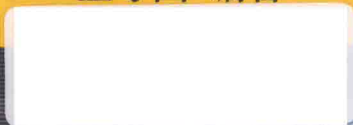




The Reliability of Electronic Components

电子元器件的可靠性

王守国 编著





微电子器件与电路可靠性

高等院校电子信息与电气学科系列规划教材

The Reliability of Electronic Components

电子元器件的可靠性



王守国 编著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

电子元器件的可靠性 / 王守国编著. —北京: 机械工业出版社, 2014.8
(高等院校电子信息与电气学科系列规划教材)

ISBN 978-7-111-47170-7

I. 电… II. 王… III. ①电子元件-可靠性-高等学校-教材 ②电子器件-可靠性-高等学校-教材 IV. TN60

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 139383 号

本书从可靠性科学的历史发展入手, 引出可靠性的概念, 详细介绍了可靠性数学、可靠性试验等的基本内容, 接下来由失效分析引出电子元器件的可靠性物理, 然后重点阐述了电子元器件的工程应用和在电路中的可靠性应用两大主题, 最后讲述了可靠性管理。

本书适合作为高等院校电子信息类专业的“微电子器件可靠性”课程教材, 也可供职业学校的学生学习电子元器件基础知识使用, 还可供工程技术人员作为电子元器件方面的参考书。

电子元器件的可靠性

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 谢晓芳

责任校对: 董纪丽

印刷: 三河市宏图印务有限公司

版次: 2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 186mm × 240mm 1/16

印张: 20.5

书号: ISBN 978-7-111-47170-7

定价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

前 言

电子元器件是元件、器件及其连接的总称,包括半导体器件、无源器件、各类连接器、敏感器件、微特电机、印制电路板等,是电路、电子设备的基础。电子元器件不仅要具有各种良好的功能,更重要的是,要提高其可靠性,包括设计、生产和使用可靠性。可靠性科学的发展是近代大规模电气设备使用的必然结果,是以概率统计为核心的数学理论在工程上的应用。为评价、验证和提高电子元器件的可靠性水平,相应的可靠性试验应运而生,与此同时,为得到提高其可靠性的理论基础,从物理理论上分析其失效机理的可靠性物理如影随形,最终从机理上找到提高电子元器件可靠性的方法。

目前,作为世界工厂的中国,电子制造业蓬勃发展。电子元器件的可靠性是一座桥梁,其一端连接以电子元器件功能为基础的制造者,另一端连接以电子元器件应用为目的的使用者。因此,电子元器件的性能、选用、可靠性等问题是制造者、使用者及设备的维修者都需要的基础知识。

随着大学扩招和就业压力的增加,一方面要求教学课时减少(增加选修课程,提高学生知识面);另一方面要求学生提高实际动手能力(顺应市场要求,提高就业率)。同时,本课程所选用的教材越来越老,我开始考虑自己编写教材。

2013年,我家里的电器需要维修,在维修点工作的年轻人谈到他在电脑学校学习时,对各种电子元器件的原理和可靠性并不熟悉,甚至不认识某些元器件,这让我感到写此书的意义,更促使我下决心尽快完成此书。

结合自己教学中的积累,综合各个教材的优势,历时四年左右我完成了本教材的编写工作。本教材着重对可靠性数学、物理和试验的论述,加入当前常见的各类电子元器件可靠性问题的讨论,使学生(包括其他读者)能够快速掌握各种电子元器件的基本知识和可靠性应用,提高实践能力。在编写时,本书突出应用方面,最后落脚于可靠性管理,让教材具有实际的应用价值。

全书共有8章内容,第1章从可靠性科学的发展历史入手,引出可靠性的概念;第2章详细讲解可靠性数学,重点讨论威布尔分布规律及其应用方法;第3章讨论抽样理论、筛选试验、寿命试验等内容;第4章由失效分析引入可靠性物理,建立电子元器件失效的物理机理;第5章详细介绍电阻器、电容器、连接类器件、磁性元件等的可靠性;第6章给出化学和物理电源、防护元件的可靠性以及电子元器件在安装、运输、储

IV

存和测量等方面的可靠性问题；第7章讲述电子元器件在电路中所遇到的各种应力，如浪涌、噪声、辐射和静电等，然后给出电路板中电子元器件的布局原则，最后讨论提高电子元器件在电路中可靠性应用的方法；第8章包含可靠性增长、可靠性生产、可靠性保证等内容。

本书的理论内容立足于专业基础(包括半导体物理、理论物理)，并结合数理统计等数学基础，能够为从事此工作的科研人员提供参考；本书的应用部分立足于目前电子元器件市场，帮助使用者了解电子元器件的种类、使用特点和可靠性应用等内容，学习安全可靠地使用电子元器件，为从事电路设计、电器维修和电子元器件销售等工作奠定基础。

