠性设计概述.....	1
1.1 舰船可靠性设计的几个基本术语	1
1.1.1 可靠性	1
1.1.2 维修和维修性	3
1.1.3 可用性	4
1.2 舰船可靠性设计的重要性	4
1.2.1 可靠性工程及其重要意义	4
1.2.2 可靠性设计是可靠性工程的最重要环节	7
1.2.3 可靠性设计的发展	7
1.3 舰船可靠性设计的特殊性	9
1.4 可靠性设计的基本内容	11
1.4.1 可靠性要求	11
1.4.2 建立系统可靠性模型和进行可靠性分配	14
1.4.3 可靠性设计方法	17
1.4.4 可靠性预计	17
1.4.5 可靠性分析	18
1.4.6 可靠性设计评审	22
1.4.7 环境应力筛选试验和可靠性增长试验	22
1.5 可靠性设计程序	23
第二章 可靠性设计的基本理论	27
2.1 概述	27
2.2 可靠性理论	27
2.2.1 可靠性特征量	27
2.2.2 舰艇常用的可靠性指标	37
2.3 可靠性设计的数学基础	39
2.3.1 随机变量	39
2.3.2 可靠性设计中常用的概率分布	41
2.3.3 随机变量的相关特征	56
2.4 维修性理论	58
2.4.1 维修性的基本概念及其特征量	58
2.4.2 维修性设计中常用的概率分布	62
2.5 可用度理论	69
2.5.1 可用性的基本概念	70
2.5.2 建立可用度模型的马尔可夫过程方法	71

2.5.3 主要可用度参数	74
第三章 系统可靠性设计、计算方法	78
3.1 概述	78
3.2 系统可靠性模型	79
3.2.1 串联系统	79
3.2.2 并联系统	81
3.2.3 n 中取 r 贮备模型	82
3.2.4 多数表决系统	84
3.2.5 旁联系统	85
3.2.6 混联系统	87
3.2.7 一般网络系统	88
3.2.8 建立系统可靠性模型的方法	94
3.3 系统可靠性分配	98
3.3.1 概述	98
3.3.2 等同分配法	99
3.3.3 比例分配法	100
3.3.4 专家分配法	102
3.3.5 加权分配法	104
3.3.6 可靠度的再分配(努力最小算法)	107
3.4 系统可靠性优化方法	108
3.4.1 拉格朗日乘数法	109
3.4.2 动态规划法	113
3.4.3 串联冗余优化的直接寻查法	118
3.5 系统可靠性预计	124
3.5.1 相似设备法	124
3.5.2 相似复杂性法	127
3.5.3 功能预计法	128
3.5.4 元器件计数法	131
3.5.5 应力分析法	133
3.5.6 可靠性模型预计法	135
3.5.7 上下限法	136
第四章 系统可靠性分析技术	140
4.1 概述	140
4.2 故障模式及影响分析(FMEA)	140
4.3 故障模式、影响及危害度分析(FMECA)	153
4.4 故障树分析(FTA)	157
4.4.1 建立故障树	157
4.4.2 故障的数学描述	169
4.4.3 故障树的定性分析	174

4.4.4 故障树的定量分析	180
4.5 潜在通路分析(SCA)	186
4.5.1 概述	186
4.5.2 潜通电路的分析技术	188
4.6 电路与系统的容差分析	195
4.6.1 容差分析原理	196
4.6.2 容差分析方法	199
第五章 可靠性设计与保障技术	203
5.1 概述	203
5.2 简化设计	204
5.2.1 简化设计的指导思想	204
5.2.2 简化设计的一般原则	205
5.2.3 简化线路的一般方法	206
5.3 可靠电路与系统的设计分析	207
5.3.1 可靠电路与系统一般设计原则	208
5.3.2 最坏工况设计及边缘性能分析	209
5.3.3 电路漂移分析	210
5.3.4 稳定性分析	211
5.3.5 过渡过程分析	211
5.4 元器件—零部件的选择与控制	212
5.4.1 电子元器件的失效机理与失效模型	212
5.4.2 元器件与零部件选用	216
5.4.3 电子元器件的筛选与老练	224
5.5 降额设计	233
5.5.1 降额设计原理	233
5.5.2 降额的限度	235
5.5.3 常用元器件的降额	236
5.6 热设计	236
5.6.1 热源和产品的热失效机理	236
5.6.2 热的传导与流动方式	238
5.6.3 热设计技术	241
5.7 耐环境设计	246
5.7.1 耐气候环境及三防设计	248
5.7.2 振动冲击防护设计	252
5.7.3 其它耐环境设计	253
5.8 电气互连设计	254
5.8.1 电气互连的类型及其失效机理	254
5.8.2 电气互连可靠性设计原则与方法	256
5.9 瞬态过应力保护设计	256

