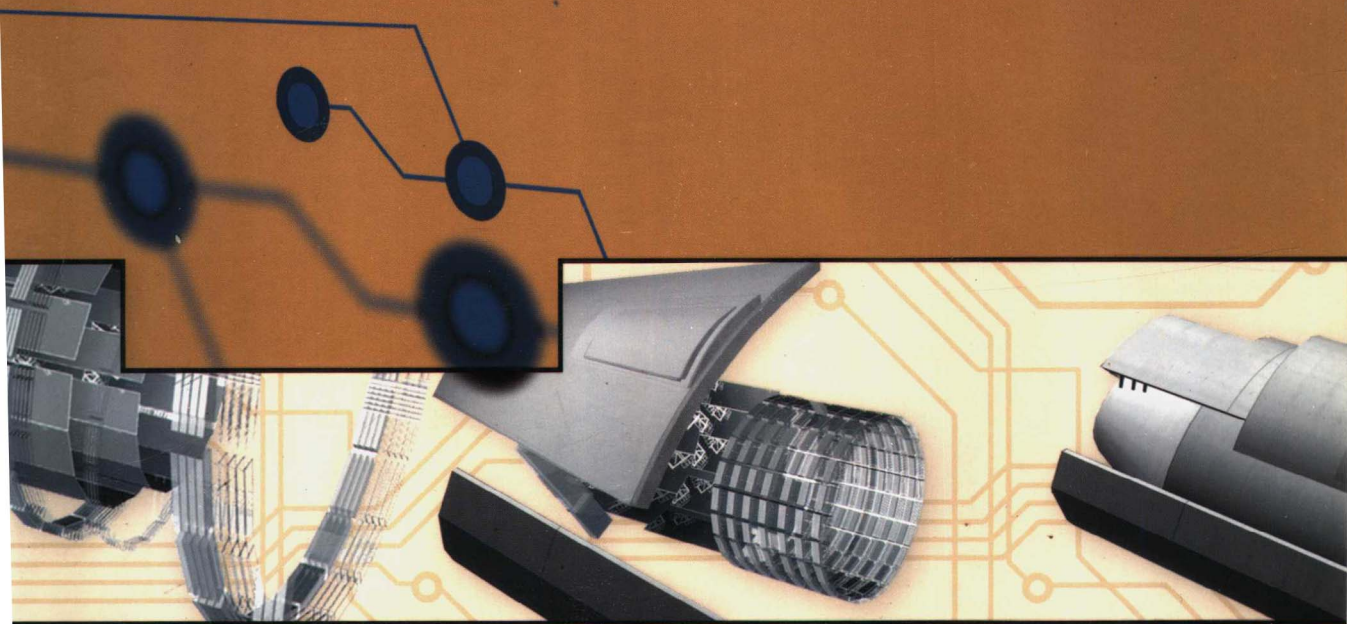


电子元器件质量与可靠性技术丛书

# 可靠性试验

刘明治 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

电子系统可靠性与可维护性技术丛书

# 可靠性试验

— 1 —



国防工业出版社  
DIFANG JIAOYU CHUBANSHE

电子元器件质量与可靠性技术丛书

# 可靠性试验

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书是“电子元器件质量与可靠性技术”丛书之一。本书在介绍电子元器件可靠性的必要性及基本概念的基础上,详细介绍了电子元器件的主要可靠性试验和通用的基本可靠性试验的原理、常用设备及操作程序,进而介绍了电子元器件可靠性试验的设计及技术问题。目的在于提高电子元器件可靠性试验的水平及技术。

本书为电子元器件质量与可靠性技术培训教材,对从事质量与可靠性工作的技术人员和管理人员是一本实用的参考资料。同时也可作为大专院校相关专业的参考书。

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

可靠性试验/刘明治编著. —北京:电子工业出版社,2004.8

(电子元器件质量与可靠性技术丛书)