本书面向高校电子信息类专业师生以及企业、电子市场、电脑电器等维修人员，也可供中国质量协会举办的“可靠性工程师”或美国质量协会举办的此类注册人员参考。

虽然竭尽全力，但可靠性科学发展迅速，编者水平有限，不足之处欢迎广大读者赐教。

王守国

2014年5月

目 录

前言

第 1 章 概述 1

1.1 可靠性发展阶段 2

1.1.1 国外可靠性的发展史 2

1.1.2 我国可靠性的发展史 5

1.1.3 可靠性发展的阶段 6

1.2 质量观与可靠性概念 6

1.2.1 当代质量观 6

1.2.2 可靠性的定义 8

1.2.3 经济性和安全性 10

1.3 可靠性工作概述 10

1.3.1 元器件工程 10

1.3.2 可靠性的工作内容 11

1.3.3 可靠性数学 12

1.3.4 可靠性物理 13

1.3.5 可靠性工程 13

1.3.6 可靠性设计和可靠性

预计 13

1.3.7 可靠性试验 13

1.3.8 教育交流 14

习题 14

第 2 章 电子元器件的可靠性数学 15

2.1 可靠性数学的重要性 15

2.1.1 可靠性问题的复杂化 15

2.1.2 电子元器件失效的 概率性 16

2.2 可靠性数据的收集 16

2.3 可靠性基本术语和主要 特征量 18

2.3.1 可靠度 R 或可靠度函数 $R(t)$ 18

2.3.2 失效概率或累积失效概率 $F(t)$ 19

2.3.3 失效率与瞬时失效率 $\lambda(t)$ 19

2.3.4 失效密度或失效密度 函数 $f(t)$ 20

2.3.5 寿命 21

2.3.6 小结 22

2.4 电子元器件的失效规律 23

2.4.1 浴盆曲线 23

2.4.2 早期失效期 23

2.4.3 偶然失效期 24

2.4.4 耗损失效期 24

2.5 威布尔分布及其概率纸的 结构和用法 25

2.5.1 威布尔分布函数 25

2.5.2 威布尔概率纸 28

2.5.3 威布尔概率纸的应用	29	3.3.8 典型产品可靠性筛选 方案	74
2.6 指数分布——偶然失效期的 失效分布	33	3.4 失效分布类型的检验	76
2.7 正态分布或高斯分布	34	3.4.1 分布拟合流程	76
2.7.1 正态分布规律	34	3.4.2 χ^2 检验法	77
2.7.2 失效率的状态分布	36	3.4.3 K-S 检验法	79
2.7.3 正态分布概率纸	37	3.5 指数分布情况的寿命试验	81
2.8 计算机威布尔概率纸的 构造及软件分析法	40	3.5.1 试验方案的确定	81
习题	43	3.5.2 寿命试验数据的统计 分析——点估计和区间 估计	84
第3章 可靠性试验	45	3.6 恒定应力加速寿命试验	90
3.1 可靠性试验的意义	45	3.6.1 加速寿命试验的提出	90
3.1.1 可靠性试验的目的与 内容	45	3.6.2 加速寿命试验的理论 基础	91
3.1.2 可靠性试验的分类	46	3.6.3 加速寿命试验方案的 考虑	94
3.1.3 失效判据	51	3.6.4 加速寿命试验的数据 处理	95
3.1.4 用于可靠性试验的 技术标准	53	3.6.5 加速系数的确定	99
3.2 抽样理论及抽样方法	54	3.7 电子元器件失效率鉴定 试验	100
3.2.1 抽样检验的理论基础	54	3.7.1 置信度与失效率	100
3.2.2 抽样的特性曲线	56	3.7.2 试验方案的要求	101
3.2.3 抽样方案及程序	58	3.7.3 失效率试验程序	102
3.3 可靠性筛选试验	61	习题	106
3.3.1 可靠性筛选的种类	61	第4章 可靠性物理	107
3.3.2 筛选方法的评价	62	4.1 失效物理的基础概念	107
3.3.3 筛选方法的理论基础	63	4.1.1 失效物理的目标和 作用	107
3.3.4 常见可靠性筛选试验的 作用原理及条件	67	4.1.2 材料的结构、应力和 失效	108
3.3.5 筛选项目及筛选应力的 确定原则	70	4.2 失效物理模型和应用	111
3.3.6 筛选应力大小及筛选 时间的确定	71	4.2.1 失效物理模型	111
3.3.7 失效模式与筛选试验 方法的关系	72	4.2.2 失效物理的应用	115

