

微机应用系统 可靠性设计理论与实践

马宝甫 刘元法 郝振刚 公茂法 编著
苏学成 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从理论和实践两方面系统介绍了微机应用系统可靠性设计方面的知识。全书共分十章,第一章介绍了可靠性基本概念及可靠性模型等内容,第二章至第七章从避错和容错、软件和硬件几方面介绍了可靠性设计的有关问题。最后三章介绍了对微机应用系统可靠性影响较大的三个专题:总线技术、电源设计和低功耗设计。

本书内容丰富,简明扼要,注重实用。本书可作为工业自动化、机电一体化、仪器仪表、家用电器等领域从事微机应用系统设计和产品开发的广大技术人员的案头参考资料,亦可作为大专院校相关专业的高年级学生及研究生的教学参考书。

书 名: 微机应用系统可靠性设计理论与实践

编 著: 马宝甫 刘元法 郝振刚 公茂法

审 校 者: 苏学成

责任编辑: 李新社

特约编辑: 康宗朗

印 刷 者:

北京李史山胶印厂

装 订 者:

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 68279077(门市) 68273574(批发)

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

经 销: 各地新华书店经销

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21.25 字数: 540.8千字

版 次: 1999年2月第一版 1999年2月第一次印刷

书 号: ISBN 7-5053-4681-4
TP·2243

定 价: 32.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换
版权所有·翻印必究

前 言

随着微型计算机（包括单片机）在工业测控、交通运输、邮电通信、机械制造、建筑安装、仪器仪表、家用电器等领域的广泛应用，微机应用系统的可靠性愈来愈受到重视。可靠性是决定系统是否具有生命力、是否能够推广的关键。微机应用系统在其研制开发过程中，必须进行功能设计、可靠性设计和产品化设计。许多微机应用系统的开发人员只注意功能的完善而忽视可靠性设计，导致其产品不可靠而丧失信誉、失去市场。目前国内每年有大批微机应用项目通过鉴定，然而真正推广应用的却较少，其重要原因是系统不可靠。

可靠性是一门涉及面很广的交叉学科，世界各发达国家均对此予以高度重视。日本人把可靠性当做“国家兴旺”的大事，因其产品的高可靠性而赢得了市场，成为经济强国。据1978年测试，国产电视机的平均无故障间隔时间（MTBF）不到五百小时，年返修率达95%以上，给国家和人民造成巨大经济损失。有关部门狠抓了产品的可靠性，目前国产名牌彩电的平均无故障间隔时间达三万小时以上，并已销往国外。

可靠性工程以可靠性设计、可靠性实验和可靠性管理为主要内容。而可靠性设计是保证产品固有可靠性的最主要环节。目前介绍微机应用功能实现的书很多，而介绍可靠性设计的书却很少。本书的目的就是要全面系统地介绍微机应用系统和智能化产品可靠性设计方面的知识。

本书内容广泛，选材力求新颖，侧重于工程实用，数学推导删繁就简，力求简明扼要、深入浅出。全书共分十章，前七章从避错和容错、软件和硬件几方面介绍了微机应用系统可靠性设计的重要问题。后三章介绍了对微机应用系统可靠性影响较大的三个专题内容，即总线技术，电源设计和低功耗设计。

作者特别感谢苏学成教授、刘继芳副教授、张逸芳高工、杨卫平高工、高明强副研究员对本书的关心和支持。苏学成教授在百忙之中审阅了全书并提出了许多建设性意见。研究生井文英、张亚英同学对本书的录入、排版、校正付出了艰辛劳动，作者表示衷心谢意。另外，在本书编写过程中参考了许多专家、学者的著作和论文，在此一并表示衷心地感谢。