ISBN 7-121-00210-8

I. 可... II. 刘... III. 电子元件—可靠性试验 IV. TN6—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 079156 号

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆

印 刷:北京兴华印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:21.75 字数:482 千字

印 次:2004 年 8 月第 1 次印刷

印 数:3000 册 定 价:45.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。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。

# 《电子元器件质量与可靠性技术丛书》 编审委员会

主 任：李纪南

副 主 任：汤小川 郝 跃 孔学东

委 员：罗 辑 何卫东 杨崇峰 张蜀平  
赵和义 符 彬 戚 伟 贾鲲鹏  
王 丽 闻俊锋 罗 雯

主 编：张鹤鸣

编 委：(按姓氏笔划排序)

王群勇 王蕴辉 冯晓丽 刘明治  
庄奕琪 张德胜 杨银堂 姚立真  
莫郁薇 贾新章 顾 英 彭苏娥

策划编辑：陈晓莉

# 序

军用电子元器件是重点工程和武器装备研制、生产的重要物质基础。电子元器件的质量与可靠性水平关系到武器装备的技术性能和作战能力,甚至决定着武器装备研制、试验乃至实战的成败。

为了提高军用电子元器件的质量与可靠性,多年来,在电子元器件研制、使用、管理等各部门的共同努力下,经过几十年的奋斗,采取了诸多有效措施,军用电子元器件整体质量水平在稳步提高,以“载人航天飞船成功返回”为代表的典型成功范例也证实了这一点。但是,应该看到,我国军用电子元器件的质量和可靠性与国际水平相比,还比较落后。部分元器件产品的质量隐患仍然存在,一些过去常见的失效模式(常见病、多发病)还时有发生,管理问题和低层次问题比较突出,少数产品暴露出来的质量问题触目惊心。电子元器件的质量和可靠性已经成了武器装备建设的“瓶颈”和“卡脖子”问题,值得我们深刻反思,警钟长鸣,常抓不懈。

随着电子产品水平的迅速提高,从 20 世纪 80 年代开始,国际上在保证和评价电子元器件质量与可靠性的观念、方法等方面均发生了很大的变化。在“可靠性是设计和制造出来的”基本观点基础上,又有了“只有在高水平的生产线上,在统计受控的条件下生产的元器件才会具有高可靠性”的共识。基于上述观点,美国军方从 1991 年开始已全面实施统计过程控制(SPC)技术。目前美国集成电路的失效率已下降至 10 非特以下。

针对世界格局的变化和发展,中央军委做出了军事装备的关键电子元器件要立足于国内的英明决策。提高电子元器件的质量和可靠性是贯彻这一决策的重要步骤。为此,总装备部电子信息基础部按照以人为本的原则,决定对军用电子元器件质量工作人员进行系统的培训。培训工作由总装备部军用电子元器件合同管理办公室组织实施,由西安电子科技大学和信息产业部电子 5 所长期从事可靠性研究和教学工作的教授和专家授课。培训内容包括:军用电子元器件质量工作的基本内容、方法以及必备的理论和基础知识。同时了解世界先进国家军用电子元器件质量与可靠性现状、质量工作的新理念和新技术以及发展趋势。

2003 年 8 月,总装备部电子信息基础部在西安举办了第一期军工骨干企业、单位质量检测中心主任培训班,取得明显成效,得到广泛好评。为了实现对军用电子元器件质量工作人员的全员培训,特组织有关教授和专家在第一期培训教材的基础上,编写了“电子

元器件质量与可靠性技术丛书”：《可靠性物理》、《可靠性工程数学》、《可靠性试验》、《统计过程控制与评价—— $C_{PK}$ 、SPC 和 PPM 技术》和《质量与可靠性管理》。