5.9.1 半导体器件的瞬态过应力保护	257
5.9.2 其它元器件的瞬态过应力保护	258
5.10 安全性设计	260
5.10.1 风险的评价	260
5.10.2 系统安全性设计要求和原则	261
5.10.3 安全性措施简述	262
5.10.4 安全性设计技术	264
5.11 装运、贮存、装御及维修对可靠性影响分析	266
5.11.1 装运和装御对产品可靠性的影响	266
5.11.2 贮存对可靠性的影响	267
5.11.3 维修对可靠性的影响	268
第六章 电磁兼容设计	269
6.1 概述	269
6.2 电磁干扰源与电磁耦合模型	269
6.2.1 电磁干扰源	270
6.2.2 耦合方式与耦合模型	272
6.3 电磁兼容设计的一般程序和原则	276
6.4 电磁兼容设计技术	279
6.4.1 屏蔽设计	279
6.4.2 接地设计与搭接技术	282
6.4.3 抑制干扰源的一些工程方法	288
第七章 冗余技术与容错设计	291
7.1 概述	291
7.1.1 冗余系统的分类	291
7.1.2 冗余设计的基本原则	292
7.2 系统冗余优化设计方法	296
7.2.1 最不可靠的单元加一法	296
7.2.2 “效益”高的单元并联加一法	298
7.2.3 冗余传感器在航行体上最优设置	299
7.3 冗余设计技术	300
7.3.1 分立元器件的冗余技术	300
7.3.2 模拟电路的冗余设计技术	302
7.3.3 数字逻辑电路和系统冗余技术	304
7.4 容错技术概述	309
7.4.1 容错技术所包含的内容	309
7.4.2 故障检测与诊断技术	309
7.4.3 数字电路与系统的容错技术	312
第八章 软件可靠性	319
8.1 概述	319

8.1.1 硬件、软件可靠性的异同	319
8.1.2 软件可靠性含义	319
8.1.3 软件质量	321
8.2 软件的生存期	322
8.2.1 软件生存期的阶段划分	323
8.2.2 软件生存期各阶段任务	323
8.2.3 软件文档编制要求	323
8.2.4 软件质量保证及评审要求	325
8.3 软件错误及分类	327
8.3.1 软件错误模型	327
8.3.2 软件错误处理	329
8.3.3 软件错误限制	330
8.4 软件可靠性模型	331
8.4.1 杰林斯基-莫洛达模型	332
8.4.2 穆莎模型	334
8.4.3 葛尔-奥肯莫特的 NHPP 模型	341
8.4.4 杜安模型	342
8.4.5 软件可靠性模型的建模步骤	345
8.5 提高软件可靠性的设计技术	350
8.5.1 结构化程序设计	350
8.5.2 控制结构	351
8.5.3 软件的测试与排错技术	351
8.5.4 软件容错技术	355
9.5.5 程序正确性的数学证明	356
9.5.6 程序自动再启动技术	356
第九章 维修性设计	357
9.1 概述	357
9.1.1 维修与维修性及维修工程与维修性工程	357
9.1.2 维修工程分析与维修概念	357
9.1.3 维修性要求及维修性要求的确定	359
9.1.4 维修性设计与系统设计	360
9.1.5 维修性设计的目的和意义	363
9.2 系统维修性模型	364
9.2.1 可修串联系统	364
9.2.2 可修并联系统	366
9.2.3 可修串并联复合系统	367
9.2.4 可修表决系统	370
9.2.5 可修贮备系统(旁待冗余系统)	371
9.3 系统维修性分配	373