本书谨作为微机应用系统可靠性设计的抛砖引玉之作，诚望能对我国微机应用事业的发展竭尽微薄之力。

由于本书内容涉及面广、知识跨度大，作者水平有限，加之时间紧迫，讹误之处在所难免，恳请读者不吝指正。

作 者

目 录

第 1 章 可靠性技术基础	(1)
1.1 可靠性基本概念	(1)
1.2 几种常见的失效分布	(6)
1.3 可靠性组合模型	(9)
1.3.1 可靠性框图	(9)
1.3.2 串联系统的可靠性模型	(10)
1.3.3 并联系统的可靠性模型	(10)
1.3.4 混联系统的可靠性模型	(11)
1.3.5 表决系统的可靠性模型	(13)
1.3.6 非工作贮备系统	(14)
1.4 组合模型应用示例	(16)
1.5 RAS 技术的基本概念	(18)
1.6 可修系统的马尔可夫模型	(19)
1.7 可靠性预计	(23)
1.8 可靠性分配	(26)
1.8.1 概述	(26)
1.8.2 可靠性分配方法	(27)
第 2 章 避错技术及其应用	(30)
2.1 避错与容错技术	(30)
2.2 元器件质量指标及筛选	(31)
2.3 元器件选择及应用	(36)
2.4 元器件的降额设计	(47)
2.5 元器件的容差与漂移设计	(49)
2.6 简化设计及瞬变过应力保护设计	(52)
2.7 耐环境设计	(55)
2.8 印制电路板的可靠性设计	(59)
2.9 结构可靠性设计	(63)
2.9.1 系统体系结构	(63)
2.9.2 整机机械结构的基本要求	(66)
第 3 章 微机应用系统抗干扰设计	(68)
3.1 电磁兼容性技术的基本概念	(68)
3.1.1 电磁兼容性定义	(68)
3.1.2 电场、磁场和电磁场	(69)
3.1.3 噪声和干扰及其分类	(69)
3.1.4 干扰和抗干扰三要素	(70)
3.1.5 干扰传播途径及其危害	(71)

3.2	接地	(72)
3.2.1	接地基本概念	(72)
3.2.2	接地干扰产生的原因及危害	(73)
3.2.3	系统接地	(74)
3.2.4	保护接地	(76)
3.2.5	屏蔽接地	(78)
3.2.6	接地实例	(78)
3.3	常用抗干扰器件	(80)
3.3.1	压敏电阻	(80)
3.3.2	TVP 器件	(82)
3.3.3	滤波器	(83)
3.4	静电危害及其防护	(87)
3.4.1	静电的产生	(88)
3.4.2	静电的危害	(88)
3.4.3	静电干扰的防护	(89)
3.5	雷电危害及其防护	(90)
3.5.1	雷电灾害的新认识	(90)
3.5.2	雷电的危害	(90)
3.5.3	雷电灾害的防护	(92)
3.6	屏蔽	(92)
3.6.1	屏蔽的目的和分类	(92)
3.6.2	电屏蔽	(93)
3.6.3	电磁屏蔽	(95)
3.6.4	低频磁屏蔽	(95)
3.7	模拟量输入通道抗干扰技术	(96)
3.7.1	串模干扰抑制	(96)
3.7.2	共模干扰及其抑制法	(97)
3.7.3	模—数转换器的使用注意事项	(99)
3.8	数字电路中的抗干扰技术	(99)
3.8.1	数字电路中的反射及其抑制	(100)
3.8.2	数字电路的串扰及其抑制	(101)
3.8.3	连线允许长度和电路结构的关系	(102)
3.9	开关量输入输出通道的抗干扰措施	(103)
3.9.1	开关量输入通道的抗干扰措施	(103)
3.9.2	开关量输出通道的抗干扰措施	(104)
3.10	印制线路板的抗干扰设计	(107)
3.11	微机应用系统的电源抗干扰技术	(108)
3.11.1	电网噪声	(108)
3.11.2	电源噪声的抑制	(109)
第 4 章	编码技术及数据传输的可靠性	(111)

4.1	数据传输基本知识	(111)
4.1.1	数字信号的传输	(111)
4.1.2	信道	(113)
4.1.3	数据传输的主要故障及解决办法	(114)
4.2	差错控制技术	(115)
4.2.1	差错控制的基本形式	(115)
4.2.2	检错和纠错的基本原理	(117)
4.2.3	常用检错码	(118)
4.3	线性分组码	(121)
4.4	海明校验码	(123)
4.5	用单片机软件实现海明校验	(125)
4.6	循环冗余校验码 (CRC 码)	(127)
第 5 章	故障测试诊断及易测性设计	(133)
5.1	故障、差错及失效	(133)
5.1.1	故障、差错、失效的基本概念	(133)
5.1.2	故障的特性	(133)
5.2	故障模型	(135)
5.2.1	晶体管开关级故障模型	(135)
5.2.2	门级故障模型	(136)
5.2.3	功能模块级故障模型	(137)
5.3	差错模型	(139)
5.4	防卫故障的原理	(140)
5.5	逻辑可控性、可观性和易测性	(141)
5.5.1	逻辑可控性和可观性	(141)
5.5.2	易测性	(142)
5.6	改善逻辑电路易测性的基本方法	(143)
5.6.1	改善逻辑可控性	(143)
5.6.2	增设观察点	(145)
5.6.3	同时改善可控性和可观性	(146)
5.7	印制电路板的易测性设计	(147)
5.7.1	改善 PCB 的可控性和可观性	(147)
5.7.2	设计上的注意事项	(148)
5.8	故障诊断和内建自测试 (BIT) 技术	(151)
5.9	可维修性设计	(151)
5.10	CPU 测试	(153)
5.11	数据存储器测试	(157)
5.12	程序存储器测试	(161)
5.13	通道和接口的测试	(162)
第 6 章	容错技术及其应用	(164)
6.1	容错技术的基本概念	(164)