我们相信，本套技术丛书的出版，对开展电子元器件质量工作培训，提高我国军用电子元器件质量和可靠性水平，将起到推动和促进作用。

李纪南

2004年7月

# 前 言

本书是“电子元器件质量与可靠性技术”丛书之一,重点阐述提高电子元器件可靠性试验的水平及技术问题。

电子元器件的可靠性直接关系到军事电子装备的性能和战术、技术指标。电子元器件的可靠性试验可以检查、考核、提高电子元器件可靠性。为了切实做好电子元器件可靠性试验的理论及技术的研究与普及工作,总装备部元器件合同办公室于2003年7~9月完成了一次包含电子元器件可靠性试验的培训。当时有关厂、所的一线负责人及技术人员参加了这一培训。培训取得了显著的成果。在2003年培训班工作的基础上,我们对讲稿进行修改,编写了本书。为增强条理性、系统性、实用性、理论性,本书在内容安排和阐述方面有下面几个特点:

(1) 本书以电子元器件的可靠性试验必要性——可靠性试验——通用的基本可靠性试验——可靠性试验设计为顺序,逐步深入展开介绍,条理清晰,便于阅读、理解及记忆。

(2) 本书的通用基本可靠性试验共列出70余种,种类全面、繁多,其中有些试验是首次在教科书中出现,基本可满足国内可靠性试验的需求。

(3) 本书的实践性很强。为进一步提高阅读者的可靠性试验理论水平,还补充进许多必要的数学理论知识。

(4) 本书每章后面附有习题和思考题,供读者复习时参考。

本书共4章,其中第3章第3.4节由林德健、刘明治编写,第4章由卢昆祥、刘明治编写,其余全部由刘明治编写,全书由刘明治统稿。

编写过程中,得到了中国电子科技集团公司第四、第五、第二十四、第五十八研究所、中国运载火箭研究院元器件可靠性中心、航天部骊山微电子研究所、卫光半导体器件厂等有关工厂、研究所的大力支持;也得到了张鹤鸣、贾新章、顾璞、姚立真、张大庆、刘静怡、魏航信、沈玉如、上爱红、高桂芳、刘海东的帮助与支持,在此一并表示衷心感谢。

本书由初稿修改而成,初稿只经过一次教学实践,书中有一些其他相关书籍没有的新内容,所以,书中有不足甚至错误之处,恳请读者提出宝贵意见。

编者 2004年5月

联系人:西安电子科技大学机电工程学院 刘明治 mzhliu@xidian.edu.cn



# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 电子元器件 .....	1
1.2 电子元器件的可靠性 .....	3
1.3 影响电子元器件可靠性的因素 .....	6
1.4 电子元器件可靠性试验的定义与原理 .....	9
1.4.1 可靠性试验的定义 .....	9
1.4.2 可靠性试验的原理 .....	11
1.5 电子元器件可靠性试验的分类及内涵 .....	12
1.5.1 可靠性试验的分类 .....	12
1.5.2 可靠性增长试验和失效分析试验 .....	13
1.5.3 老炼试验和筛选试验 .....	13
1.5.4 模拟试验和现场试验 .....	14
1.5.5 例行试验、质量一致性检验和可靠性验收试验 .....	14
1.5.6 可靠性鉴定试验、可靠性定级试验和可靠性维持试验 .....	14
1.6 可靠性试验在可靠性工程中的地位 .....	15
复习与思考题 .....	16
<b>第 2 章 电子元器件的可靠性试验</b> .....	17
2.1 电子元器件的可靠性试验概述 .....	26
2.1.1 失效判据 .....	26
2.1.2 可靠性试验方法 .....	30
2.2 电子元器件的失效率试验 .....	40
2.2.1 电子元器件失效率试验的种类和方法 .....	40
2.2.2 失效率等级与置信度 .....	41
2.2.3 试验方法原理及抽样表 .....	42
2.2.4 失效率试验的一般要求 .....	46
2.2.5 失效率试验程序 .....	49
2.2.6 应用举例 .....	50
2.2.7 失效率、置信度、允许失效数和总试验时间的关系 .....	52
2.3 电子元器件的寿命试验 .....	54
2.3.1 长期寿命试验 .....	55

