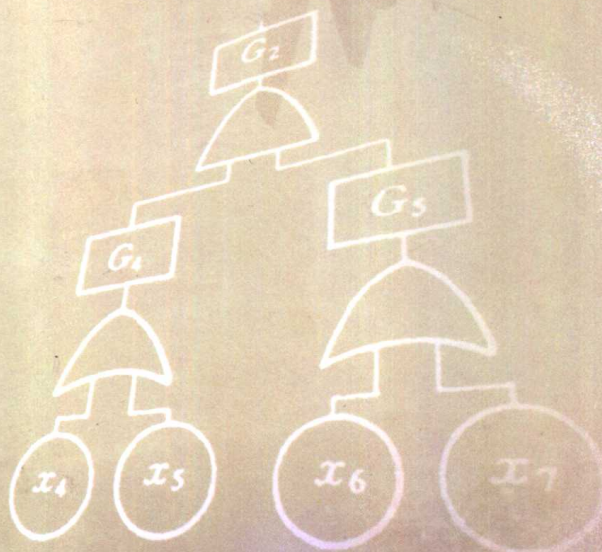


系统可靠性分析

郭波 武小悦 等编著



系统可靠性分析

郭波 武小悦 张秀斌 编著
张凤林 刘芳 王广伟

国防科技大学出版社
·长沙·

内容简介

系统可靠性分析技术已广泛地应用于电子、航天、航空、机械等领域。全书系统介绍了可靠性的基本概念、可靠性指标论证方法、典型系统与网络系统的可靠性模型、可靠性预计与分配方法、高可靠性系统设计要点、故障分析技术、维修性工程、可靠性试验、系统可靠性评定、系统可靠性仿真等理论方法。在内容上既着重于介绍系统可靠性分析的基本理论和方法,又力图反映出系统可靠性分析技术最新研究成果。本书可作为管理科学与工程、系统工程专业的研究生或高年级本科生教材,还可作为科技工作者和技术管理者学习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

系统可靠性分析./郭波,武小悦,张秀斌,张凤林,刘芳,王广伟编著. —长沙:国防科技大学出版社,2002.1

ISBN 7-81024-813-8

I. 系… II. ①郭…②武…③张…④张…⑤刘…⑥王… III. 系统理论-教材
IV. N945

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4555681 邮政编码:410073

E-mail:gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:何晋 责任校对:文慧

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:15.5 字数:358千
2002年1月第1版第1次印刷 印数:1-3000册

*

定价:22.00元

前 言

系统可靠性分析是用系统工程的思想观念,从整体性、综合性和实际应用出发,对系统的可靠性设计、试验、管理、系统维修等问题进行分析的技术。

随着科学技术的发展,系统的结构日趋复杂,多功能的系统大量出现,对可靠性的要求越来越高,研制高可靠性系统的难度也越来越大。在我国,自 20 世纪 80 年代以来,系统可靠性工作大力开展,已广泛地应用于电子、航天、航空、机械等领域。我国加入 WTO 后,直接关系到市场竞争能力的产品可靠性问题更加受到关注,广大的工程技术人员和管理人员对可靠性的认识日益提高,许多中高级科技人员与科技管理人员迫切要求掌握可靠性技术。

本书是为国防科技大学管理科学与工程、系统工程专业研究生编写的教材,是在作者多年的研究工作与教学实践的基础上完成的。全书共分八章,介绍了可靠性的基本概念、可靠性指标论证方法、典型系统可靠性模型和网络系统可靠性模型、可靠性预计与分配技术、高可靠性系统设计要点、故障分析技术、维修性工程、可靠性试验、系统可靠性评定、系统可靠性仿真等技术。在内容上既着重于系统可靠性分析的基本理论和方法,又力图反映出系统可靠性分析技术的最新进展。本书除可作为研究生或大学高年级本科生的教材外,还可作为科技工作者和技术管理者学习的参考书。

本书第一、三、六章、第二章的第一、二、四、五节以及第四章由郭波编写,第四章的第二、三节、第五章的第一、二、三、四、五节、第七章、第八章的第一、二、三、四节由武小悦编写,第二章的第三节由张凤林编写,第四章的第四节、第五章的第六节由张秀斌编写,第五章的第七节由王广伟编写,第八章的第五节由刘芳编写。全书由郭波统稿。编写过程中参考了很多有关文献,主要参考文献名及作者已列于书后。这里,谨对全部作者表示衷心感谢。

