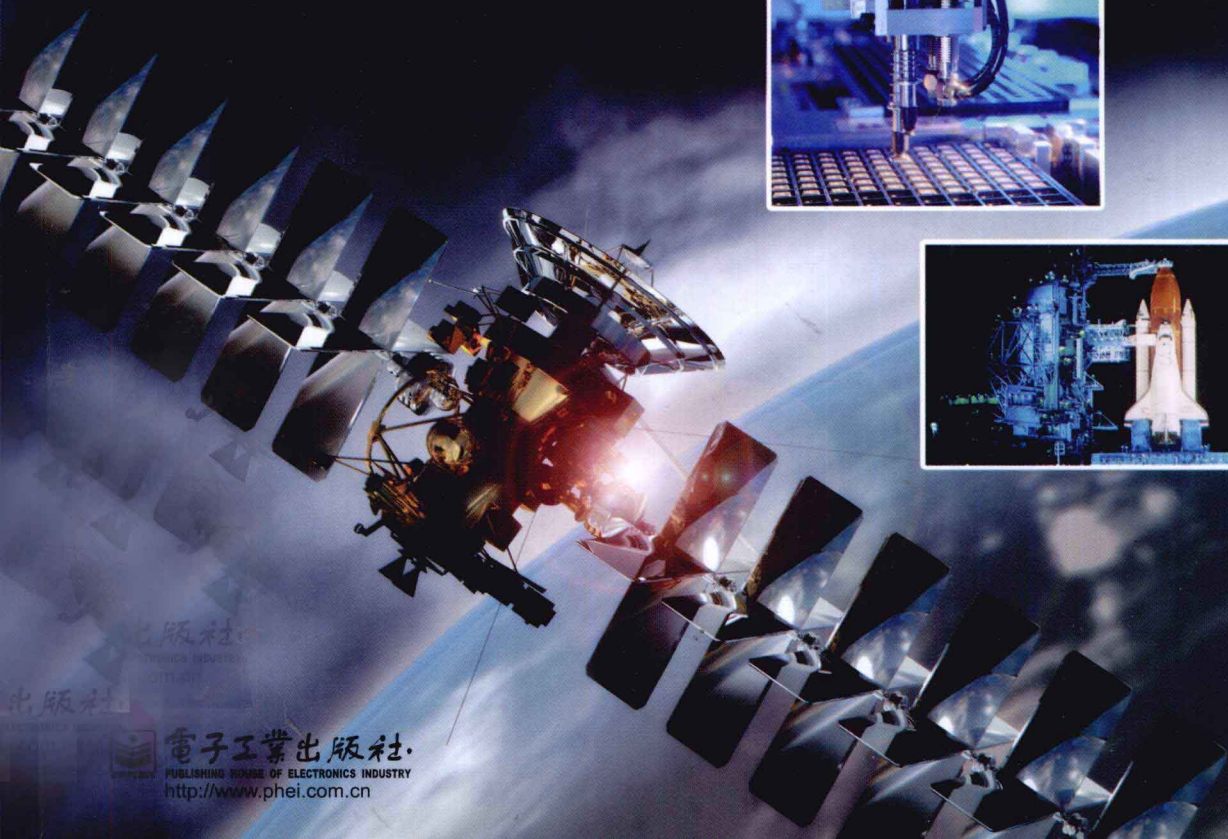
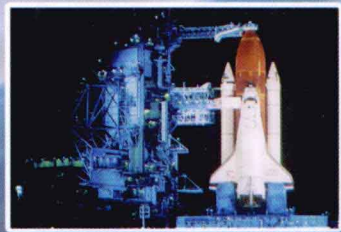
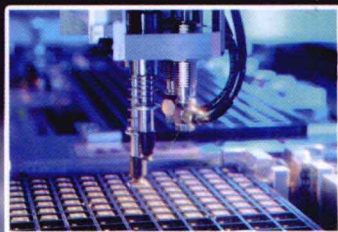
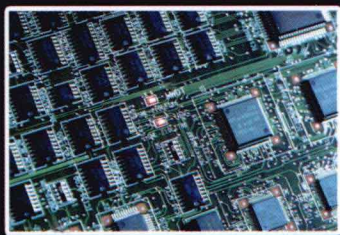


可靠性工程基础

(美) Michael G. Pecht (美) Kailash C. Kapur 康 锐 张叔农 编著



电子工业出版社

电子工业出版社



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

可靠性工程基础

(美) Michael G. Pecht (美) Kailash C. Kapur 康 锐 张叔农 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书面向 21 世纪的产品可靠性需求,从“可靠性工程是产品寿命周期中一系列技术与管理活动的集成”这一视角,整合了国外最新的可靠性技术与管理方法。书中回顾了可靠性工程的发展史,展望了 21 世纪的产品可靠性需求,详细介绍了确定产品可靠性要求需考虑的原则和因素,产品设计、开发、生产和装配中的可靠性工程活动及其所用的技术方法,产品寿命周期中的可靠性试验设计及计划制定,以及可靠性工作程序和过程的设计与管理。

本书内容工程实用性强,可供国内企业在开展可靠性工程时作为参考指南,对于准备从事可靠性工程师职业的人士尤为重要。本书也可作为高等院校相关专业高年级本科生、研究生的教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性工程基础/(美)派克(Pecht,M.G.)等编著. —北京:电子工业出版社,2011.5

ISBN 978-7-121-13488-3

I. ①可… II. ①派… III. ①可靠性工程—高等学校—教材 IV. ①TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 084542 号

特约编辑:罗树利

责任编辑:朱清江

印 刷:北京市天宇星印刷厂

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:21.25 字数:550 千字

印 次:2011 年 5 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

在国内建设世界一流大学的进程中,北京航空航天大学可靠性与系统工程学院从2010年开始启动了“国外名教授上讲堂”项目,我们选择了系统工程学科研究生学科基础课“可靠性工程基础”作为试点,邀请美国马里兰大学 Michael G. Pecht 教授和华盛顿大学 Kailash C. Kapur 教授来北航执教这门课程,同时由双方的教师共同合作,完成一部教科书。因此,这是一本中外学者合作完成的可靠性工程教科书。