4.3 氧化层中的电荷	117	4.9 CMOS 电路的闩锁效应	142
4.3.1 电荷的性质与来源	117	4.9.1 物理过程	142
4.3.2 对可靠性的影响	118	4.9.2 检测方法	143
4.3.3 减少氧化层电荷的措施	120	4.9.3 抑制闩锁效应的方法	144
4.4 热载流子效应	120	4.10 静电放电损伤	145
4.4.1 热载流子效应对器件性能的影响	120	4.10.1 静电的来源	145
4.4.2 电荷泵技术	122	4.10.2 损伤机理与部位	146
4.4.3 退化量的表征	124	4.10.3 静电损伤模式	146
4.4.4 影响因素	124	4.10.4 静电损伤模型及静电损伤灵敏度	147
4.4.5 改进措施	125	4.10.5 防护措施	148
4.5 栅氧击穿	125	4.11 辐射损伤	148
4.5.1 击穿情况	125	4.11.1 辐射来源	148
4.5.2 击穿机理	127	4.11.2 辐照效应	149
4.5.3 击穿的数学模型与模拟	128	4.11.3 核电脉冲损伤	150
4.5.4 薄栅氧化层与高电场有关的物理/统计模型	128	4.11.4 抗核加固	150
4.5.5 改进措施	130	4.12 软误差	150
4.6 电迁移	130	4.12.1 产生机理	150
4.6.1 电迁移原理	130	4.12.2 临界电荷	151
4.6.2 影响因素	132	4.12.3 改进措施	151
4.6.3 失效模式	133	4.13 水汽的危害	152
4.6.4 抗电迁移措施	134	4.13.1 水汽的来源与作用	152
4.6.5 铝膜的再构	134	4.13.2 铝布线的腐蚀	152
4.6.6 应力迁移	135	4.13.3 外引线的锈蚀	153
4.7 与铝有关的界面效应	135	4.13.4 电特性退化	153
4.7.1 铝与二氧化硅	135	4.13.5 防止腐蚀和性能退化的改进措施	154
4.7.2 铝与硅	136	4.14 失效分析方法	154
4.7.3 金与铝	138	4.14.1 失效分析的目的和内容	154
4.8 热电效应	138	4.14.2 失效分析程序和失效分析的一般原则	155
4.8.1 热阻	138	4.14.3 常用微观分析设备概述	158
4.8.2 热应力	139	4.14.4 电子元器件的失效机理与分析	160
4.8.3 热稳定因子	140		
4.8.4 二次击穿	141		

习题	161	6.1.1 化学电源	226
第5章 基础元器件的可靠性	162	6.1.2 物理电源	235
5.1 电阻器和电位器、保险		6.1.3 化学、物理电源的	
电阻的可靠性	162	可靠性设计	240
5.1.1 电阻器	162	6.1.4 电池的可靠性测试	243
5.1.2 电位器	168	6.1.5 可靠性应用	246
5.1.3 熔断电阻器	171	6.1.6 锂离子电池失效分析	250
5.1.4 电阻器与电位器的		6.2 电路中的防护元件	252
可靠性设计	172	6.2.1 瞬变电压抑制二极管	252
5.1.5 电阻器与电位器的		6.2.2 压敏电阻器	254
失效机理与分析	173	6.2.3 铁氧体磁珠	257
5.2 电容器的可靠性	180	6.2.4 PTC 和 NTC 热敏	
5.2.1 按材料分类的常见		电阻器	258
电容器	180	6.2.5 电火花防护器	262
5.2.2 按结构、容值变化		6.2.6 避雷器	263
等分类的常见电容器	188	6.3 电子元器件安装的可靠性	266
5.2.3 可靠性应用	190	6.3.1 引线成形与切断	266
5.2.4 电容器的可靠性设计	193	6.3.2 在印制电路板上安装	
5.2.5 电容器的失效机理与		器件	267
分析	194	6.3.3 焊接	268
5.3 连接类器件的可靠性	201	6.3.4 器件在整机系统中的	
5.3.1 连接器	202	布局	269
5.3.2 继电器	205	6.4 电子元器件运输、储存和	
5.3.3 连接类器件的失效		测量的可靠性	270
机理与分析	209	6.4.1 运输	270
5.4 磁性元件的可靠性	215	6.4.2 储存	271
5.4.1 磁性材料及其应用	215	6.4.3 测量	271
5.4.2 电感器	217	6.4.4 举例	272
5.4.3 变压器	218	习题	272
5.4.4 微特电机	219	第7章 电子元器件的可靠性应用	273
5.4.5 磁性元件的失效机理		7.1 防浪涌应用	273
与分析	222	7.1.1 浪涌过电应力的来源	273
习题	225	7.1.2 电路防护设计	275
第6章 特殊元件和非工作环节的可靠性	226	7.1.3 TTL 电路防浪涌干扰	276
6.1 化学、物理电源的可靠性	226	7.2 防噪声应用	278
		7.2.1 接地不良引入的噪声	278