在写作出版过程中,得到国防科技大学研究生院、人文与管理学院有关领导和同志的热诚支持和帮助,国防科技大学出版社何晋编辑对全书进行了认真的编辑。在此,一并表示诚挚的谢意。

编著者

2001 年 11 月

目 录

第一章 可靠性概论

1.1 引言	(1)
1.2 基本概念	(5)
1.3 可靠性工程中常用的概率分布	(9)
1.4 可靠性指标及指标体系	(12)
1.4.1 指标	(12)
1.4.2 指标体系	(13)
1.5 可靠性管理	(16)

第二章 系统可靠性模型、预计和分配

2.1 任务分析与结构功能分解	(18)
2.2 典型系统可靠性模型	(19)
2.2.1 串联系统可靠性模型	(19)
2.2.2 并联系统可靠性模型	(20)
2.2.3 混联系统可靠性模型	(22)
2.2.4 n 中取 r 系统可靠性模型	(23)
2.2.5 冷贮备系统可靠性模型	(23)
2.2.6 竞争模型	(25)
2.2.7 混合模型	(25)
2.2.8 复合模型	(25)
2.3 网络系统可靠性模型	(26)
2.3.1 节点不失效的网络系统可靠性模型	(26)
2.3.2 节点可失效的网络系统可靠性模型	(32)
2.3.3 网络系统可靠性的有关问题	(38)
2.4 可修系统可靠性模型	(38)
2.4.1 单部件可修系统	(39)
2.4.2 串联可修系统	(42)
2.4.3 两个相同部件的并联系统	(44)
2.5 可靠性指标论证	(45)
2.5.1 可靠性指标的选取	(45)

2.5.2	可靠性预计与分配	(50)
2.5.3	可靠性预计方法	(52)
2.5.4	可靠性分配方法	(55)

第三章 高可靠性系统设计要点

3.1	将长期放心使用作为设计目标	(59)
3.1.1	制作牢靠耐用的系统	(59)
3.1.2	制造技术与可靠性	(59)
3.1.3	金属材料的疲劳断裂	(61)
3.1.4	使用电子器件制造高可靠性系统	(61)
3.2	设计功能难以中断的系统	(62)
3.2.1	高可靠性设计的冗余设计方式	(62)
3.2.2	设计能快速恢复的系统	(62)
3.2.3	系统设计时要考虑维护维修零件的供应	(63)
3.3	设计抗环境变化的系统	(63)
3.3.1	周围环境温度与可靠性	(63)
3.3.2	彻底排除垃圾和污迹	(65)
3.3.3	设计抗震抗冲击抗加速度的系统	(66)
3.3.4	外来噪声与 EMC 强化	(67)
3.4	以服务无中断为设计目标	(68)
3.4.1	强化自动恢复功能	(68)
3.4.2	提高预备系统的可靠性	(68)

第四章 故障分析技术

4.1	故障模式、影响及危害性分析(FMECA)	(70)
4.2	故障树分析	(75)
4.2.1	故障树分析法的特点与作用	(75)
4.2.2	故障树的建立	(76)
4.2.3	故障树的定性分析	(79)
4.2.4	故障树定量分析	(84)
4.3	动态故障树分析	(92)
4.3.1	动态故障树的提出	(92)
4.3.2	动态故障树的逻辑门	(93)
4.3.3	动态故障树模型的求解方法	(94)
4.4	GO 法	(97)
4.4.1	名词术语和符号	(97)

4.4.2 建模分析	(100)
4.4.3 GO法与FTA的比较	(104)