本书旨在介绍整个系统或产品寿命周期中与可靠性相关的工程活动的基本概念、技术与管理方法。我们知道,为了确保产品的可靠性,企业在产品开发过程中必须遵循一定的工程实用方法,如通过元器件(原材料)的选用,产品的设计、制造、装配、运输、使用、保养和维修等,来保证产品的可靠性。因此,本书试图通过五个部分对上述内容全面的论述,各部分内容划分如下。

- (1) 21 世纪产品可靠性的需求与展望,包括第 1 章~第 4 章。
- (2) 产品设计和开发过程中的可靠性工程活动,包括第 5 章~第 12 章。
- (3) 生产和装配过程中的可靠性工程活动,包括第 13 章、第 14 章。
- (4) 可靠性试验与验证活动的设计和计划,包括第 15 章、第 16 章。
- (5) 可靠性工作程序和工作过程的设计和管理,包括第 17 章~第 20 章。

通过本书的介绍,希望读者能够掌握如下知识。

- (1) 如何通过给定的寿命周期应用条件和性能期望值等因素定义实际产品的可靠性需求。
- (2) 掌握一套可用于设计和管理可靠性工作程序的指导原则。
- (3) 如何通过评估相关的制造、装配、储存、处理、装卸、运输、使用和维护等条件,来定义产品的寿命周期条件。
- (4) 如何确保供应链参与者有能力生产可以满足最终可靠性目标的元器件(原材料)和提供必要的服务。
- (5) 如何确保选用的零部件(原材料)有足够的质量,并且在应用中能够达到预期的性能和可靠性要求。
- (6) 如何通过预测产品可能的失效,来识别潜在的失效模式、失效部位和失效机理。
- (7) 如何考虑从失效物理分析及寿命周期剖面分析中得到潜在失效模式、失效部位和失效机理,来设计工艺能力(即在制造和装配过程中可控的质量水平)。
- (8) 如何在所期望的寿命周期条件下鉴定产品以检验其可靠性水平,这种鉴定还应包括对确保产品设计和制造过程中涉及的规范均能满足或实现给定可靠性目标的所有活动的评价。
- (9) 如何识别、测量和监控工艺过程,因为所有制造和装配过程必须有能力使生产出的产品满足设计所需的统计过程范畴,以避免材料属性和制造过程的变化会影响产品的可靠性。
- (10) 如何通过闭环控制和监控程序来管理产品寿命周期的使用可靠性。
- (11) 如何协调产品保修和可靠性之间的关系,并了解相关法律和责任。
- (12) 如何认识六西格玛方法及其作用。

通观上述内容,与其说本书是一本教科书,倒不如说本书是一部实用的可靠性工程指南,除了可供在校大学生、研究生学习使用,更重要的是可以为国内正试图通过提升可靠性工程能力来保证产品质量水平的企业在工程实践中参考使用。

本书的提纲由双方专家共同确认，主要章节由 Michael G. Pecht 教授和 Kailash C. Kapur 教授以英文提供。北京航空航天大学可靠性与系统工程学院的张叔农博士组织人员对英文讲义进行了翻译，并作了全文校审和适当补充，在这一过程中得到了北京航空航天大学可靠性与工程学院众多硕士生、博士生及博士后的大力协助，他们是黄浩军、马响、曹然、沈德峰、林逢春博士后、王立超博士后、张慧果、骆明珠、王前程、田东伟、黄晓凯、梁媛、李敏博士后、许丹博士后、潘晓茜、谷瀚天、邓沅鹏、杨舟、侯泽兵以及陈怡宁同学，陈颖博士也给予了一定的协助。最后，由康锐教授对全书内容进行了修改、补充和审定。

在本书的编写过程中，我们力求高质、高效，但疏漏和不足之处在所难免，望广大读者、师生和专家、学者不吝指教。

康锐

北京航空航天大学可靠性与工程学院

目 录

第一部分 21 世纪产品可靠性的需求与展望

第 1 章 21 世纪的可靠性工程	1
1.1 质量	1
1.2 可靠性	3
1.2.1 执行预期功能的能力	3
1.2.2 指定的时间段	4
1.2.3 寿命周期条件	4
1.3 质量和用户满意度/系统效能	5
1.3.1 性能、质量及可靠性	6
1.3.2 性能和可靠性的另一种解释	6
1.3.3 质量和可靠性的另一种解释	7
1.4 可靠性和系统寿命周期	7
1.5 故障后果	12
1.5.1 经济损失	12
1.5.2 公众信任的瓦解	12
1.5.3 法律责任	13
1.5.4 无形损失	14
1.6 供应商和用户	14
1.7 总结	14
习题	15
参考文献	15
第 2 章 可靠性的概念	17
2.1 可靠度	17
2.2 概率密度函数	20
2.3 故障率	23
2.3.1 求故障率的动机	24
2.3.2 故障率函数的一些特性	25
2.3.3 条件可靠度	27
2.3.4 B_0 寿命/百分位寿命	28
2.3.5 预期寿命/平均故障 前时间 (MTTF)	29
2.3.6 故障时间随机变量的矩	29