7.2.2	静电耦合和电磁耦合 产生的噪声	280
7.2.3	串扰引入的噪声	281
7.3	抗辐射应用	281
7.3.1	抗辐射加固电子系统的 器件选择	281
7.3.2	系统设计中的抗辐射 措施	283
7.4	防静电应用	284
7.4.1	器件使用环境的防静电 措施	284
7.4.2	器件使用者的防静电 措施	286
7.4.3	器件包装、运送和储存 过程中的防静电措施	288
7.5	电子元器件在电路板中的 可靠性布局	289
7.5.1	电磁兼容性设计	289
7.5.2	接地设计	291
7.5.3	热设计	291
7.6	电子元器件在电路设计中 的可靠性应用原则	293
7.6.1	电路简化应用原则	293
7.6.2	降额应用原则	296
7.6.3	冗余应用原则	297
7.6.4	灵敏度应用原则	299
7.6.5	最坏情况应用原则	300

习题	301
第8章 可靠性管理	302
8.1 产品的可靠性管理	303
8.1.1 可靠性计划	303
8.1.2 设计阶段的可靠性 管理	304
8.2 生产的可靠性管理	307
8.2.1 组织与人员管理	307
8.2.2 材料及外协加工件 管理	308
8.2.3 仪器设备管理	309
8.2.4 设计、工艺及工艺控制 管理	310
8.2.5 文件、记录与信息 管理	311
8.2.6 试验评价与失效分析 管理	311
8.3 可靠性保证	311
8.3.1 可靠性数据资料管理	312
8.3.2 可靠性监督和保证 体系	313
8.3.3 组织保证	313
8.3.4 标准化保证	314
8.3.5 计量工作保证	314
习题	314
附录 K-S 检验的临界值 $D_{n,\alpha}$	315
参考文献	316

据《周礼·考工记》记载：中国古代从春秋战国时期起，就有了国家对产品质量进行检验的年审制度和政府官员质量负责制度。春秋初，齐、晋、秦、楚等国规定：制造产品，要“取其用，不取其数”。在原材料选择、制造程序、加工方法、质量检验、检验方法等方面，都要按统一的标准和规定进行生产，以保证产品的“坚好使用”。

1974年春，在陕西省临潼县发现秦俑坑，在秦朝的各种武器上都有一些奇怪的字，如戢、义、成等。经过研究分析，历史学家认为这些看似普通的文字透露的是秦朝的军工管理机密：秦朝的军工管理制度分为四级，从相邦、工师、丞到普通工匠，层层负责，任何一个质量问题都可以通过兵器上刻的名字查到责任人。秦国众多的兵工厂能够按照统一标准大批量制作高质量兵器，这种管理制度记载于《礼记·月令》中，“物勒工名，以考其诚，工有不当，必行其罪，以究其情”，意思是，器物的制造者要把自己的名字刻在上面，如有质量问题，必追究其责任，并给予严惩。可以说秦朝的质量管理体制，就是现代制造业中的可靠性管理的雏形。

在近代制造业中，可靠性问题是在第二次世界大战期间提出来的。当时，美军运往远东的设备、装置在运输和保管过程中，有半数以上因不能使用而报废，造成重大损失，因此，美国开始投入大量人力、物力进行可靠性研究。随着现代化武器装备、通信设备、交通设施、医疗设备、工业自动化系统以及空间技术所使用的电子设备日趋复杂，所使用的环境条件愈加恶劣，装置密度不断增加，因而对电子设备及其元器件提出了更高的要求，不仅要求有好的特性，而且要求能高度可靠地工作。如何提高电子元器件的可靠性，设计并制造出高度可靠的产品，是当前亟待解决的重点课题之一。

可靠性是产品质量在时间轴上的体现，可靠性工作是指为达到产品可靠性要求而进行的有关设计、试验、生产和管理等一系列工作的总和。可靠性科学是一门涉及多个领域的边缘性综合学科。在世界各国中，美国的可靠性科学发展居领先地位，特别是它的军用标准对各国的影响极大。目前，可靠性科学的研究是设备研发、测试领域、产品制造业和企业管理服务等各方面的重要分支之一，其发展趋势是不断地分支化、专业化和科学化。

本章首先从可靠性的发展历史入手，总结可靠性的发展阶段；然后给出产品质量、可靠性和经济性的相互关系，同时详细讨论可靠性的基本概念；最后给出可靠性工作的基本内容。

1.1 可靠性发展阶段

1.1.1 国外可靠性的发展史

一般认为,可靠性问题的提出最初是在军工领域,其后逐步形成完整的工程技术体系,并逐步应用到民用产品中。二次大战时期,电子设备开始广泛应用,产品不可靠性带来的问题开始暴露出来。在这个时期,航空电子设备由于自身不能可靠地工作严重地影响了任务的执行,电子设备自身出现故障的比例甚至超过了敌方造成的损失。因此触发了对产品可靠性的研究,德国在 V-1 火箭的研制中,最早提出了系统可靠性的基础理论,即串联系统理论,火箭系统的可靠性等于所有元器件零部件可靠性的乘积。因此, V-1 火箭也是世界上第一个运用系统可靠性理论的航空飞行器。