9.3.1 分配因素	373
9.3.2 维修性分配的主要步骤	374
9.3.3 维修性分配方法	377
9.4 系统维修性预计	384
9.4.1 概述	384
9.4.2 推断法	384
9.4.3 时间累加法	386
9.4.4 随机抽样法	388
9.4.5 加权因子预计法	397
9.4.6 线性回归预计法	397
9.5 维修性设计准则	398
9.5.1 概述	398
9.5.2 制定维修性设计准则的基本原则	399
9.5.3 维修性设计准则的主要内容	399
9.5.4 舰船维修性设计准则	404
9.6 舰船机内自测试技术	407
9.6.1 概述	407
9.6.2 BIT 的工作类型	408
9.6.3 BIT 的主要性能指标	408
9.6.4 BIT 的设计考虑	411
第十章 系统效能模型和建立系统可靠性及维修性模型的技术	412
10.1 概述	412
10.2 系统效能模型	412
10.2.1 系统效能模型	412
10.2.2 系统效能的权衡分析与优化	416
10.3 不用日历时间定义的可用度模型	420
10.4 系统战备完好率概率模型	421
10.4.1 根据系统故障率和修复率建立模型	422
10.4.2 根据检测设备的测试性建立模型	423
10.4.3 根据任务时间的分布建立模型	423
10.4.4 复杂系统模型	424
第十一章 可靠性费用分析	426
11.1 概述	426
11.2 寿命周期费用	427
11.2.1 寿命周期费用(LCC)概念	427
11.2.2 寿命周期费用模型	428
11.2.3 寿命周期费用分类	430
11.2.4 可靠性与寿命周期费用关系	432
11.2.5 可靠性计划费用	435

11.3 寿命周期费用估算	436
11.3.1 寿命周期费用估算的基本方法	436
11.3.2 寿命周期费用估算的蒙特卡洛方法	438
11.4 系统可用度费用估算公式	442
第十二章 系统可靠性设计的权衡技术	445
12.1 概述	445
12.2 可靠性与维修性权衡	446
12.3 可靠性、维修性及可用度权衡	450
12.4 费用权衡	454
12.5 可用度、故障率及修复率的分配	457
12.5.1 串联系统可用度、故障率及修复率的分配	457
12.5.2 并联系统可用度、故障及维修复率的分配	459
12.5.3 多数表决系统可用度、故障率及修复率的分配	460
12.5.4 复杂系统可用度、故障率及修复率的分配	461
12.6 系统最优可靠性决策	464
第十三章 可靠性增长	475
13.1 概述	475
13.1.1 引言	475
13.1.2 可靠性增长过程	476
13.2 可靠性增长模型	479
13.2.1 杜安模型	479
13.2.2 杜安模型工程应用实例	481
13.2.3 贝叶斯可靠性增长模型及工程应用实例	483
13.2.4 可靠性增长模型的比较与工程意义	485
13.3 可靠性增长试验	486
13.3.1 可靠性增长试验的目的	486
13.3.2 可靠性增长试验的时间与方法	487
第十四章 人机工程设计	489
14.1 概述	489
14.1.1 人机关系的基本形式	491
14.1.2 人-机系统划分	491
14.2 人为因素	493
14.2.1 压力	493
14.2.2 人为差错	493
14.2.3 人为差错概率估计	494
14.2.4 人的模型	495
14.2.5 人的可靠性的定量分析	496
14.2.6 人为差错发生的卢克模型	496
14.3 人机系统的可靠性评估	497

14.3.1 THERP(人为差错预测)法	498
14.3.2 有人为差错时系统的可靠性评估	500
14.4 人机系统设计	504
14.4.1 作业环境设计	505
14.4.2 显示装置设计	507
14.4.3 控制装置设计	508
第十五章 结构可靠性分析	512
15.1 概述	512
15.2 应力强度干涉理论	513
15.3 某些典型分布的可靠度计算	517
15.3.1 正态分布和对数正态分布的可靠度计算	518
15.3.2 Γ 分布的可靠度计算	523
15.3.3 截尾分布的可靠度计算	525
15.4 结构可靠度的近似计算方法	530
15.4.1 二阶矩法	530
15.4.2 验算点法	537
15.4.3 等效正态分布法	544
15.5 蒙特卡洛法	550
15.6 舰船船体结构可靠性	555
15.6.1 舰船结构的失效模式	555
15.6.2 舰船结构的载荷分析	556
15.6.3 舰船结构的强度分析	558
15.6.4 舰船主船体结构可靠度计算	560
15.6.5 舰船结构可靠度分析实例	565
第十六章 结构可靠性设计	569
16.1 概述	569
16.2 可靠性系数	571
16.3 确定设计可靠性目标的方法	576
16.4 杆件的可靠性设计	578
16.4.1 受拉杆的可靠性设计	578
16.4.2 压杆稳定性设计	582
16.5 简支梁设计	584
16.6 压力容器设计	587
16.7 轴的可靠性设计	589
16.8 圆柱压缩螺旋弹簧的设计	595
第十七章 可靠性设计管理与评审	601
17.1 可靠性设计管理	601
17.1.1 可靠性设计管理的概念	601
17.1.2 可靠性设计管理的基本要求	601