习题	32
第 3 章 可靠性分析中常用的概率和寿命分布	35
3.1 离散分布	35
3.1.1 二项分布	35
3.1.2 泊松分布	39
3.1.3 其他离散分布	39
3.2 连续分布	40
3.2.1 威布尔分布	42
3.2.2 指数分布	47
3.2.3 正态分布	51
3.2.4 对数正态分布	55
3.2.5 伽玛分布	56
3.3 概率图	58
3.4 总结	63
习题	63
第 4 章 系统可靠性建模	67
4.1 可靠性框图	67
4.2 串联系统	68
4.3 有冗余的产品	71
4.3.1 工作冗余	72
4.3.2 旁联系统	74
4.3.3 切换并不理想的旁联系统	75
4.3.4 共享载荷的并联模型	77
4.3.5 (k, n) 系统	78
4.3.6 冗余配置的局限	80
4.4 复杂系统的可靠性	80
4.4.1 完全列举法	80
4.4.2 条件概率法	81
4.4.3 关联结构的概念	82
习题	85
参考文献	88

第二部分 产品设计和开发过程中可靠性工程活动

第 5 章 产品需求与约束	89
5.1 需求的定义	89

5.2 供应链的责任	90
5.3 需求文档	91

5.4 多角色参与需求定义的示例	93
5.5 规范	93
5.6 需求跟踪	94
5.7 总结	94
习题	94
参考文献	95
第6章 产品可靠性设计	96
6.1 产品需求和约束	96
6.2 产品寿命周期条件	97
6.3 可靠性能力	98
6.4 零部件和材料选择	98
6.5 人为因素与可靠性	99
6.6 演绎与归纳方法	100
6.7 失效模式、影响及危害性分析	101
6.8 故障树分析	102
故障树分析步骤	104
6.9 失效物理	108
6.10 设计审查	110
6.11 鉴定	111
6.12 制造和装配	113
6.13 闭环反馈及根因检测	115
6.14 总结	115
习题	116
参考文献	116
第7章 概率设计、可靠度与安全系数	118
7.1 可靠性设计	118
7.2 概率设计的可靠度模型	120
7.3 概率设计与可靠度目标设计示例	121
7.4 可靠度、安全系数和变异性之间的关系	122
7.5 随机变量的函数	124
7.6 概率设计的收益和步骤	126
习题	127
参考文献	129
第8章 寿命周期条件	130
8.1 定义寿命周期剖面	130
8.2 寿命周期事件	131
8.3 载荷及其影响	132
8.3.1 温度	134
8.3.2 湿度	134
8.3.3 振动与冲击	135

8.3.4 太阳辐射	136
8.3.5 电磁辐射	136
8.3.6 压强	137
8.3.7 化学物质	137
8.3.8 沙尘	137
8.3.9 电压	138
8.3.10 电流	138
8.3.11 人为因素	138
8.4 关于 LCP 开展的思考和建议	139
8.4.1 基于特殊极限的设计 (全局环境和局部环境)	139
8.4.2 基于标准的文档资料	139
8.4.3 组合载荷条件	140
8.4.4 变化量值和变化率量值	142
8.5 估计寿命周期载荷的方法	142
8.5.1 市场调研和作为数据源的 基于标准的剖面	142
8.5.2 载荷条件的实地监测	142
8.5.3 现场测试记录、服务记录和 失效记录	143
8.5.4 关于相似零件, 装配体或 产品的载荷历史的数据	143
习题	143
参考文献	143
第9章 可靠性能力	144
9.1 能力成熟度模型	144
9.2 可靠性关键方法	144
9.2.1 可靠性要求和规划	145
9.2.2 培训和开发	145
9.2.3 可靠性分析	146
9.2.4 可靠性试验	146
9.2.5 供应链管理	147
9.2.6 失效数据跟踪和分析	147
9.2.7 确认与验证	147
9.2.8 可靠性改进	148
9.3 总结	148
习题	149
参考文献	149
第10章 零部件的选择与管理	151
10.1 零部件的评估过程	151
10.1.1 性能评估	152

10.1.2	质量评估	152
10.1.3	工序能力指数	152
10.1.4	平均检出质量	155
10.1.5	可靠性评估	155
10.1.6	装配评估	157
10.2	零部件管理	157
10.2.1	供应链管理	157
10.2.2	零部件变更管理	158
10.2.3	工业变更控制政策	159
10.3	风险管理	160
	习题	161
	参考文献	161
第 11 章	失效模式、机理和影响分析	162
11.1	引言	162
11.2	失效模式、机理和影响分析方法	163
11.2.1	系统定义、单元和功能	164
11.2.2	潜在失效模式	164
11.2.3	潜在失效原因	165
11.2.4	潜在失效机理	165
11.2.5	失效模型	165
11.2.6	寿命周期剖面	165
11.2.7	失效机理优先级处理	166

11.2.8	文档	168
11.3	案例分析	168
11.4	结论	170
	参考文献	171
第 12 章	降额和升额	173
12.1	元器件额定值	173
12.1.1	最大绝对额定值	173
12.1.2	推荐工作条件	174
12.1.3	确定额定值的因素	174
12.2	降额	174
12.2.1	如何进行降额	175
12.2.2	降额方法的局限	179
12.2.3	如何确定极限	184
12.3	升额	185
12.3.1	元器件的选择与管理	186
12.3.2	升额能力评价	186
12.3.3	升额方法	187
12.3.4	持续的保证	189
12.3.5	总结	189
	习题	189
	参考文献	190

第三部分 生产和装配过程中的可靠性工程活动

第 13 章	过程控制与过程能力	193
13.1	过程控制系统	193
13.2	变异来源	194
13.3	控制图在问题识别上的应用	195
13.4	统计控制	196
13.5	控制图	196
13.6	对于变量的控制图	203
13.6.1	$\bar{X}$ 和 R 图	203
13.6.2	$\bar{X}$ 和 S 图	208
13.7	属性控制图	209
13.8	控制图优点	212