6.2	电路级冗余技术	(165)
6.2.1	二倍冗余电路	(165)
6.2.2	四倍冗余电路	(166)
6.3	静态冗余技术	(167)
6.3.1	三模冗余 (TMR)	(167)
6.3.2	表决技术	(168)
6.4	动态硬件冗余	(171)
6.4.1	双机比较	(171)
6.4.2	备用替换	(172)
6.4.3	其它动态冗余技术	(172)
6.5	单片机双机容错设计实例	(172)
6.6	独立总线三冗余容错系统实例	(174)
第7章	软件可靠性技术	(179)
7.1	软件可靠性概念	(179)
7.1.1	软件危机	(179)
7.1.2	软件可靠性模型	(179)
7.2	程序测试技术	(180)
7.2.1	软件故障特性	(180)
7.2.2	程序测试和验证的不完备性	(181)
7.2.3	程序测试方法	(181)
7.3	软件避错技术	(183)
7.3.1	软件管理技术	(183)
7.3.2	提高软件可靠性的一般方法	(183)
7.3.3	层次化、结构化、模块化程序设计技术	(185)
7.3.4	汇编语言程序设计的避错方法和技巧	(186)
7.4	软件容错技术	(187)
7.4.1	容错软件的基本结构	(187)
7.4.2	容错软件的常用技巧	(188)
7.4.3	软件陷阱及其正确应用	(189)
7.4.4	软件 WTD 设计	(190)
7.5	软件算法的容错设计	(191)
7.5.1	逻辑运算的容错设计	(191)
7.5.2	数值运算的容错设计	(192)
7.6	输入输出接口的软件容错设计	(193)
7.6.1	输入接口的软件容错设计	(193)
7.6.2	输出接口的容错设计	(194)
7.6.3	人机接口的软件容错设计	(195)
7.7	程序运行监视器 (WTD) 及其应用	(197)
7.7.1	WTD 电路设计	(198)
7.7.2	专用微处理器监控电路及其应用	(200)

7.7.3	WTD 配套程序设计技巧	(202)
7.7.4	系统无扰动重恢复技术	(204)
第 8 章	总线技术及硬件模块化设计	(209)
8.1	总线基本知识	(209)
8.1.1	总线的分类	(209)
8.1.2	采用总线的优越性	(210)
8.1.3	总线标准和微机应用系统常用总线	(210)
8.2	芯片间串行总线技术	(213)
8.2.1	SPI 串行总线	(213)
8.2.2	MICROWIRE 串行总线	(216)
8.2.3	I2C 串行扩展总线	(216)
8.3	网络协议与现场总线技术	(223)
8.3.1	网络协议	(223)
8.3.2	现场总线	(225)
8.4	CAN 总线测控局域网特点及报文格式	(228)
8.4.1	CAN 基本特点	(229)
8.4.2	报文格式及错误检测	(229)
8.5	带 CAN 总线的新型单片机 P8XC592	(231)
8.5.1	P8XC592 的功能及引脚信号	(231)
8.5.2	CAN 控制器的硬件结构及其与 CPU 的接口	(235)
8.5.3	CAN 控制段寄存器和报文缓存器	(238)
8.5.4	P8XC592 的中断系统	(250)
8.5.5	CAN 中断处理程序实例	(252)
8.6	CAN 总线的物理层设计	(254)
8.7	CAN 总线控制器及扩展器件	(257)
8.7.1	PCX82C200 CAN 控制器主要特性	(257)
8.7.2	单片 CAN 收发器 PCA82C250	(259)
8.8	LON 神经元芯片网络	(261)
第 9 章	微机应用系统电源设计	(265)
9.1	稳定电源及其主要质量指标	(265)
9.2	线性集成稳压电源	(267)
9.2.1	三端固定输出集成稳压器	(267)
9.2.2	三端可调输出集成稳压器	(270)
9.2.3	低压差集成稳压器	(271)
9.3	开关稳压电源	(277)
9.3.1	开关电源分类及基本电路结构形式	(277)
9.4	无工频变压器开关电源实例	(280)
9.4.1	RCC 开关稳压电源	(280)
9.4.2	Topswitch 系列开关集成稳压器	(282)
9.4.3	PS 系列 AC—DC 开关电源模块	(285)