2.3.2	利用威布尔概率纸估计可靠性数量特征的方法	57
2.3.3	估计可靠性数量特征的数学方法	72
2.3.4	加速寿命试验	73
2.4	电子元器件的可靠性增长试验方法	83
2.4.1	概述	83
2.4.2	基本概念	84
2.4.3	可靠性增长试验的一般要求	84
2.4.4	可靠性增长试验的实施(详细要求)	89
2.4.5	杜安可靠性增长模型的说明和 MTBF 移动平均值法的探讨	93
2.4.6	AMSAA 模型增长分析	98
2.5	电子元器件的可靠性筛选	105
2.5.1	概述	105
2.5.2	可靠性筛选	106
2.5.3	可靠性筛选的分类	108
2.5.4	可靠性筛选条件的选择	109
2.5.5	常用的筛选方法及其效果	112
2.5.6	筛选试验技术	117
2.6	电子元器件的其他可靠性试验	118
2.6.1	例行试验	118
2.6.2	鉴定验收试验	119
2.6.3	电子元器件的可靠性认定试验	119
2.6.4	电子元器件的认证试验	121
2.7	电子设备的可靠性试验	122
2.7.1	可靠性试验的种类及其目的	123
2.7.2	正确评定设备的可靠性	125
	复习与思考题	127
<b>第 3 章</b>	<b>电子元器件的可靠性基础试验</b>	<b>129</b>
3.1	概述	129
3.2	机械、环境试验	130
3.2.1	概述	130
3.2.2	机械、环境试验的分类	132
3.2.3	振动试验	134
3.2.4	冲击试验	138
3.2.5	离心加速度试验	140
3.2.6	温度试验	142

3.2.7	与外引线有关的试验	148
3.2.8	密封试验	153
3.2.9	湿热试验	161
3.2.10	粒子碰撞噪声检测多余物试验	165
3.2.11	老炼试验	166
3.2.12	盐雾试验	170
3.2.13	宇航用电子元器件超期复验试验	172
3.2.14	内部水汽含量试验	179
3.2.15	辐射试验	182
3.2.16	键合强度试验	184
3.2.17	芯片附着强度试验	185
3.2.18	低气压试验(超高真空试验)	186
3.2.19	混响试验	188
3.2.20	无重力(微重力)试验	189
3.3	电子元器件的电性能特性参数检测试验	190
3.3.1	电压测量	190
3.3.2	电流测量	198
3.3.3	阻抗测量	200
3.3.4	绝缘电阻试验	203
3.3.5	电子元器件制造防静电系统的测试	204
3.3.6	电离辐射(总剂量)试验程序	207
3.3.7	剂量率感应锁定试验程序	212
3.3.8	数字微电路的剂量率翻转试验	220
3.3.9	MOS 场效应晶体管阈值电压	225
3.3.10	线性微电路的剂量率响应和翻转阈值	228
3.3.11	静电放电敏感度试验	234
3.4	电子元器件可靠性试验的常用设备	239
3.4.1	概述	239
3.4.2	机械、环境试验设备	240
3.4.3	电性能特性参数测试设备	252
3.4.4	综合测试设备	254
	复习与思考题	266
第4章	电子元器件的可靠性试验设计	268
4.1	可靠性试验的一般要求	268
4.1.1	试验类型的选择	269