17.1.3 方案阶段的可靠性设计管理	602
17.1.4 工程设计阶段的可靠性设计管理	603
17.2 可靠性设计评审	604
17.2.1 关于评审的几个概念	604
17.2.2 设计评审目的和作用	605
17.2.3 设计评审范围和内容	605
17.3 设计评审种类	609
17.4 设计评审程序	610
17.5 设计评审的组织管理	612
17.6 可靠性保证大纲实例	613
17.6.1 总则	613
17.6.2 监督与控制	614
17.6.3 设计与评价	617
17.6.4 研制试验	620
17.7 维修性大纲与维修性大纲工作项目	622
17.7.1 制定维修性大纲计划	622
17.7.2 系统维修性分析	622
17.7.3 提供确定维修概念和制定维修计划的信息	624
17.7.4 建立维修性设计准则	624
17.7.5 进行设计权衡	624
17.7.6 预计维修性参数值	624
17.7.7 对转承制方实施监控	625
17.7.8 参加设计评审	626
17.7.9 建立数据收集、分析和纠正措施系统	626
17.7.10 验证达到的维修性要求	626
17.7.11 编写维修性状态报告	627
17.8 舰船维修性设计评审	627
17.8.1 概述	627
17.8.2 维修性设计评审的基本类型	627
17.8.3 舰船维修性设计评审的主要内容和示例	628
第十八章 生产和使用的可靠性及维修性	633
18.1 概述	633
18.2 生产可靠性控制	634
18.2.1 生产质量及质量控制	634
18.2.2 生产过程中可靠性降低的估计的控制	635
18.3 生产维修性控制	638
18.3.1 概述	638
18.3.2 生产阶段的维修性保证	638
18.4 产品使用过程中可靠性和维修性的控制	639

18.4.1 概述	639
18.4.2 产品在使用过程中维修性与可靠性的估计与控制	639
思考题	640

第一章 舰船可靠性设计概述

可靠性设计就是根据产品的需要和可能,事先就考虑到可靠性诸因素的一种设计方法。通过可靠性设计可使产品在性能、可靠性、费用等各个方面的要求得以综合权衡,从而得到产品的最优设计。

1.1 舰船可靠性设计的几个基本术语

1.1.1 可靠性

一、可靠性的定义

可靠性的定义是产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。

“规定的条件”是指预先规定的产品应经受的全部作用条件,它包含环境条件和使用条件。环境条件是指所有外部和内部的条件,如温度、湿度、辐射、磁场、电场、冲击振动等或其组合。环境条件包括自然环境条件和诱发环境条件。如舰船产品要经受高低温、湿热、盐雾、霉菌、颠簸、摇摆等自然环境条件,也要经受振动、冲击、电磁干扰等人为或舰船自身引起的诱发环境。使用条件是产品的工作条件和维修条件。工作条件就是产品为实现其功能必须具备的输入条件、能源条件、负载条件及运行管理体系、规章制度和操作人员素质。维修条件包括维修政策、体系、制度、方法、场地、工具及维修者素质等。条件不同,同一产品的可靠性就不同。

“规定的功能”是指产品预期的要求(武器系统的要求一般用战术技术指标表示)。产品的规定功能包括两个方面:(1) 要求产品做什么(任务描述);(2) 产品进行工作的指标要求(水平描述)。如舰船导航系统,其规定的功能就是实时提供具有一定精度的舰船航行的航速、航程、经纬度及水平姿态等参数。当产品不能实现规定的功能时,就称产品发生了故障。

“规定的时间”是指产品完成规定功能的预计时间,一般是指“任务时间”。可靠性涉及的时间是广义的,一般指日历时间或钟表时间,也可用与时间相当的工作次数(如舰炮的发射次数)和距离表示(如舰船的航行距离)。由于可靠性是反映产品的性能在实际使用过程中的“保持性”,因此时间因素是可靠性概念中的重要问题。可靠性与时间的关系突出表现在:产品的可靠性随着时间的增长呈下降的趋势。

“能力”是指产品在规定的条件、规定时间的制约下,达到规定功能的可能性的,它可以用“概率”来定量的表示,如可靠度(R),也可以用平均故障间隔时间(MTBF)等来表示。

可靠性的定义还有狭义和广义之分。上述可靠性的定义指的是狭义可靠性。广义可靠性粗略地说就是狭义可靠性与维修性的综合概念。简单地说,一个产品广义可靠性好的意思是:产品在使用中不易发生故障,发生了故障也容易维修,因而产品处于经常可用的