9.5	低压直流变换式开关电源实例	(286)
9.5.1	CW34063 构成的低压开关稳压器	(287)
9.5.2	CW4962/4960 构成的低压开关稳压器	(288)
9.5.3	MAX787/788/789 低压开关电源稳压器	(289)
9.5.4	YDS 系列三端开关电压调整器	(290)
9.6	分布式电源、不间断电源和电源母线技术	(291)
9.6.1	分布式电源	(291)
9.6.2	不间断供电装置	(292)
9.6.3	电源母线技术	(293)
9.7	稳压电源的选择比较及装配注意事项	(295)
9.7.1	稳压电源的选择比较	(295)
9.7.2	线性稳压电源的装配注意事项	(295)
9.7.3	开关稳压电源噪声抑制及装配注意事项	(296)
9.8	电池的选择和使用	(298)
9.8.1	免维护密封铅酸蓄电池	(298)
9.8.2	镍镉电池	(299)
第 10 章	微机应用系统的低功耗设计	(301)
10.1	对低功耗系统的新认识	(301)
10.2	CMOS 微处理器的功耗特性及其功耗控制原理	(301)
10.2.1	CMOS 微处理器的功耗特性	(301)
10.2.2	Intel 的 CMOS 单片机系列功耗控制原理	(302)
10.2.3	M68HC05 的功耗控制原理	(303)
10.2.4	高集成度的 80C186 的功耗控制原理	(305)
10.3	存储器的低功耗设计	(305)
10.3.1	低功耗存储器的选择	(305)
10.3.2	维持工作方式的应用	(306)
10.4	CMOS 电路的应用及接口技术	(307)
10.4.1	CMOS 电路的功耗特性	(307)
10.4.2	CMOS 电路的降耗措施	(308)
10.4.3	CMOS 电路的逻辑电平及接口设计	(308)
10.5	低功耗输入输出接口设计	(311)
10.5.1	80C51 系列单片机 I/O 端口特点	(311)
10.5.2	一般 I/O 口的降耗设计	(312)
10.5.3	串行接口的低功耗设计	(313)
10.6	低功耗系统的电源设计	(315)
10.6.1	直流—直流变换器特点及选用	(315)
10.6.2	MAXIM 直流—直流变换芯片	(318)
10.6.3	低功耗电源设计实例	(323)
10.7	低功耗系统的软件设计	(324)
10.8	低功耗系统设计实例	(325)

4.1	数据传输基本知识	(111)
4.1.1	数字信号的传输	(111)
4.1.2	信道	(113)
4.1.3	数据传输的主要故障及解决办法	(114)
4.2	差错控制技术	(115)
4.2.1	差错控制的基本形式	(115)
4.2.2	检错和纠错的基本原理	(117)
4.2.3	常用检错码	(118)
4.3	线性分组码	(121)
4.4	海明校验码	(123)
4.5	用单片机软件实现海明校验	(125)
4.6	循环冗余校验码 (CRC 码)	(127)
第 5 章	故障测试诊断及易测性设计	(133)
5.1	故障、差错及失效	(133)
5.1.1	故障、差错、失效的基本概念	(133)
5.1.2	故障的特性	(133)
5.2	故障模型	(135)
5.2.1	晶体管开关级故障模型	(135)
5.2.2	门级故障模型	(136)
5.2.3	功能模块级故障模型	(137)
5.3	差错模型	(139)
5.4	防卫故障的原理	(140)
5.5	逻辑可控性、可观性和易测性	(141)
5.5.1	逻辑可控性和可观性	(141)
5.5.2	易测性	(142)
5.6	改善逻辑电路易测性的基本方法	(143)
5.6.1	改善逻辑可控性	(143)
5.6.2	增设观察点	(145)
5.6.3	同时改善可控性和可观性	(146)
5.7	印制电路板的易测性设计	(147)
5.7.1	改善 PCB 的可控性和可观性	(147)
5.7.2	设计上的注意事项	(148)
5.8	故障诊断和内建自测试 (BIT) 技术	(151)
5.9	可维修性设计	(151)
5.10	CPU 测试	(153)
5.11	数据存储器测试	(157)
5.12	程序存储器测试	(161)
5.13	通道和接口的测试	(162)
第 6 章	容错技术及其应用	(164)
6.1	容错技术的基本概念	(164)