4.1.2	可靠性试验的设计 .....	269
4.1.3	可靠性试验前应具备的条件 .....	271
4.1.4	试验样品的要求 .....	274
4.1.5	试验设备、仪器仪表的要求 .....	275
4.1.6	试验的实施要求 .....	275
4.1.7	受试设备的检测要求 .....	276
4.1.8	受试设备接收与否的判决 .....	277
4.1.9	纠正措施与预防性维护的要求 .....	278
4.1.10	受试设备的复原 .....	279
4.1.11	对可靠性试验的检查与监督 .....	280
4.2	试验条件选择及试验周期设计 .....	281
4.2.1	电子设备的分类 .....	281
4.2.2	试验条件的分类 .....	283
4.2.3	试验条件的选择 .....	288
4.2.4	对基本环境试验方法的要求 .....	296
4.2.5	试验中的工作条件 .....	297
4.2.6	试验周期(循环)与试验程序的设计 .....	298
4.2.7	推荐的试验周期 .....	299
4.2.8	编制可靠性试验程序的实例与说明 .....	302
4.3	可靠性试验报告 .....	314
4.3.1	概述 .....	314
4.3.2	可靠性试验报告 .....	314
4.4	现场可靠性试验 .....	321
4.4.1	现场可靠性试验的目的 .....	321
4.4.2	现场可靠性试验的一般要求 .....	322
4.4.3	正确评定和比较现场与实验室模拟的可靠性试验数据 .....	324
4.5	可靠性试验技术与管理 .....	325
4.5.1	可靠性试验技术 .....	325
4.5.2	可靠性试验的管理 .....	326
	复习与思考题 .....	330
	结束语 .....	332
	主要参考文献 .....	333

# 第 1 章 概 论

顾名思义,《电子元器件可靠性试验》是一本介绍、分析、指导电子元器件的可靠性试验的书。为了便于学习书中的详细内容,我们首先就什么是电子元器件,什么叫可靠性,影响电子元器件可靠性的因素有哪些,什么是可靠性试验,电子元器件可靠性试验的定义、原理、分类和内涵是什么,电子元器件可靠性试验在整个电子元器件可靠性工程中占有怎样的地位等问题做以下简单介绍。

## 1.1 电子元器件

随着国民经济的高速发展和科学技术的提高与普及,电子设备广泛应用于各行各业,并已成为我们生活的密友、科研工作的有力工具和从事社会主义建设、加强国防的重要武器。

电子设备是由电子元器件经一定的电气连接和机械连接构成的,所以电子元器件是完成电子设备性能的基本单元。电子元器件的性能好坏直接影响着电子设备的性能。为此,我们首先必须弄清电子元器件的具体含义。

电子元器件多种多样,五花八门。根据不同的分类办法,有着不同的分类。我们这里根据其基本功能,将电子元器件分为 13 大类,各大类再进一步分为 37 小类。这 13 大类和 37 小类具体类别如下。

### 1. 电阻器

- (1) 金属膜固定电阻器
- (2) 碳膜固定电阻器
- (3) 片式电阻器
- (4) 精密线绕固定电阻器
- (5) 功率型线绕固定电阻器
- (6) 电阻网络
- (7) 非线绕电位器
- (8) 线绕电位器

### 2. 电容器

- (9) 圆片瓷介电容器

- (10) 多层瓷介(独石)电容器
- (11) 云母电容器
- (12) 金属化塑料膜介质电容器
- (13) 非固体电解质钽电容器
- (14) 固体电解质钽箔电容器
- (15) 固体电解质钽电容器
- (16) 片式固体电解质钽电容器
- (17) 玻璃介质微调可变电容器
- (18) 瓷介微调可变电容器

### 3. 敏感元器件和传感器

- (19) 珠状热敏电阻器
- (20) 圆片式热敏电阻器
- (21) 压力传感器

### 4. 滤波器

- (22) 电磁干扰低通馈通滤波器

### 5. 开关

- (23) 微动开关

### 6. 电连接器

- (24) 低频电连接器
- (25) 射频电连接器

### 7. 继电器

- (26) 电磁继电器
- (27) 固体继电器
- (28) 恒温继电器

### 8. 线圈和变压器

- (29) 电感器和变压器
- (30) 射频线圈

## 9. 石英晶体和压电元器件

### (31) 石英晶体元器件

## 10. 半导体分立元器件

### (32) 无键合引线二极管

### (33) 晶体管和有键合引线二极管

## 11. 集成电路

### (34) 半导体集成电路

### (35) 混合集成电路

## 12. 光电元器件

### (36) 光耦合器

## 13. 声表面波元器件

### (37) 声表面波元器件

## 1.2 电子元器件的可靠性

随着社会的进步、科学技术的发展,使得人们对电子设备、电子元器件的可靠性要求越来越高。那么,究竟什么是电子元器件的可靠性呢?