第五章 维修性与维修工程

5.1 概述	(106)
5.1.1 维修和维修分类	(106)
5.1.2 维修性与维修工程	(108)
5.1.3 装备的维修级别	(109)
5.1.4 维修性要求	(110)
5.2 维修性预计与分配	(113)
5.2.1 维修性模型	(113)
5.2.2 维修性预计	(115)
5.2.3 维修性分配	(117)
5.3 维修性试验与评定	(118)
5.3.1 概述	(118)
5.3.2 维修性试验与评定的程序	(119)
5.3.3 故障的模拟与样本的分配方法	(122)
5.3.4 维修性试验方案的设计	(123)
5.4 以可靠性为中心的维修(RCM)	(125)
5.4.1 RCM的基本思想	(125)
5.4.2 系统的RCM分析	(130)
5.5 维修策略与备件决策	(136)
5.5.1 使用检查工作的间隔期	(137)
5.5.2 定时修复与定时报废工作的间隔期	(138)
5.5.3 影响预防性维修间隔期决策的其他因素	(144)
5.5.4 备件储备量决策	(144)
5.6 视情维修	(147)
5.6.1 概述	(147)
5.6.2 视情维修决策模型	(148)
5.6.3 视情维修决策步骤	(152)
5.6.4 EXAKT系统	(153)
5.7 面向任务的维修方法	(154)

第六章 可靠性试验与分析

6.1 概述	(159)
6.2 可靠性寿命试验	(160)

6.2.1	试验方案设计原则	(160)
6.2.2	指数分布寿命试验方案	(160)
6.2.3	指数分布寿命试验统计分析	(162)
6.3	可靠性验证试验	(168)
6.3.1	定数截尾寿命抽样方案	(169)
6.3.2	定时截尾寿命抽样方案	(170)
6.3.3	序贯寿命试验方案	(171)
6.4	可靠性增长试验	(172)
6.4.1	可靠性增长过程	(173)
6.4.2	可靠性增长试验	(174)
6.4.3	寿命周期各阶段的可靠性增长	(175)
6.4.4	可靠性增长管理	(176)
6.4.5	可靠性增长模型	(177)
6.4.6	可靠性增长试验方案	(181)

第七章 系统可靠性评定

7.1	Bayes 公式	(186)
7.2	验前分布的确定	(187)
7.2.1	无信息先验	(187)
7.2.2	共轭先验	(190)
7.2.2	极大熵先验	(191)
7.2.3	利用边缘密度确定先验分布	(193)
7.2.4	BootStrap 方法	(196)
7.3	单元产品的可靠性的 Bayes 评定	(198)
7.3.1	成败型产品可靠性的 Bayes 评定	(198)
7.3.2	指数寿命型产品可靠性 Bayes 评定	(199)
7.4	系统可靠性综合评定	(200)
7.4.1	金字塔模型	(200)
7.4.2	成败型串联系统的信息综合	(200)
7.4.3	指数寿命型串联系统的信息综合	(202)
7.4.4	成败型与指数型串联系统的信息综合	(204)
7.5	系统可靠性的 Bayes 评定方法	(205)
7.5.1	成败型串联系统的 Bayes 综合评定	(205)
7.5.2	指数寿命型串联系统的 Bayes 综合评定	(207)
7.5.3	成败型与指数型串联系统的 Bayes 综合评定	(209)

第八章 系统可靠性仿真

8.1	概述	(211)
8.2	随机变量的抽样方法	(212)
8.2.1	随机数的产生与检验	(212)
8.2.2	直接抽样方法	(215)
8.2.3	舍选抽样方法	(215)
8.2.4	变换抽样方法	(219)
8.2.5	复合抽样方法	(221)
8.2.6	近似抽样方法	(221)
8.3	随机向量和随机过程的抽样方法	(223)
8.3.1	利用条件分布进行抽样	(223)
8.3.2	正态随机向量的抽样	(224)
8.3.3	典型随机过程的模拟	(225)
8.4	典型系统的可靠性仿真	(226)
8.5	基于离散事件系统模型的系统可靠性仿真技术	(228)
8.5.1	基本术语	(229)
8.5.2	常用仿真推进策略	(230)
8.5.3	三种仿真策略比较	(233)

参考文献

第一章 可靠性概论

1.1 引言

(1) 可靠性的历史

可靠性就是产品正常工作的能力,是衡量产品质量好坏的一个指标。比如电视机、飞机等都有可靠性问题。可靠性问题并不是一个新问题,事实上,很久以前人们就在关心所使用的工具和生活用品的可靠性,只是由于那时生产工具和生活用品都是结构简单的产品,它的损坏和修复易被人们理解。