6.2	电路级冗余技术	(165)
6.2.1	二倍冗余电路	(165)
6.2.2	四倍冗余电路	(166)
6.3	静态冗余技术	(167)
6.3.1	三模冗余 (TMR)	(167)
6.3.2	表决技术	(168)
6.4	动态硬件冗余	(171)
6.4.1	双机比较	(171)
6.4.2	备用替换	(172)
6.4.3	其它动态冗余技术	(172)
6.5	单片机双机容错设计实例	(172)
6.6	独立总线三冗余容错系统实例	(174)
第7章	软件可靠性技术	(179)
7.1	软件可靠性概念	(179)
7.1.1	软件危机	(179)
7.1.2	软件可靠性模型	(179)
7.2	程序测试技术	(180)
7.2.1	软件故障特性	(180)
7.2.2	程序测试和验证的不完备性	(181)
7.2.3	程序测试方法	(181)
7.3	软件避错技术	(183)
7.3.1	软件管理技术	(183)
7.3.2	提高软件可靠性的一般方法	(183)
7.3.3	层次化、结构化、模块化程序设计技术	(185)
7.3.4	汇编语言程序设计的避错方法和技巧	(186)
7.4	软件容错技术	(187)
7.4.1	容错软件的基本结构	(187)
7.4.2	容错软件的常用技巧	(188)
7.4.3	软件陷阱及其正确应用	(189)
7.4.4	软件 WTD 设计	(190)
7.5	软件算法的容错设计	(191)
7.5.1	逻辑运算的容错设计	(191)
7.5.2	数值运算的容错设计	(192)
7.6	输入输出接口的软件容错设计	(193)
7.6.1	输入接口的软件容错设计	(193)
7.6.2	输出接口的容错设计	(194)
7.6.3	人机接口的软件容错设计	(195)
7.7	程序运行监视器 (WTD) 及其应用	(197)
7.7.1	WTD 电路设计	(198)
7.7.2	专用微处理器监控电路及其应用	(200)

7.7.3	WTD 配套程序设计技巧	(202)
7.7.4	系统无扰动重恢复技术	(204)
第8章	总线技术及硬件模块化设计	(209)
8.1	总线基本知识	(209)
8.1.1	总线的分类	(209)
8.1.2	采用总线的优越性	(210)
8.1.3	总线标准和微机应用系统常用总线	(210)
8.2	芯片间串行总线技术	(213)
8.2.1	SPI 串行总线	(213)
8.2.2	MICROWIRE 串行总线	(216)
8.2.3	I2C 串行扩展总线	(216)
8.3	网络协议与现场总线技术	(223)
8.3.1	网络协议	(223)
8.3.2	现场总线	(225)
8.4	CAN 总线测控局域网特点及报文格式	(228)
8.4.1	CAN 基本特点	(229)
8.4.2	报文格式及错误检测	(229)
8.5	带 CAN 总线的新型单片机 P8XC592	(231)
8.5.1	P8XC592 的功能及引脚信号	(231)
8.5.2	CAN 控制器的硬件结构及其与 CPU 的接口	(235)
8.5.3	CAN 控制段寄存器和报文缓存器	(238)
8.5.4	P8XC592 的中断系统	(250)
8.5.5	CAN 中断处理程序实例	(252)
8.6	CAN 总线的物理层设计	(254)
8.7	CAN 总线控制器及扩展器件	(257)
8.7.1	PCX82C200 CAN 控制器主要特性	(257)
8.7.2	单片 CAN 收发器 PCA82C250	(259)
8.8	LON 神经元芯片网络	(261)
第9章	微机应用系统电源设计	(265)
9.1	稳定电源及其主要质量指标	(265)
9.2	线性集成稳压电源	(267)
9.2.1	三端固定输出集成稳压器	(267)
9.2.2	三端可调输出集成稳压器	(270)
9.2.3	低压差集成稳压器	(271)
9.3	开关稳压电源	(277)
9.3.1	开关电源分类及基本电路结构形式	(277)
9.4	无工频变压器开关电源实例	(280)
9.4.1	RCC 开关稳压电源	(280)
9.4.2	Topswitch 系列开关集成稳压器	(282)
9.4.3	PS 系列 AC—DC 开关电源模块	(285)