可靠性有各种各样的定义,我国国家标准《可靠性基本名词术语及定义》(GB3187—82)规定“可靠性”定义是:产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。

由上述定义可以看出,可靠性是对一种产品投入使用时无故障工作能力的度量。产品可靠性的高低是表示产品在规定条件下、规定时间内,完成规定功能的可能性的。从数学观点来看,可靠性表示一种概率。某个产品究竟什么时候发生因失去完成规定功能的能力而失效的事件是不能确知的,只能借助于数理统计的方法加以估计。为了使可靠性定义中的“能力”这一抽象的概念不至含糊不清,必须用概率论和数理统计的数学工具对其进行定量的研究。定量地表示产品可靠性的数学特征量有可靠度、累计失效概率、失效概率密度、失效率、平均无故障工作时间(MTBF)、有效度等。但通常采用可靠度、失效率及平均无故障工作时间(MTBF)来表示。所谓可靠度,就是产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的概率。所谓失效率,就是产品在单位时间内失效的概率。所谓平均无故障工作时间,是指产品无故障工作时间的平均值。通常元器件可靠性水平的高低用失效率来表示;而设备可靠性多用可靠度、MTBF、有效度等指标来表示。

值得注意的是,某个产品的固有可靠性是随着设计的修改、使用条件的不同,以及工作过程中的性能退化而不断变化的。因此,是无法确知的,只能从确定符合使用条件的可靠性预计值或试验验证值中得到估价。所以,可靠性可以说是对事物认识的水准而不是事物的本来状态。还应指出,可靠性不是指一个产品而言的,而是对一批或多批相同产品而言的。对于一个产品谈不上可靠性,因为个别现象不是发生,就是不发生,它是确定性事件,针对个别现象谈概率是没有任何意义的,它不存在概率问题,所以不能预计单个产品的可靠性,不能用可靠性技术预计一个产品能工作多长时间会失效。但是,可以借助于统计的方法,对一批产品预计其在规定时间内正常工作的概率或者在某一时间内将发生故障的平均数或平均无故障工作时间(MTBF)。因此,研究可靠性时,应建立统计概率的观点,同时应认识到可靠性所具有的统计特性。

可靠性的定义表明,可靠性与“规定的条件”、“规定的时间”和“规定的功能”密切相关。

### 1. 可靠性与“规定的条件”密不可分

任何产品研制的时候都是根据规定的使用条件进行的。这个使用条件包括工作条件(如功能模式、操作方式、负载条件、工作能源、维护条件等)和环境条件(如温度、湿度、气压、振动等)。同一种产品在不同的工作条件和环境条件下其可靠性是不同的。因此,在评价一种产品可靠性时,必须明确其所处的工作条件和环境条件。

### 2. 可靠性与“规定的时间”密切相关

规定时间的长短又随着产品对象的不同与使用目的不同而异。产品的可靠性是时间的函数,随着时间的推移而不断降低,产品使用1小时的可靠性与使用1万小时的可靠性

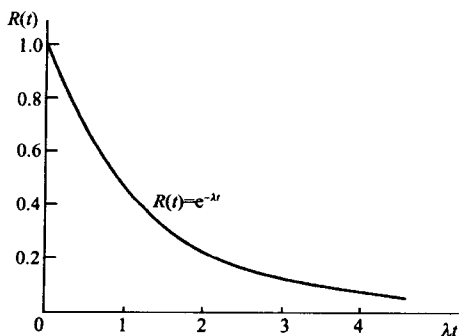


图 1.2.1 指数分布的可靠度函数

水平是不一样的。就设备而言,即使元器件经过筛选和整机经过老炼及维修,设备在偶然失效区工作的情况下,这一段时间内的失效率是一个常数。但是,设备可靠度随时间的分布规律却符合图 1.2.1 所示的规律,即:使用的时间越长,可靠度越低。因此,在研究产品可靠性问题时,要充分认识到可靠性的这种时间特性。在评价一种产品的可靠性时必须指明多长时间内的可靠性,也称任务时间内的可靠性。离开时间谈可靠性是无意义的。