13.9	平均出厂质量	213
13.10	过程能力研究	214
13.11	高级控制图	218
	习题	220
	参考文献	224
第 14 章	产品筛选与老炼策略	225
14.1	老炼数据分析	225
14.2	老炼数据讨论	226
14.3	无筛选具有更高的现场可靠性	227
14.4	推荐方法	228
	参考文献	229

第四部分 可靠性试验和验证活动的设计和计划

第 15 章	产品鉴定与试验	230
15.1	贯穿寿命周期的产品试验与 试验规程	230
15.2	可靠性估计	232

15.3	统计基本概念	233
15.4	正态分布的置信区间	235
15.5	比例的置信区间	237
15.6	对于成—败型试验的可靠性	

估计与置信限	237	第 16 章 产品加速鉴定与试验	245
15.7 可靠度估计和指数分布的置信限	240	16.1 鉴定指南	245
15.8 总结	243	16.2 案例研究: 封装系统坠落	
习题	243	试验鉴定	250
参考文献	244		
第五部分 可靠性工作程序和工作过程的设计和管理			
第 17 章 分析产品失效机理和根因	263	19.1 故障预测的概念模型	292
17.1 引言	263	19.2 可靠性与故障预测	294
17.2 根因分析过程	264	19.3 电子产品 PHM	295
17.2.1 预先规划	265	19.4 PHM 的概念与方法	297
17.2.2 为分析和评价直接原因		19.4.1 保险和预警装置	298
收集数据	266	19.4.2 故障预兆的监测和推理	300
17.2.3 根因假设	267	19.4.3 环境监测和损伤模型	
17.2.4 证据的分析和说明	269	使用条件	304
17.2.5 根因的识别和纠正措施	270	19.5 “系统系 (System-of-Systems) ”	
17.2.6 纠正措施评估	271	PHM 的实施	308
17.3 无故障发现	272	19.6 总结	309
参考文献	276	参考文献	309
第 18 章 保修分析	278	第 20 章 六西格玛和六西格玛设计	313
18.1 关于保修的法律实践	278	20.1 什么是六西格玛	313
18.2 如何使用或不使用保修返回信息	279	20.2 为什么要采用六西格玛方法	314
18.3 保修策略	280	20.3 六西格玛是如何实施的	314
18.4 保修和可靠性	281	20.3.1 六西格玛过程的步骤	315
18.5 保修成本分析	283	20.3.2 六西格玛步骤总结	320
18.6 简化系统特征	288	20.3.3 六西格玛未来趋势	321
18.7 保修与可靠性管理	289	20.4 六西格玛流程的优化问题	321
18.8 结论	290	20.5 DFSS	324
参考文献	290	参考文献	329
第 19 章 故障预测与系统健康管理	292		

第 1 章 21 世纪的可靠性工程

进入 21 世纪后，随着信息爆炸和知识普及，无论是团体用户还是个人用户，对于自己所要购买的产品或服务，都能做到更好的认识和更广泛的了解，在购买时有能力做出明智的选择。像产品的性能、质量、可靠性和成本等过去被认为是高深的专业术语，也越来越被整个社会所认知，因此，这些属性便成为市场竞争分析的主要因素。

技术人员必须对我们日常生活中所使用的产品的设计、制造、测试、维护和报废等负责，因此他们需要具备一定的开发产品的知识和技能，使产品功能处于用户可接受的可靠水平。或许你会同意 Neville Lewis 的观点：“系统没有出故障，零件和材料没有出故障，而是人出了故障^[1]”这些概念正是本书的目的，即对如何经济有效地开发可靠的产品，以及如何评估和管理复杂系统、过程和产品的可靠性给出理论方法。

此处对一个较为常用的词汇“失效”和“故障”进行区分。如考虑一下继电器：如果一个电压施加到设备终端时继电器适当地闭合，代表继电器“正常”；否则称为继电器“失效”。有些情况是继电器由于一些部件的不恰当动作而导致在不应闭合的时间闭合了，这明显不是继电器失效。然而，非及时的继电器动作很可能引起整个电路进入一个不良状态。这种现象称为“故障”。一般而言，所有的失效都是故障，所有的故障却不都是失效。失效是基本的不正常表现，而故障是更“高阶”或更一般的事件。为了不至于混淆，本书全篇一般采用“故障”这一术语，在底层元器件、零部件级或与机理相关时视情采用“失效”一词，读者在分析自己遇到的情况时可具体区分。

本章给出了可靠性的基本定义，并讨论了产品质量、可靠性和性能之间的关系；然后，举例说明了不可靠产品（产品故障）的影响后果；最后，本章讨论了供应商—用户的可靠性目标及职责。

1.1 质量

质量在英语中是“quality”，在拉丁语中是“qualitas”，词源是“quails”。其含义为“如何构成”，预示的是“事情其实是这样的”。词典中定义质量为一事物的本质特征，性质，一种内在的特性或属性。因此，一个系统可以有无数个质量元素或特征，整个系统的性能或它的效能是涵盖所有这些质量元素的一个函数。Juran 和 Gryna^[2]对多种是否适合产品使用的质量元素进行了研究，评估了各种不同的质量特征（或质量元素），例如，技术特征（如强度、质量、电压等）、心理特征（如知觉特征、视觉、味觉等）、与时间相关的特征（如可靠性、维修性等）。Deming^[3]也探讨了质量的几个方面：质量定义中的三个方面是与各种不同的质量特征相关的，并关注于从用户的角度进行质量评估。美国质量协会^[4]对质量的定义：产品或服务依靠其自身能力满足用户给定需求的全部性质和特征的总和。由此看来，一个过程或产品的质量是由用户来定义和评估的。

任何一个质量大纲中最为重要的任务之一就是要理解和评估用户的需求和期望，并提供满足或超过这些需求和期望的产品和服务。Shewhart^[5]曾有过如下的论述：“工程师试图满足这些