9.5	低压直流变换式开关电源实例	(286)
9.5.1	CW34063 构成的低压开关稳压器	(287)
9.5.2	CW4962/4960 构成的低压开关稳压器	(288)
9.5.3	MAX787/788/789 低压开关电源稳压器	(289)
9.5.4	YDS 系列三端开关电压调整器	(290)
9.6	分布式电源、不间断电源和电源母线技术	(291)
9.6.1	分布式电源	(291)
9.6.2	不间断供电装置	(292)
9.6.3	电源母线技术	(293)
9.7	稳压电源的选择比较及装配注意事项	(295)
9.7.1	稳压电源的选择比较	(295)
9.7.2	线性稳压电源的装配注意事项	(295)
9.7.3	开关稳压电源噪声抑制及装配注意事项	(296)
9.8	电池的选择和使用	(298)
9.8.1	免维护密封铅酸蓄电池	(298)
9.8.2	镍镉电池	(299)
第 10 章	微机应用系统的低功耗设计	(301)
10.1	对低功耗系统的新认识	(301)
10.2	CMOS 微处理器的功耗特性及其功耗控制原理	(301)
10.2.1	CMOS 微处理器的功耗特性	(301)
10.2.2	Intel 的 CMOS 单片机系列功耗控制原理	(302)
10.2.3	M68HC05 的功耗控制原理	(303)
10.2.4	高集成度的 80C186 的功耗控制原理	(305)
10.3	存储器的低功耗设计	(305)
10.3.1	低功耗存储器的选择	(305)
10.3.2	维持工作方式的应用	(306)
10.4	CMOS 电路的应用及接口技术	(307)
10.4.1	CMOS 电路的功耗特性	(307)
10.4.2	CMOS 电路的降耗措施	(308)
10.4.3	CMOS 电路的逻辑电平及接口设计	(308)
10.5	低功耗输入输出接口设计	(311)
10.5.1	80C51 系列单片机 I/O 端口特点	(311)
10.5.2	一般 I/O 口的降耗设计	(312)
10.5.3	串行接口的低功耗设计	(313)
10.6	低功耗系统的电源设计	(315)
10.6.1	直流—直流变换器特点及选用	(315)
10.6.2	MAXIM 直流—直流变换芯片	(318)
10.6.3	低功耗电源设计实例	(323)
10.7	低功耗系统的软件设计	(324)
10.8	低功耗系统设计实例	(325)

第 1 章 可靠性技术基础

1.1 可靠性基本概念

1. 可靠性与可靠度

可靠性是衡量产品质量的重要指标之一。一个微机系统或产品发生失效或故障是很难预测和无法完全避免的,这就需要运用可靠性理论来预防和减少失效或故障的发生,降低故障造成的损失。

可靠性定义为产品在规定的工作条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。评价产品可靠性高低更需要定量的概念。产品在规定时间内完成规定功能实际上是一个随机事件,需要用概率来定量描述它完成规定功能的能力,即产品的可靠度。

可靠度定义为在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的概率,记为 $R(t)$,因为它是时间 t 的函数,通常称为可靠度函数,用公式表示

$$R(t) = P(T > t) \quad (t \geq 0) \quad (1.1.1)$$

所谓产品是指系统、设备、部件、元器件以及软件等。在讨论产品的可靠性时,通常可将产品分为可修复与不可修复两大类。所谓不可修复产品,是指产品投入使用后,一旦出现故障或失效在技术上就无法修复,或者即使修复也是极不经济的。如常用的晶体管、集成电路、阻容元件等都是属于这一类产品;可修复产品是指产品投入使用后,如果损坏或出故障,仍然能够修复到具有原来的功能再投入使用的产品。如汽车、电视机等,一般的计算机应用系统也属于可修复产品。

可靠性和可靠度的定义只差两个字,可靠性是指能力,是定性指标;可靠度指概率,是定量指标,可靠度是可靠性的一个最有代表性的特征量。

式中的 T 是产品的寿命,它是一个非负随机变量。对不可修复产品,它是指产品从使用开始到失效前的工作时间(或次数);对可修复产品,它是指两次相邻故障之间的工作时间(或次数)。 $T > t$ 为一随机事件,表示产品寿命超过规定时间 t ,即在 t 时间内能够完成规定的功能。

显然, $R(t)$ 表示产品可靠程度的大小,为一非增函数,从理论上讲有

$$R(0) = 1 \quad R(+\infty) = 0$$

即产品在初始时完全可靠,但寿命不可能无限长,时间足够长时,其可靠度趋近于 0。

应当指出,可修复产品的可靠度是指首次无故障时间超过规定时间 t 的概率。

上述定义的可靠度既可表示一批产品的可靠性,也可表示单个使用的产品的可靠性。 $R(t)$ 的估计值可按如下方法计算:

例如, N 个产品从开始 ($t = 0$) 工作,到规定的 t 时刻的失效数为 $r(t)$,则当 N 足够大时,产品在该时刻的可靠度可用它的不失效频率来估计,即

$$\hat{R}(t) = \frac{N - r(t)}{N} \quad (1.1.2)$$

上式中 $\hat{R}(t)$ 为观测值。按照我国国家标准“可靠性基本名词术语及定义”规定,将估计值

称作“观测值”。因为实际上的可靠度等技术指标,都是由试验或现场观测计算而得。可靠度观测值 $\hat{R}(t)$ 定义为:

(1)对于不可修复产品是指到规定的时间区间 $(0, t]$ 终了为止,能够完成规定功能的产品数 $n_s(t)$ 与在该时间开始投入工作的产品数 N 之比。

(2)对于可修复产品是指一个或多个产品的无故障工作时间达到或超过规定时间 t 的次数 $n_s(t)$ 与观察时间内无故障工作总次数 N 之比。在计算 N 时,若每个产品的最后一次无故障工作时间不超过规定时间 t ,则不予计入。