20 世纪 40 年代是可靠性的萌芽阶段。在此期间,美国经过统计分析,找出航空无线电设备失效的主要原因是电子管的可靠性太差,在 1943 年成立了电子管研究委员会,专门研究电子管的可靠性问题。为推动可靠性研究及学术交流,美国无线电子工程师学会成立了第一个可靠性专家学术组织——可靠性技术组。

20 世纪 50 年代是可靠性兴起阶段。美国在朝鲜战争中发现,不可靠的电子设备不仅影响战争的进行,而且需要大量的维修费用。当时,军用电子设备每年的维修费用为基本成本的两倍。为解决军用电子设备和复杂导弹系统的可靠性问题,美国国防部成立了一个由军方、工业部门和学术界组成的电子设备可靠性咨询组织(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment, AGREE)。1957 年, AGREE 在“军用电子设备可靠性”研究报告中提出了可靠性设计、试验、管理的程序及方法,说明产品的可靠性是可建立的、可分配的和可验证的,由此确定了美国可靠性工程的发展方向,成为可靠性发展的奠基性文件,标志着可靠性已成为一门独立的学科,这是可靠性工程发展的重要里程碑。此后,美军方从管理的角度制定了一些体现“可靠性管理、保证和要求的大纲文件”(标准或规范)。如“弹道导弹及航天系统的可靠性大纲”、“宇航系统、分系统及设备的可靠性大纲要求”、“电子设备可靠性保证大纲”等。在此期间,可靠性验证工作还停留在概率论和数理统计上。也由于这个原因,概率论和数理统计得到了快速的发展,为随后开展的可靠性试验验证奠定了理论基础。

20 世纪 60 年代是可靠性全面发展的阶段,空间科学和宇航技术的发展提高了可靠性的研究水平,扩展了其研究范围。对可靠性的研究,已经由电子、航空、宇航、核能等尖端工业领域扩展到电机与电力系统、机械、动力、土木等领域。美国国防部及国家航空航天局(NASA)采纳 AGREE 的可靠性研究报告中的建议,在新研制的装备中开始推广可靠性设计、试验和管理标准。为了改善可靠性工程的管理,美国国防部于 1965 年颁发了 MIL-STD-785,即“系统与设备的可靠性大纲要求”,1969 年修改为 MIL-STD-785A。美空军系统司令部决定在罗姆航空发展中心(Rome Air Development Center, RADC)组建可靠

性分析中心。从事可靠性预计、可靠性分析与分配、可靠性试验、数据采集等研究。虽然可靠性有定量的指标要求，若无相应的验证方法，那也会流于形式。二十世纪四五十年代在概率论和数理统计发展起来的基础上，开始了指标的试验验证。在此期间，美国国防部颁布了 MIL-STD-781“可修复的电子设备可靠性试验等级和接收/拒收准则”，后修改为 MIL-STD-781A“可靠性试验——指数分布”，后又修改为 MIL-STD-781B“可靠性试验——指数分布”。随后产生了 MIL-STD-690“失效率抽样方案和程序”，DOD-H-108“寿命和可靠性试验抽样程序和表格”等文件，这些标准为可靠性指标试验验证提供了具体方法，被世界各国采用。从工业部门的产品分类着眼，把设备和系统的可靠性视为元器件来处理。如 MIL-STD-781 将电子设备分为七类，分别对应环境条件 A、B、C、D、E、F、G 七个等级。G 级最高，G 级的温度为 +95℃。MIL-STD-781A 将电子设备分为十类，分别对应环境条件 A、A-1、B、C、D、E、F、G、H、J 十个等级。最高等级为 J 级，温度为 +125℃。MIL-STD-781B 关于电子设备的分类与 A 相同，其差别在于，前者增加了用于全部产品的筛选（试验），其目的是去除有早期缺陷的产品，试验时间 50h 或 1/4MTBF (Mean Time Between Failure, 平均无故障时间)，取其中的较小者。在试验方案上，采用了放宽和加严试验的转换规则。这些标准使用的环境条件是振动、温度和电压三个单项应力。