可靠性作为专门课题来研究是从第二次世界大战开始的。当时出现了雷达、飞机、导弹等比较复杂的兵器,这些兵器的主要部分——电子设备都屡出故障,丧失了应有的作战能力。例如美国空军的电子设备到达远东 60% 发生故障,海军舰艇 70% 的电子设备处于故障状态,这些问题促使人们开始了早期的可靠性研究。当时主要是开展电子管的可靠性研究,虽然取得了可喜的进展,但对电子设备的可靠性提高不大。到 20 世纪 40~50 年代,产品的可靠性仍然低劣,如 1949 年美国无线电通讯设备大约有 14% 的时间处于停机状态,水声设备有 48% 的时间、雷达设备约有 84% 的时间处于不能工作状态,1950 年美国海军电子设备能正常工作的设备仅占 1/3。这些现象引起美国和其他国家的注意,纷纷成立专门机构开展对产品可靠性的系统研究。在调查中还得知,对电子设备而言,每年的维修费用是设备原价的 60% 到 5 倍,当时人们也希望能通过提高产品的可靠性来减少维修费用,因此 20 世纪 50 年代主要研究如何生产出故障少不易损坏的产品,但到 20 世纪 50 年代末仍没解决费用过高的问题。例如 1959 年美国国防预算的 25% 用于维修的开支,而两年中花在设备和机械维护上的费用与用于采购的经费几乎相等。为了降低维修费用,从 20 世纪 60 年代初开始了对维修性设计和评价方法的研究,随着研究的进展,从 20 世纪 60 年代末开始,可靠性的研究已由上面说的狭义可靠性扩展到包括可靠性、维修性、保障性、可用性的广义可靠性的概念。

系统的可靠性保证工作开展稍迟些,1950 年美国国防部成立了电子装置的可靠性委员会 Ad Hoc Group 开始了系统可靠性研究,1952 年这个委员会更名为 AGREE(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment),该委员会进行了比较广泛的活动,1957 年该委员会在 9 个专门委员会的报告基础上提出了报告,说明了试制、生产时的可靠性测定方法和考虑可靠性的任务书制作方法等具体内容,这份报告在很长一段时间内对可靠性工作起到了指导作用,它的基本思想方法到现在仍在使用。

另外,从 1960 年左右开始,美国在武器系统研制中开始全面贯彻可靠性工作大纲,可靠性保证的要求被美国国防部定为合同的一部分内容。在研制 F-111A、F-15A 战斗

机、M1 坦克、“民兵”导弹、“阿波罗”宇宙飞船等装备中对可靠性提出了严格要求。

日本于 1960 年左右开始重视可靠性保证技术。1961 年开始了飞机的可靠性研究,可靠性保证的具体研究工作也作为新干线计划的一部分。

1965 年 IEC(国际电气标准会议)设立了电子器件与部件的可靠性技术委员会,第一次大会在东京召开,以此为契机,日本开始了以提高电子器件的可靠性为目的的各种调查研究工作。1970 年日本科学技术联盟主办了第一届可靠性会议。1970 年 5 月日本宇宙开发事业团下设可靠性安全管理部,对可靠性和质量管理起到了推动作用。在火箭、人造卫星等开发过程中取得了大量可靠性方面的成果,以后被广泛推广到通信系统、计算机、飞机、汽车等产品中去,FMEA、FTA、DR 等技术也普及到化学制品、医疗器械、建筑等领域。

随着各国研究的不断深入,可靠性在 20 世纪 70 年代步入成熟阶段,到 20 世纪 80 年代可靠性进入深入发展阶段。可靠性作为提高武器装备作战效能降低武器系统全寿命周期费用的一种有效工具得到了进一步发展。

我国可靠性工程起步于 20 世纪 60 年代,主要在航空、航天、电子、机械等领域开展研究工作。进入 20 世纪 80 年代以后,可靠性得到了迅速发展,特别是武器装备的可靠性管理和研究工作取得了长足的进步。随着国家的改革开放,科学技术迅速发展,产品的可靠性问题日益突出。海湾战争又给人们以深刻的启示,未来高技术战争对装备的可靠性提出了更高的要求,国家各级部门的领导对可靠性工作都非常重视,并从制度、标准、规范上抓起,全面推动我国可靠性工作。我国已经颁布了一系列可靠性方面的国家标准和国家军用标准,并在大型工程项目中得到了应用。