因此,不论对于不可修复产品还是可修复产品,可靠度的观测值都有形式相同的计算公式

$$\hat{R}(t) = \frac{n_s(t)}{N} \quad (1.1.3)$$

这里 $n_s(t)$ 称为残存数,即为时刻 t 仍然保持完好的产品数, $n_s(t) = N - r(t)$ 。

这里只是不计入可修复产品的修复时间,即故障一旦发生便更换一台新的同型号产品继续进行试验。

2. 失效分布

产品在规定的条件下和规定的时间 t 内,丧失规定功能(即失效)的概率,称为失效分布或寿命分布,亦称累积失效概率或不可靠度,可用如下公式表示

$$F(t) = P(T \leq t) \quad t \geq 0 \quad (1.1.4)$$

显然

$$F(0) = 0$$

$$F(+\infty) = 1$$

由定义可知 $R(t)$ 与 $F(t)$ 有如下关系

$$R(t) + F(t) = 1$$

如图 1-1 所示。

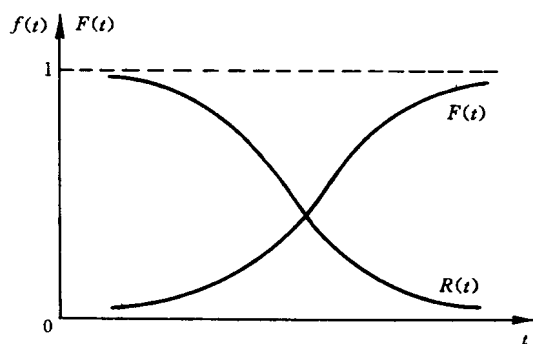


图 1-1 $R(t)$ 与 $F(t)$ 曲线

累积失效概率的观测值为

$$\hat{F}(t) = \frac{r(t)}{N} \quad (1.1.5)$$

例 1-1 有 110 只晶体管,工作到 5000h 有 10 只失效,工作到 10000h 总共有 53 只失效,试求此产品在 5000h 与 10000h 时可靠度与累积失效概率的观测值。

解 因为 $t=5000$ h 时, $r(5000)=10$,

所以 $\hat{R}(5000) = \frac{N - r(5000)}{N} = \frac{110 - 10}{110} \approx 90.91\%$

$$\hat{F}(5000) = \frac{10}{110} \approx 9.09\%$$

又因为 $t = 10000h$ 时, $r(10000) = 53$

所以
$$\hat{R}(10000) = \frac{110 - 53}{110} \approx 51.82\%$$

$$\hat{F}(10000) = \frac{53}{110} \approx 48.18\%$$

3. 失效密度

失效密度是产品失效分布函数 $F(t)$ 的导函数, 亦称产品寿命的概率密度函数。记作

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t) \quad (1.1.6)$$

由此还可得到

$$F(t) = \int_0^t f(u) du, t \geq 0 \quad (1.1.7)$$

对于失效密度的观测值, 由关系式(1.1.6)及 $F(t)$ 的观测值(1.1.5), 可得

$$\hat{f}(t) = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{N \Delta t} = \frac{\Delta r(t)}{N \Delta t} \quad (1.1.8)$$

失效密度的观测值 $\hat{f}(t)$ 表示在规定的的时间区间 $(0, t]$ 内的终了时刻 t 开始的单位时间内的失效数 $\Delta r(t)/\Delta t$ 与该区间开始投试的产品数 N 之比。其中 $\Delta r(t)$ 是在 $(t, t + \Delta t)$ 时间内的失效产品数。

对可修复产品, 式(1.1.8)表示一个或多个产品的无故障工作时间达到规定时间 t , 但不超过从 t 起的单位时间的故障次数 $\Delta r(t)/\Delta t$ 与观测时间内无故障工作总次数 N 之比。而此时 $\Delta r(t)$ 是在 $(t, t + \Delta t)$ 时间内的故障次数。

所以不论产品是否可修复, 失效密度的观测值都可用式(1.1.8)计算。

4. 失效率

对于产品的实际使用者, 十分关心的是目前正常工作的产品到 t 时刻后单位时间内产生失效的可能性。正如用发病率来描述发病的程度一样, 可靠性技术中通常采用“失效率”来表征产品到 t 时刻后有可能发生失效的程度, 失效率是研究可靠性的一个极为重要的指标。