20 世纪 70 年代可靠性步入成熟阶段，尽管美国出现严重的经济萧条，可靠性工程作为减少寿命期费用的重要工具，仍然得到深入的发展，并日趋成熟。随着军用电子设备复杂性的迅速增长，电子设备的可靠性仍是美国国防部所关切的问题。为此，由美国政府部门、工业及学术界代表建立了“电子设备可靠性讨论会”，根据其对加强电子设备可靠性统一管理的建议，正式成立了“电子系统可靠性联合技术协调组”来执行会议提出的各项建议。该协调组的职能扩大到非电子设备，并改名为“可靠性、可用性及维修性联合技术协调组”，作为集中统一的可靠性管理机构，负责组织、协调美国国防部范围的可靠性政策、标准、手册和重大研究课题，建立了全国性的数据交换网，加强了美国政府机构同工业部门之间的信息交流，制定了一整套较完善的方法和程序。这个阶段强调可靠性工程的整体保证，加强元器件控制，强调设计阶段的元器件降额使用和热设计，强调环境应力筛选以及综合的可靠性试验。在可靠性设计上，采用更严格、更符合实际及更为有效的设计方法。如发展了“失效物理”（可靠性物理学）、FME(C)A(Failure Mode Effects and Criticality Analysis, 故障模式、影响和危险度分析)、更严格的降额设计、综合热分析及设计技术等为设计服务。由于 MIL-STD-781A、B 均按设备分级，与设备的实际使用不符，试验使用的环境条件也不是模拟设备使用时所处的综合环境条件。所以许多电子设备按 MIL-STD-781B 试验获得的 MTBF 与现场使用获得的 MTBF 相差悬殊（有的厂家把试验获得的 MTBF 除以 10 或 20）。为此，在 1977 年对 MIL-STD-781B 进行了较大的修改，颁发了 MIL-STD-781C，其名称为“可靠性设计鉴定试验及产品验收试验（指数分布）”。781C 将设备按使用现场分成六大类。要求环境试验条件应根据设备使用的环境情况和工作任务来确

定, 提出把按时间顺序变化的综合环境试验剖面施加在试件上, 即采用后来出现的综合环境可靠性试验方法(CERT)。这解决了由于试验室中使用的环境试验条件对使用环境模拟不真实造成两者的 MTBF 值相差悬殊的问题, 但其准确程度取决于综合环境试验条件的仿真程度。

20 世纪 80 年代以来, 可靠性已成为产品设备综合指标的一个重要组成部分, 与性能、费用和进度处于同等重要的地位, 几乎所有编入美军用标准的可靠性设计及试验程序都是为电子设备服务的。在技术上, 主要在大规模集成电路、光电器件和软件可靠性等方面有较大发展。为了对综合环境可靠性试验进行深入的研究。美国国防部于 1980 年成立了“CERT 工作组”, 组织相关单位对“CERT”进行有针对性的研究。并于 1981 年在亚特兰大(Atlanta)召开了“CERT”工作组会议, 总结“CERT”在环境试验、可靠性研制增长试验、可靠性鉴定试验、生产验收试验、“产品来源”选择、现场问题处理、保障维修、环境应力筛选等方面的应用。美国“太平洋导弹试验中心”(Pacific Missile Test Center), 利用 CERT 技术, 发展了空中发射导弹的飞行试验仿真技术。用试验室中的 CERT 代替原先用飞机进行的批生产飞行器可靠性验收试验。解决了批生产飞行器可靠性验收试验的经费问题, 并被指定为 MIL-STD-810D 中的方法 523.0。MIL-STD-781C 解决的是可靠性试验中的验证(统计)试验部分。而另一部分可靠性工程试验(环境应力筛选和可靠性增长试验)在此期间也得到迅速的发展, 并形成了相应的军用标准与手册: MIL-STD-2164、MIL-STD-1635 和 MIL-HDBK-189。此时的可靠性试验标准还是分散制定的。至 1986 年和 1987 年, 美国用军用标准 MIL-STD-781D(名为“工程研制、鉴定和生产的可靠性试验”)和 MIL-HDBK-781(名为“工程研制、鉴定和生产的可靠性试验方法、方案和环境”)把有关可靠性试验统一在一起进行规范。

进入 21 世纪, 可靠性工程技术方法和理念逐渐被应用到了民用产品上。日本是最早成功应用可靠性技术的国家之一, 他们将这些理论与其提出的全面质量管理等方法结合在一起, 在民用产品上取得了良好的效果, 在性能、费用、质量和可靠性上取得了很好的均衡, 极大地提高了产品的可靠性, 使其高可靠性产品(例如, 汽车、彩电、照相机、收录机、电冰箱等)畅销到全世界, 获得了巨大的经济效益。日本人曾预见到今后产品竞争的焦点在于可靠性方面。

美国也逐步调整了其可靠性工作开展的策略, 从规定装备开发的具体活动中抽出精力来强调验证和结果。在最早应用可靠性工程技术的军用装备的供应商中, 多数也生产民用产品, 这些方法被逐步应用到了民用产品上, 并且形成了适合其自身特点的方法。1994 年的“佩里备忘录”(佩里是美国当时的国防部长)支持这一观点: 把过去主要依赖军用标准、规范及仅为国防用户建立的系统的采办过程, 转变为最大限度地减少对这些标准和规范的依赖, 即尽量民用化。为此, 1996 年, 美国用 MIL-HDBK-781A 取代了 MIL-STD-781D 和 MIL-HDBK-781、MIL-STD-785B, 并准备今后用民用标准替代它。同时, 还提出可靠性能和维修性能, 即把可靠性和维修性直接归到商品的性能上。