### 3. 可靠性与“规定的功能”关系密切

所谓“功能”就是产品的主要性能指标和技术要求。这是产品完成规定任务和作用的保证。所谓产品不可靠,所谓失效,就是针对产品是否满足规定的性能指标和技术要求而言的。产品的性能指标和技术要求越高,允许变化的范围越小,产品要完成“规定功能”的可能性就越小,那么产品的可靠性水平就越低。反之,产品的性能指标和技术要求越低,允许变化的范围越宽,产品能够完成“规定功能”的可能性就越大,那么产品的可靠性水平就越高。因此,评价一种产品的可靠性离不开产品的规定功能。

这里我们从很熟悉的购买电视机的例子来解释一下什么是可靠性的问题。人们来到商店购买电视机,首先看一看屏幕大小,造型是否美观,价格是否便宜,接着通电观看图像是否清晰,伴音是否好听,如果都满意就购买。但是买回家以后,人们关心的是,该电视机在市电电压及室温条件下,使用多长时间不坏,或某一时间范围内坏了多少次,电视机能够维持原有性能水平的能力有多大等,这就是电视机的可靠性指标。它与使用的条件、使用的时间、以及性能的变化对能否保证满意地收看电视节目的影响等都有着密切的关系。如果有100台电视机,用户用了1年,坏了5次,那么这100台电视机在市电电压、室温条件下,使用一年的可靠度为95%。也就是这100台电视机在规定条件下、规定时间内,完成规定功能的概率是95%。平均无故障工作时间是多少呢?假设每台电视机每天用5小时,一年的使用时间就是1825小时,100台电视机就是182500小时,共出现5次故障,那么平均无故障工作时间就是36500小时,即 $MTBF=182500 \div 5=36500$ 小时。

还应注意的是:产品的可靠性是可靠性工程的一个重要环节。而可靠性工程是一种综合技术,可靠性技术与管理贯穿于产品规划、设计、生产、使用的全过程,而且可靠性技术涉及到诸如:可靠性数学、失效物理学、试验技术与试验分析技术、元器件工程、可靠性标准及可靠性设计与可靠性管理等很广的技术领域;同时可靠性与上至国家机关、下至各工业企业部门,直至每个用户都有关系;而且,可靠性具有强烈的社会性,某个国家产品的可靠性水平就反映了这个国家的工业基础和科学技术水平。电子产品的可靠性理论及技术是在第一次、第二次世界大战中萌芽和发展起来的,至今可靠性技术依然是军备竞赛和市场竞争的热门技术,可靠性已经被人们认为是与国家安全、企业存亡密切相关的一门科学。因此可靠性技术与管理,从它的孕育、诞生及成长都带有强烈的社会性,都为各国领导、集团及社会各个部门所重视。

产品的可靠性是十分重要的,它直接关系着产品的使用性能,影响着生产和建设的质量和进展速度,有时会带来严重的人身安全问题。例如,我们熟知,汽车突然刹车会出现车轮“抱死”现象,这使得车轮与地间的摩擦系数减小,侧滑系数减小,从而造成汽车易于侧翻或操纵失灵,为此出现了各种“防抱死装置”,它自动调节刹车系统的压力,使其永远处于最佳压力状态。电子“防抱死装置”种类繁多,性能良好,但其价格太高。为此,我国出现了一段研制机械式“防抱死装置”的热潮。某单位研制的“机械防抱死装置”通过了各