需求的第一步为尽可能贴切地把这些需求转换成经制造后可满足他们要求的产品的物理特征。在进行这项工作时，直觉和判断力以及包含个人需求的人为因素的广泛知识起着重要作用。第二步为确定获得产品的方式方法，这将不同于对这些质量特征随意设定标准的做法。”质量功能展开（QFD）的目标之一就是要确切地完成 Shewhart 提出的上述第一步。Mizuno 和 Akao^[6] 已研究了必要的策略、系统和方法来实现这个步骤。QFD 是一种把“用户的声音”转化成可替代的产品质量特征、设计配置、设计参数和技术特征的方法，这些特征可在整个企业中全面展开，包括：市场、产品规划、设计、工程、采购、制造、装配、销售和服务等。这样，产品会拥有若干个特征，这些特征的一个“理想”状态或价值必须从用户角度来确定。这个理想状态称为目标价值，如图 1.1 所示。QFD 用于开发目标价值，以将用户需求转化为可替代的质量特征^[7]，如图 1.2 所示。

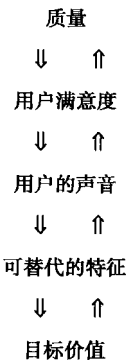


图 1.1 质量、用户满意度和目标价值

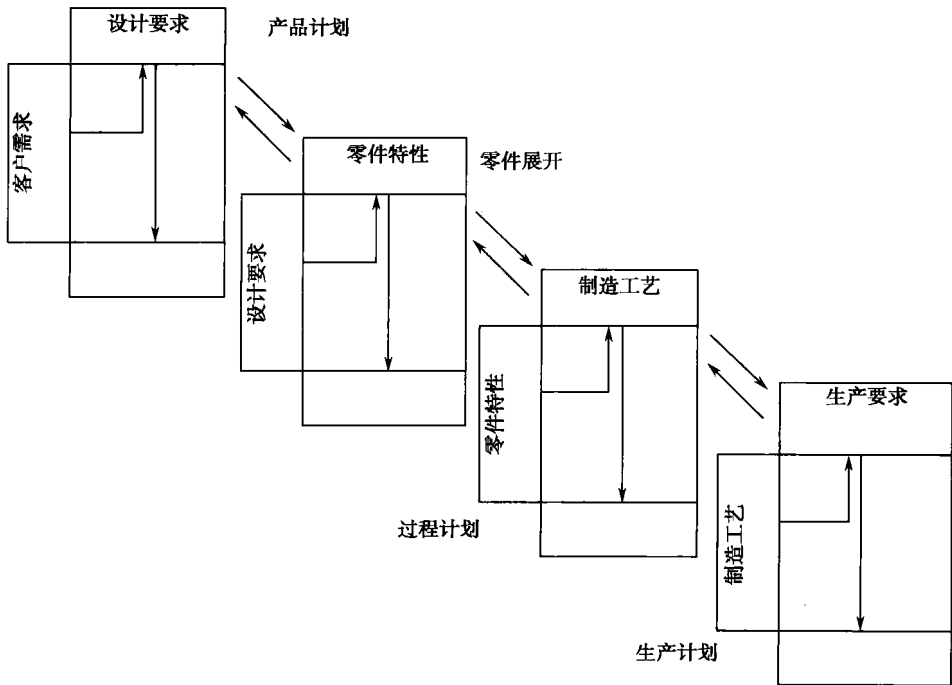


图 1.2 QFD 实施步骤示意图

1.2 可靠性

虽然已有共识认为可靠性是产品的一个重要属性,但目前却没有一个被普遍接受的可靠性的定义。词典中,“可靠性(reliability, 名词)”被定义为“可靠的状态”;“可靠的(reliable, 形容词)”被定义为某些事物是可依靠的或是可信赖的。因此,当谈论可靠性时,实际上是在谈论产品未来的性能或行为。在未来的使用中,产品还是可以信赖的吗?因此,可靠性已被考虑为一种以“时间”为坐标的质量^[8,9]。然而,对于任何行业来说,还是需要一个具有可操作的可靠性定义,出于改进和管理的目的,可靠性必须精确地定义、度量、评估、计算、测试、验证、控制和在现场使用中保持。对于任何产品,在其整个寿命周期中,这个定义都应当是适用的。

其他一些过去曾使用过的可靠性定义如下:

- 出错事物的减少^[10];
- 产品的一种属性,描述当用户希望产品具有某些功能时产品是否具有用户所希望的功能^[11];
- 随着时间的流逝产品满足用户对其性能期望值的能力^[12];
- 设备、产品或系统在指定的运行条件下和给定的时间段内不发生故障的概率^[13];
- 器件、单元或组件在期望的寿命内和在正常运行的条件下不发生失效的概率^[14];
- 设备在其所处的运行环境下和在预定的时间段内充分实现其目标的概率^[15]。

上述的可靠性定义表明,对“可靠性”这个词已有各种解释,但它们总是就事论事,没有普适性。关于产品的未来性能,总是存在着不确定性。由于种种原因(包括对一些知识的缺乏),系统的未来性能便成为一个随机变量。“概率”这个词的定义启发人们把概率论的数学原理用于质量这种对于系统未来性能的不确定性问题中。概率可以用统计的方法来估计,因此,可靠性需要概率和统计两者作为支撑。例如,“圆满执行”和“正常运行”等揭示出这样的含义,为了使产品处于可靠的状态,产品必须工作在特定的性能范围内。例如,“在指定的运行条件下”和“根据指定的条件使用时”隐含着这样的含义:可靠性是依赖于产品使用的环境和应用条件的。另外,如“给定的时间段”和“期望的寿命”说明产品必须在一个特定的时间段内适当地工作。

在本书中,可靠性定义如下:

可靠性是指产品或系统在其寿命周期条件内,在指定的时间段内执行预期功能(没有故障并在指定的性能范围内)的能力。

这个定义涵盖了进行设计、评估和管理产品可靠性所必需的关键概念。

1.2.1 执行预期功能的能力

用户购买产品时,总是期望它将能实现预期的功能。预期的功能常常由产品制造商以产品规格单、数据表单或使用文档的形式给出。例如,一部手机的产品规格单告诉用户只要遵照说明书并在所述的规范内使用该产品就能打电话^①。如果出于某种原因,该手机接通时不能打电话,那它就被认为不具有执行预期功能的能力,或被认为已“故障”而不能执行预期的功能。

① 产品规格单还应向客户说明产品必须满足什么样的条件才可以保证产品以一种可靠的方式运行。这些条件可包括机械、电和化学方面的限制。例如,某产品可能有电压和温度的工作范围,为了保证这个产品的可靠运行,就不应该超过这个范围使用。产品规格单通常根据设计、材料、产品制造过程以及所期望的使用条件来编制。

在某些情况下，产品某个功能也许还在“工作”，但工作效果很差以至于被考虑为已不可靠。例如，手机还能打电话，但手机扬声器改变了谈话声音、阻碍通话交流。

采用概率概念可以把关于未来能力的不确定性量化。因此，可以把上述定义修改如下：

可靠性是指产品或系统在其寿命周期条件下，在指定的时间段内执行预期功能（没有故障并在指定的性能范围内）的概率。

另一个典型的定义如下：

可靠性定义为系统在指定的环境和运行条件下，在预期寿命内圆满地执行其预期功能的概率。

1.2.2 指定的时间段

用户购买产品时，总是期望它将能在一些“时间”段内使用^①。一般，制造商会提供一个明确的保修期，即制造商声明的产品购买后不会出现故障的一段时间，如果出现故障，用户可免费进行产品维修或更换。对于一部手机来说，保修期也许是6个月，但用户的期望值可能是两年或更多。如果用户的期望值不能得到满足，那么，将产品寿命只设计到保修期的制造商就会有許多不满意的用户。

1.2.3 寿命周期条件

产品的可靠性依赖于施加在产品上的条件（如环境和使用载荷）。这些条件贯穿于产品的寿命周期，包括在制造中、运输中、储存中及运行使用中^②。如果条件足够严酷，可能就会立刻引起产品故障。例如，如果掉落手机或坐在手机上面，可能会损坏显示屏。在某些情况下，这些环境载荷条件可能只是削弱产品的功能，例如，螺钉松动、开始有裂缝、电阻增加等。然而，随着随后的环境条件（载荷）的继续作用，可能会导致产品不能再继续执行预期的功能。例如，产品由于螺钉松动而散架，裂缝导致连接着的零件分离，电阻增加引起电路开路等。

综上所述，可靠性是系统性能的一种相对（条件概率）的度量手段。它与以下内容相关：

- 从用户角度进行的产品功能定义；
- 从用户角度进行的产品故障或不满足性能要求的定义；
- 产品预期寿命或规定寿命的定义；
- 产品寿命周期中用户的运行和环境条件；
- 可靠性作为一个概率数值会随不同条件而变化；
- 预期的功能定义及其对于不同功能的不同定义；
- 使用和环境条件；
- 对令人满意的性能的实际/感知定义；
- 时间。

许多企业/机构都有一份非常综合性的文件，被称为“故障定义和评分标准”。这种文件精确描述了系统或设备的每一起事故或需要注意的每一事项将如何进行与可靠性、安全性

① 时间可以表示一个产品的总年龄、运行小时、里程数或其他一些使用或年龄的度量尺度。

② 产品与人存在颇多相似之处。人的物理可靠性依赖于他/她自出生以来作用在其身上的各种条件（载荷、应力）。这里的条件可以包括但并不局限于疾病、生活方式、意外事故等。这些条件会引起身体的衰老或某时以一种灾难性的方式失去功能。

和维修性计算相关的处理。这样的文件应在设计和开发规划阶段尽早制定，以便让该机构相关人员都能意识到那些发生在产品测试期间，最终会发生在外场乃至贯穿产品寿命周期的事故的影响后果。不过，这种对可靠性的传统定义有些局限性，因为它把性能看成了成败二态事件。

1.3 质量和用户满意度/系统效能

美国质量协会^[4]定义质量为“产品或服务依靠其自身能力满足用户给定需求的全部性质和特征的总和”。由此可知，一个过程或产品的质量是由用户来定义和评价的。对于消费类产品，质量已与用户的满意程度或快乐程度相关。这种对质量的解释取决于用户获得该产品的总的价值或使用感觉。这个概念也用在了美国国防部，他们关注于系统效能，把它看做系统在指定运行条件下完成其任务的整体能力。因此，系统的所有特征或质量元素都将影响用户的满意程度或系统效能。

质量与整体的用户满意程度相关，如图 1.1 所示。我们研究了各种影响用户满意程度的替代特征（工程、技术、物理、成本、交货，…）。质量 Q 可用如下模型表示：

$$Q = \text{用户满意程度} = \phi(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n, \dots)$$

式中， x_i 为第 i 个质量特征（ $i=1, 2, \dots, n, \dots$ ）。

这些质量特征随时间改变，因此它将影响用户对产品整体价值的感觉，如图 1.3 所示。在开始时，拥有这些处于理想水平或处于目标价值水平的产品质量特征量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，这些特征量的值是根据用户满意程度进行测量的。随着时间的流逝，这些质量元素会影响用户的满意程度。可靠性作为一种“以时间为坐标”的质量会影响系统的效能和用户满意程度。