1.1.2 我国可靠性的发展史

20世纪50年代在广州成立了亚热带环境适应性试验基地,开始了我国的可靠性研究工作。随后电子工业部门在20世纪50年代末60年代初进行了可靠性调查摸底和环境适应性工作,并专门成立了可靠性研究机构,调查了电子产品的失效情况,开展了电子产品的可靠性和环境适应性试验研究工作,对电子设备及系统的可靠性设计和试验进行了试探性工作。但是由于发展较慢,使得我国可靠性工作与国际水平的差距拉大了。20世纪70年代初,航天部门首先提出了电子元器件必须经过严格筛选。1972年组建并成立了我国电子产品可靠性与环境试验研究所,从国外引进了可靠性工程的概念和方法,这对我国可靠性工程的发展起了积极的促进作用。20世纪70年代中期,由于中日海底电缆工程的需要,提出了高可靠性元器件验证试验的研究,这项研究促进了我国可靠性数学的发展。1975年后,我国电子产品的可靠性水平有了较大提高。人造卫星的成功发射,洲际导弹试验和同步通信卫星的成功发射,标志着我国电子产品可靠性达到一定水准,但与国际先进水平相比,仍有较大差距。

1978年后,我国提出“电子产品可靠性七专质量控制与反馈科学试验计划”,经过10年努力,使军用元器件可靠性提高了两三个数量级。在军用整机系统可靠性设计上采取严格的措施,保证了航空电子、运载火箭、通信卫星和海底通信电缆等产品的长期正常运行。在军事领域,提出了定量的可靠性要求,并为此而开展了可靠性分配、预计及可靠性评估试验等工作,保证了产品可靠性的不断提高,目前在军工企业中形成了严格的可靠性工作体系。

我国民用企业的可靠性源于电视机工业,1978年的电视机质量工作会议对电视机等产品明确提出了可靠性、安全性要求和可靠性指标,组织全国整机及元器件生产厂家开展了以可靠性为中心的大规模全面质量管理,整机和元器件的可靠性水平提高了一至两个数量级。

狠抓国家重点工程和电视机的可靠性,推动了我国可靠性工程的发展。在20世纪80年代出现了我国可靠性工作的第一个高潮,全国各工业部门及各兵种纷纷进行可靠性普及培训教育,形成了骨干队伍,建立了可靠性工作组织管理机构,进行可靠性试验和可靠性设计及信息收集与反馈工作。其后出台了一系列完整的国家军用标准和管理办法,进一步推动了可靠性工程在我国的发展。从1984年开始,在国防科工委的统一领导下,结合中国国情并积极吸取国外的先进技术,组织制定了一系列关于可靠性的基础规定和标准。1985年10月,国防科工委颁发的“航空技术装备寿命与可靠性工作暂行规定”,是我国航空工业的可靠性工程全面进入工程实践和系统发展阶段的一个标志。1987年5月,国务院、中央军委颁发“军工产品质量管理条例”,明确提出在产品研制中要运用可靠性技术;1987年12月和1988年3月先后颁发的国家军用标准GJB 368—1987“装备维修性通用规范”和GJB 450—1988“装备研制与生产的可靠性通用大纲”,可以说是目前我国军工产品可靠性技术

中具有代表性的基础标准。与此同时，各有关工业部门、军兵种越来越重视可靠性管理，加强可靠性信息数据和学术交流活动。全国军用电子设备可靠性数据交换网已经成立；全国性和专业系统性的各级可靠性学会相继成立，这进一步促进了我国可靠性理论与工程研究的深入展开。

目前，除了有可靠性与质量管理学会外，我国还建立了电子产品可靠性数据交换委员会、电子元器件质量认证委员会，重新组建了专业研究所。不少工厂、研究所相应建立了可靠性室(中心)，广泛地开展了可靠性研究活动，取得了一定成果。

1.1.3 可靠性发展的阶段

纵观世界和我国可靠性技术的发展史，可靠性技术大体可分为四个阶段。

第一阶段：调查研究阶段，主要对电子产品可靠性问题的严重性、环境应力对失效机理的影响、可靠性总体工作的内容等进行调查研究；

第二阶段：统计试验阶段，主要对电子产品进行统计寿命试验及环境试验，定量地得出电子元器件或整机的可靠性水平，同时制订出各种环境试验方法的标准；

第三阶段：可靠性物理研究阶段，主要对可靠性问题的本质(故障或失效的模式及其机理)进行分析研究，并探讨和提出各种加速试验的方法；

第四阶段：可靠性保证阶段，也就是在了解可靠性现象和本质的基础上，从产品研制开始到使用的各个阶段，加强可靠性管理和保证、评价、认证及控制，建立可靠性数据收集、交换体系和数据中心。