产品在 t 时刻的失效率, 是指产品工作到 t 时刻尚未失效的条件下, 在 t 时刻后的单位时间内发生失效的概率, 简称“失效率”, 记为 $\lambda(t)$ 。假定 N 个产品的累积失效概率为 $F(t)$, 则 $NF(t)$ 为到 t 时刻已失效的产品数, $N - NF(t)$ 为 t 时刻仍在正常工作的产品数。 $NF(t + \Delta t) - NF(t)$ 则为 t 到 $t + \Delta t$ 之间失效数。因此由失效率的定义可得

$$\lambda(t) = \frac{NF(t + \Delta t) - NF(t)}{[N - NF(t)] \Delta T} \quad (1.1.9)$$

当 N 充分大, 而时间间隔 Δt 趋于零时, 式(1.1.9)可化为

$$\lambda(t) = \frac{F'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.1.10)$$

式(1.1.10)为 t 时刻的瞬时失效率, 即上述的失效率。而且将 $\hat{F}(t) = r(t)/N$ 代入式(1.1.9)即可得到失效率的观测值 $\hat{\lambda}(t)$ 的计算式为

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{[N - r(t)] \Delta t} = \frac{\Delta r(t)}{n_s(t) \Delta t} \quad (1.1.11)$$

此算式对不可修复产品是指时刻 t 后的单位时间内失效的产品数 $[r(t + \Delta t) - r(t)]/\Delta t$ 与 t 时刻尚未失效的产品数 $N - r(t)$ 之比; 对可修复产品则是指 t 时刻后的单位时间内的故

障次数 $[r(t + \Delta t) - r(t)]/\Delta t$ 与观测产品的无故障工作时间达到或超过规定时间 t 的次数 $n_s(t)$ [即 $N - r(t)$] 之比。从失效率的观测值计算式,可以定出失效率的单位可表示为“%/h”。失效率通常采用“1/h”作单位。对于高可靠性产品,则通常采用“ 10^{-9} /h”作单位,称用一个“菲特”,简记“Fit”。

还需要注意的是失效密度与失效率,虽然它们都是反映产品失效的变化速度,但它们是两个不同的概念。失效密度是在全部试验产品中考虑(不论它们是否失效),所以观测值计算式中的分母为 $N\Delta t$;而失效率则是在尚未失效的产品中考虑,所以它的计算式中的分母为 $n_s(t)\Delta t$,即 $[N - r(t)]\Delta t$ 。一般地说,在反映失效变化速率上失效率要比失效密度灵敏。

许多产品的失效率函数曲线呈两头高、中间低图形。典型的失效率曲线 $\lambda(t)$ 如图1-2所示,呈浴盆形状,故通常“浴盆曲线”。

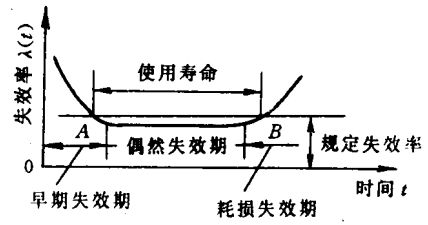


图1-2 典型的失效率曲线

由图可见,产品的失效率曲线,随着工作时间的推移,可以分为早期失效期、偶然失效期、耗损失效期三个时期。早期失效期, $\lambda(t)$ 较高且呈下降趋势。主要是由于设计错误、工艺缺陷、装配问题、管理不当等原因引起的。由于这个阶段产品的失效率很高,所以工厂常采用筛选、老化等办法来剔除一些不合格产品,以减少出厂产品的早期失效。偶然失效期是产品的正常使用期,这个阶段失效率较低并且基本保持常数,是产品的最佳工作阶段。这期间产品发生故障大多是由于偶然因素引起的。在耗损失效期, $\lambda(t)$ 又呈上升趋势,这是由于元器件老化、疲劳和磨损等原因使产品性能恶化的缘故,因此应采取维修或更换等手段来维持产品的正常工作,推迟耗损失效期的到来,延长产品的寿命。

我国国家标准规定,电子元器件失效率共分为七级,如表1-1所示。

表1-1 电子元器件失效率分级

名 称	符号	最大失效率 (1/h)	名 称	符号	最大失效率 (1/h)
亚 五 级	Y	3×10^{-5}	八 级	B	1×10^{-8}
五 级	W	1×10^{-5}	九 级	J	1×10^{-9}
六 级	L	1×10^{-6}	十 级	S	1×10^{-10}
七 级	Q	1×10^{-7}			

例1-2 设有100个产品,从 $t = 0$ 开始运行,在50h 内无产品失效,在50~51h 内有一个产品失效;在51~52h 内有3个产品失效,求该批产品在50h 及51h 时的失效率各为多少?

解 $r(50) = 0, r(50 + 1) = 1, N = 100, \Delta t = 1$