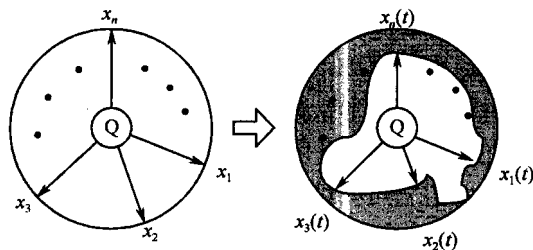


图 1.3 以时间为坐标的质量和用户满意度

那些引起产品功能特征偏离其目标价值的不希望的和不可控的因素被称为“噪声因素”。常见的一些噪声因素如下。

- (1) 外部噪声。如温度、湿度、尘埃等环境条件以及不同用户的使用条件。
- (2) 内部噪声。系统内在及固有属性的变化，如退化、磨损、疲劳和腐蚀等。
- (3) 产品噪声。由于制造过程中的一些变动和瑕疵引起的各种变化。

这里，“时间”是一个复合型的噪声因素，高质量或可靠的产品应该对时间不敏感，或随着时间的流逝是健壮的，如图 1.4 所示。

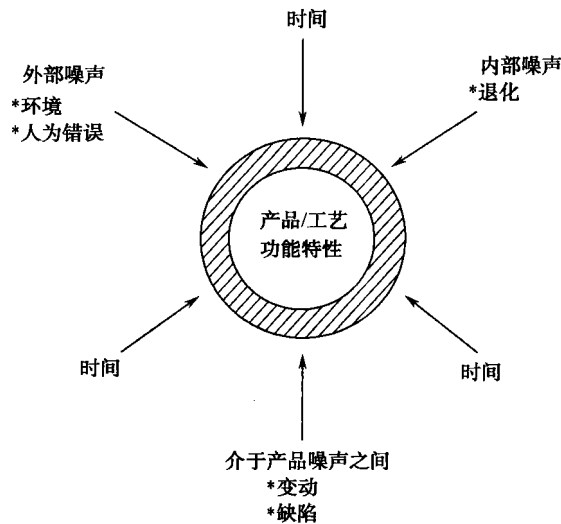


图 1.4 可靠的产品，过程随着时间的流逝是健壮的

1.3.1 性能、质量及可靠性

性能常与产品的功能相关，如该产品能做些什么，它能工作得如何好。例如，照相机的功能为拍照，但它能把照片拍得如何好以及照片的质量如何就涉及一些性能参数，如像素密度、色彩清晰度、对比度和快门速度等。

质量与产品的工艺水平有关。例如，照相机的质量指标可包括产品外观或使用缺陷，或是用户首次接受该相机时其满足特定性能参数的能力。质量缺陷会导致产品提前出现故障。

可靠性与产品在寿命周期内的指定时间内执行预期功能（例如，未出现故障且在指定的性能范围内）的能力相关。在照相机的例子中，除了制造商规定的保修期外，用户希望照相机仍可在一些指定的时间段正常地使用，这常常依赖于其购买照相机的目的和照相机的价格。一架低成本仅供一次性使用的照相机也许仅用于拍摄一卷照片就没有用了，而一架专业照相机如果进行适当的保养，用户也许会希望它可持续使用数十年。

1.3.2 性能和可靠性的另一种解释

性能与“产品工作得如何好？”相关，而可靠性与“产品将出现故障吗？”这样的问题相关。例如，对于一辆赛车来说，速度和操纵性是关键的性能要求，如果这辆赛车速度不够快，就不可能获胜。当然，这辆赛车必须完成这场比赛，但它的可靠性仅需满足完成这场比赛就可以了。比赛结束后，它可以进行维护甚至更换。毕竟，胜利就是一切^①！

对于商用飞机，人的安全运输是首要关注的问题。为了达到必要的安全性指标，虽然速度可以不是最快，但飞机必须可靠。事实上，除了成本，对于大多数商用飞机的设计和维修决策而言，可靠性是最重要的驱动力，而且，与性能参数相比，可靠性是更为重要的，有时也许还要牺牲一些性能来达到所需要的可靠性。

① 如果这辆赛车仅用于正常上下班情况，它的故障里程（可靠性）可能会很高，因为其子系统（如发动机、轮胎）受到的应力较赛车时少。

产品性能的改进常常需要使用新的技术并增加产品的复杂性，而这可能会使需要的可靠性水平更难以达到。

1.3.3 质量和可靠性的另一种解释

“为了度量产品的质量水平，我们对现在的产品进行评判，而为了度量产品的可靠性水平，则要对产品未来会是什么样子进行评判”^[11]。出于这种考虑，质量主要与产品制造相关，而可靠性大多与产品设计和使用相关。图 1.5 展示了在产品研发过程中质量和可靠性所承担的角色。

产品的质量可影响产品的可靠性。例如，如果产品的材料强度由于一些缺陷而降低，那么产品的可靠性也可能会降低，因为低于产品寿命周期中预期的环境条件能引起故障；另一方面，一个高质量的产品也未必一定可靠，即使它符合工艺规范。例如，由于材料选择不当，随着时间的流逝，产品也许不能再承受原来的环境或使用条件了，虽然选用的材料满足工艺规范的要求，还有可能是没有根据使用要求去适当地选择工艺规范。