目前国外电子元器件可靠性方面的主要工作已经全面而深入地展开，研究重点渗透到整机、系统可靠性与维修性(R&M)的研究工作中，随着计算机的深入，从重视硬件可靠性转向软件可靠性的研究中，包括可靠性数据处理、设计等，可靠性学科正在广泛实践的基础上加速发展。不仅如此，目前对产品可靠性的研究工作已经提高到节约资源和能源的高度来认识。通过可靠性设计，可以有效地利用材料，增长产品使用期限，获得体积小、重量轻的产品，这也是今后的可靠性研究方向之一。

1.2 质量观与可靠性概念

1.2.1 当代质量观

质量是企业的生命线，质量管理是企业的主线，是永恒的主题。国内某著名企业的大门上贴出这样一副对联：“不抓质量的企业没有希望，不讲质量的产品没有市场”。这副对联的核心就是质量，只有名牌产品才能占领国内市场，才能跻身国际市场。创名牌一靠技术先进，二靠质量优良。战后的日本，为了振兴日本的民族工业，首先狠抓质量工作，进行了质量革命，走上了经济强国的道路，丢掉了劣等东洋货的帽子，打进国际市场，使日本经济很快复苏成为亚洲四小龙之一。

在 1995 年 5 月召开的美国质量管理协会年会上, 美国的质量管理专家朱兰博士做了题为“未来的质量世纪”的报告, 他对世界质量活动的发展过程进行了回顾和分析, 认为 20 世纪是“生产率的世纪”, 21 世纪将是“质量的世纪”, 人们将在“质量大堤下生活”。

我国政府主管部门强调每一个企事业单位一把手要转变观念, 亲自抓质量工作。国防科工委在 1995 年下发的“关于加强军工产品质量工作的措施意见”中明确指出, 各部门和研制生产单位的负责人, 要有强烈的质量忧患意识, 并且提出质量意识不强、考核不合格的不能当行政一把手。

早期所谈的质量属于外在质量, 我们称它为传统的质量观, 它单纯追求性能指标, 着眼于缺陷的纠正, 在管理上以“产品符合生产图纸和工艺规定要求”实施“检验”手段来保证产品质量。所以传统质量观只包括产品性能, 不包括产品的可靠性等其他因素。

传统质量观对质量的解释最典型的是 1992 年在北京召开的国际可靠性年会上, 一位美国专家所举的反例, 他说: 北京某厂生产的一百辆汽车, 经检验合格出厂了, 这就是质量, 而这一百辆汽车自北京跑到上海, 途中有几辆出了故障, 这就是可靠性问题。

1991 年国防科工委丁衡高同志提出了当代质量观的新概念, 着眼于产品“长时期保持良好性能”和“最佳寿命周期费用”等附加要求。当代质量观追求产品的综合效能和缺陷的预防, 其内涵是性能、可靠性、维修性、安全性、经济性、时间性及保障性, 当代质量观使质量管理前伸后延, 从产品研制的早期直至生产、使用, 讲究管理的三全: 全过程、全员、全方位。

当代质量观念认为系统可靠性 RAMS(可靠性 Reliability、可用性 Availability、可维修性 Maintainability 和安全性 Safety)和质量同属于产品的重要特性。产品的质量应该包括外部特征、技术指标、可靠性、经济性和安全性几个部分。外部特征有产品的商标名称、造型结构、尺寸重量、工作环境、电压和功耗等。技术指标是质量的一个最明显的项目, 如工作带宽、放大倍数等, 具体指标随产品种类而异。可靠性反映产品的寿命长短、使用维修情况、完成任务的能力大小, 它是产品质量的重要指标之一, 可靠性也是质量问题。

产品的技术性能与产品的可靠性都是通过产品的设计所赋予的, 并且是通过制作过程中全面的质量管理来保证的, 它们之间有着极为密切的关系。没有产品的技术指标, 产品的可靠性就无从谈起。如果产品不可靠, 容易出故障, 尽管其技术性能很先进, 却无用武之地, 就会失去其使用价值; 如果引起事故, 造成危害, 就更严重了。所以产品的基本技术及其可靠性是不可分割的。

但产品的可靠性和其技术性能又有不同, 产品的技术性能指标是产品制成后交付使用前(即出厂时)的情况, 出厂时生产者所关心的是废品率。可靠性是指产品在使用过程中的情况, 它是时间的函数。使用者关心的是瞬时失效率。此外, 产品的技术性能可通过具体的仪器设备测量出来, 而可靠性是测量不出来的, 它通过大量的分析试验, 在调查研究等的基础上, 对有关的可靠性数据进行统计评估而得到。它说明的是某一批产品(而不是某一个单个产品)的可靠性水平。