(2) 可靠性的重要性

现代科学和技术的迅速发展使得工程产品和工程活动越来越复杂,规模越来越庞大,构成产品的元器件越来越多,这些产品面临着多变和变化急剧的环境,在这种情况下产品的可靠性问题显得更加重要、更加突出。

下面从几个侧面说明这一看法。

① 现代工程系统大多数是多功能的自动化系统,它由大量互相联系、互相依存的进行着不同过程(热的、机械的、电的等)的组件构成,由于功能的复杂化,产品所使用的元器件数量越来越多。例如美国 RCA-100 土星火箭检测计算机,使用了大约 117 800 个元器件,民兵导弹机动指挥网络电缆设备与数字式处理设备使用了 1 017 936 个元器件。虽然随着大规模集成技术的发展,元件数目大大减少,但工程系统功能的复杂程度却越来越高。在这种情况下,如果不加强对产品可靠性的控制,产品的可靠性就会逐渐下降,这是显而易见的。

② 大规模工程系统的开发给人类带来巨大的经济效益,但一旦出现故障就会造成重大损失。例如美国尼亚加拉瀑布附近的达斯培克水力发电站(135 万千瓦)向加拿大的多伦多地区供电。由于线路保护装置调整的不恰当,在正常负荷电流情况下,保护装置发生错误动作,突然跳闸造成流向加拿大的约 176 万千瓦的电力倒送回达斯培克发电厂造成大片电力系统瓦解,停电 13 小时 22 分钟,事故涉及 20 万平方公里,3000 万人口,对生活和生产带来诸多不便,造成重大损失。

③ 研制各种既聪明又能干的机器人是人类长期以来的科学幻想,目前这些科学幻想已经成为现实,成千上万的工业机器人已经在机械加工、石油化工、金属冶炼、采矿、纺织、造纸、玻璃等工业部门广泛得到应用。它们实现了各种作业的自动化,在有危险、高温、粉尘多、噪声大、有毒、有辐射等许多不适宜人工作的恶劣环境中,大显身手,做出了卓越的贡献,但就是这些由人制造,服务于人类的机器人,由于其可靠性低,不断发生伤人事故。

④ 对于机械类产品,如果遵守设计标准,所设计的产品其可靠性一般可以得到保证,所谓设计标准是由材料选择、结构形式、容许应力,安全系数等决定的,这些标准适用规定的环境条件,并按规定生产方式进行生产的情况。但随着技术的发展对产品提出了新的要求,如要求它们适应环境的极端化,产品的复杂化和巨大化,产品用于未知领域,这样如果看不到这些要求和变化将造成事故。例如,飞机上由弹射座椅和降落伞构成的应急救生装置,曾挽救了成千上万飞行员的生命,但到 20 世纪 50 年代,由于飞机飞行速度超过音,原有成功的救生装置成了危险设备,险些造成试飞员的死亡。

⑤ 高可靠性可提高装备作战能力,降低维修保障费用。高可靠性意味着故障次数减少,从而装备的战备完好率提高,保证装备有较高的使用频率、出动率,提高装备持续作战和完成任务的能力。例如,美国 F-15A 战斗机由于可靠性维修性较差,其战备完好率长期保持在 50% 左右,经过改型的 F-15E,由于显著地提高了可靠性、维修性及测试性,在海湾战争中的战备完好高达 95.5%,其连续作战能力几乎提高一倍。因此,故障多、维修困难的装备其性能再好也是没有战斗力的,F-111 是美国高性能的战斗轰炸机,1986 年美国空袭利比亚时,24 架 F-111 从英国基地起飞,其中 6 架飞机因故障原因而空中返回,到达目标后又有 5 架因火控系统故障而未能投弹轰炸。由此可见,装备必须要有高可靠性才能保持高作战能力。