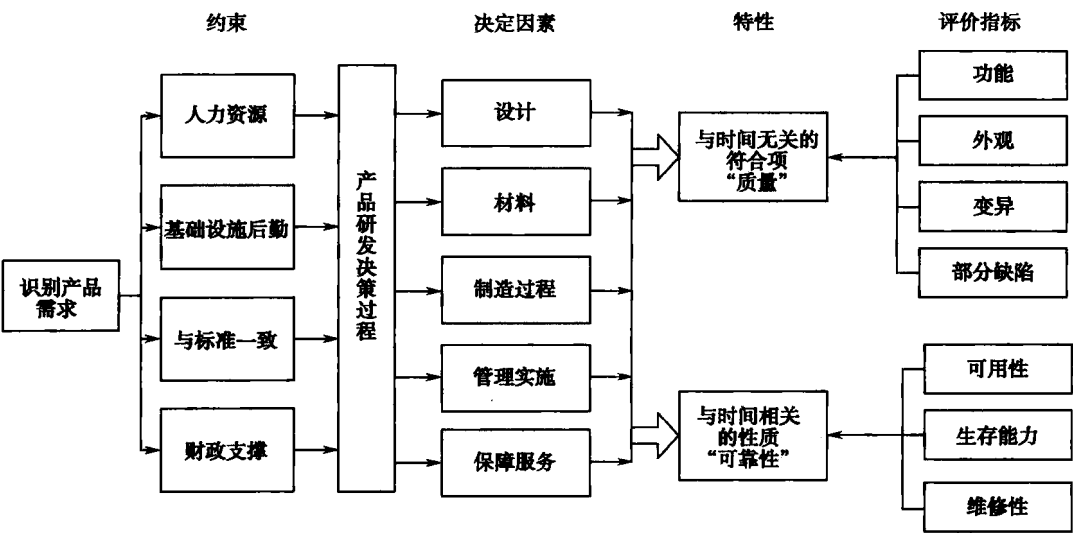


图 1.5 在产品研发过程中质量和可靠性的输入和输出

1.4 可靠性和系统寿命周期

可靠性（维修性和其他质量）活动应当贯穿系统的整个寿命周期。图 1.6 展示了一个典型系统在其寿命周期内开展可靠性实践和活动的主要节点。下面对图 1.6 中的各种活动进行简要的介绍。

第 1 步：需求

对于可靠性与维修性计划程序的需求必须从一开始就加以考虑，但它又不能被过分强调。根据寿命周期的费用和其他使用要求，基于指定的系统需求制定的这些计划程序应是合理的，它包括市场竞争力、用户需求以及根据安全性和公共健康考虑的任何其他社会需求。

第 2 步：目标和定义

所有的需求都必须根据适当的目标定义来确定。这些大大小小的目标应该都是可以量化的，本书第 2 章介绍了一些众所周知且有用的用来度量可靠性的方法。第 3 章和第 4 章给出了一些补充材料，可为本步骤提供参考。第 3 章介绍了一些为了对故障时间建模的有用的寿命分布，第 4 章探讨的是与系统可靠性建模和分析相关的话题。

第 3 步：目标和定义、方案与规划

基于产品的可靠性和其他使用要求，各种方案会被提出，它们应能够潜在地满足这些需求。在系统寿命周期中，方案阶段和产品的计划规划阶段是非常重要的阶段。图 1.6 表明系统寿命周期中 60%~70% 的活动也许就是由方案阶段做出的决策而确定下来的。因此，可靠性计划程序的详细程度也将决定整个计划的总体效能。图 1.7 表明寿命周期不同阶段和寿命周期费用的概念性关系。

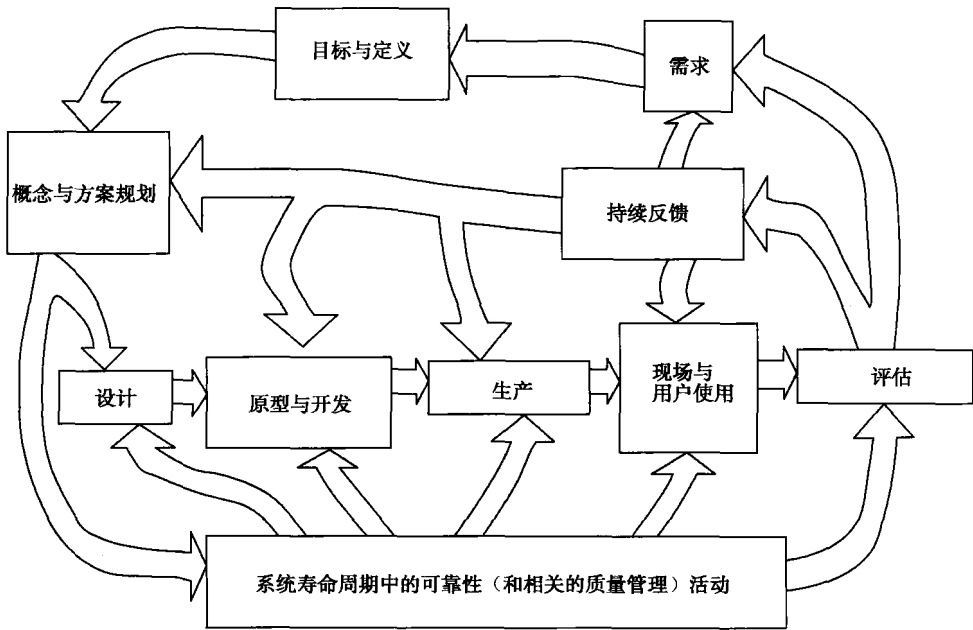


图 1.6 系统寿命周期期间的可靠性（和相关的质量管理）活动

第 4 步：可靠性计划的管理和活动

第 3 步的方案在此步骤中要得以实施，整个计划要在该企业中对该产品的所有寿命周期阶段得以持续的监控。为此，必须建立一个职责明确的组织来保证这些计划的顺利实施。在本书中提出了一些指导性原则，可用于任何可靠性计划、过程及其管理活动。

下面给出了一些原则和简要的解释。

关注用户——质量（可靠性也是作为质量的一种）是由用户来定义和评估的，而企业应有一个坚定不移的目的来满足或超过用户的需求和要求。在一个非常广的意义上用“用户”这个单词。这个系统影响着的任何事情都是用户，因此，除了考虑人类及社会外，环境和系统未来的影响在整个计划中也需要考虑。