(3) 可靠性和费用

由上述几个侧面可以看出:在科学与技术迅速发展的今天,产品的可靠性显得更加突出,产品的可靠性已被列为评价系统最基本的价值目标之一。它不仅是一个系统的重要质量指标,而且关系到整个系统研制的成败,系统的可靠性与其性能、成本、进度等基本价值目标有着密切的关系。如果在确定价值目标的序值时,忽视可靠性或者在设计时和生产中不能保证系统具备所要求的可靠性,其技术性能就不能很好的发挥,甚至不能被实际应用。从而导致系统失去实用价值,为之而付出的一切也就会全部丧失意义,甚至还可能造成不可估量的潜在损失,包括生命安全和政治上的损失。钱学森教授明确指出“在研究一个大而复杂的系统(不论是技术领域或经济领域)时就不能不考虑它的可靠性。不仅是其各个组成部分的可靠性,更要研究它们组成的整个系统的可靠性”。国外甚至有人认为,任何武器系统必须能自始至终可靠地工作,即使性能降低了,仍能可靠地工作,而不需要可靠性不高,在性能指标上能满足严格要求的武器系统。有时为了某种目的也可以不顾成本而要求达到高度的可靠性,但一般情况下不适当地制定可靠性目标,导致在技术上不能实现或者虽然可以实现但要耗费大量资金和很长的研制时间,那就会损害到其他基本价值目标,从而降低了整个产品的总价值,自然也是不可取的。

维修性的提高不仅能提高装备的战备完好性而且还能减少维修保障费用,如装备一个 F-15A 中队所需的维修人员为 554 人,F-22 的可靠性比 F-15 提高一倍多、维修工时减

少一半多,并且开展了测试性和保障性设计,采用两级维修,不需要中继级维修,装备一个F-22中队所需的维修人员只有277人,仅为F-15A的一半。

对产品而言,使用方的要求多样化,且可靠性高、不出故障的要求越来越强烈,为此在产品开发时,

- ① 采用高可靠性的部件;
- ② 采用冗余技术;
- ③ 加强试验。

等手段是必要的,并且在生产阶段也有必要加强质量管理,因此成本增高是不可避免的,但是可靠性差的产品故障时,要花修理费,加上因故障停机造成的损失,将会是更大的损失。

这样将购入费与使用中因故障造成的损失和维修费一起考虑的话,或者说考虑产品的全寿命周期费用时,可靠性成为重要的因素之一。

考虑产品购买或设备投资时,期望将寿命周期费用作为基准来讨论成本。从使用方的立场来研究,寿命周期成本可用下式来表示:

$$\text{寿命周期成本} = \text{购入费} + \text{维持费}(\text{使用费} + \text{维修费}) \quad (1.1)$$

由此得

$$\text{效费比} = \frac{\text{系统效能}}{\text{寿命周期费用}} \quad (1.2)$$

为使效费比高,就要提高系统效能降低寿命周期费用,若将寿命周期费用作为基准,像图(1.1)那样将使用方成本定量化可求得最佳成本。图1.1表示当提高产品可靠性时(这里用平均寿命MTBF),产品的制造费增高而使用与维修费用急速下降。使用方负担的全部费用下降。但当MTBF超过某一水平时,设计制造费的增加量比使用维修费的减少量要大,使用方负担的全部费用上升。

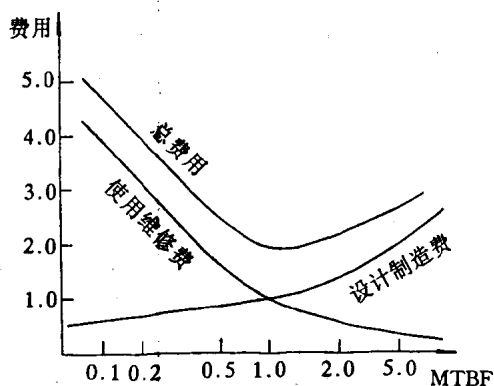


图 1.1 可靠性与费用的关系

在开发新产品过程中,设计适当的 MTBF,降低使用费用(燃料费、电力费等)保障部件的供应等问题,要综合进行考虑,特别是在产品开发的初期,要一并讨论产品的性能、可靠性、寿命周期费用,进行综合权衡得到最佳设计。

产品质量的含义一般包括性能、可靠性、可用性、外观等项内容。可靠性是产品质量的一个重要指标,粗略地说,可靠性也就是产品性能的稳定性,这种稳定性保证产品的正常工作。以工厂生产线为传统的传统质量管理已经不能保证现代复杂工业系统的高质量了,取而代之的应是以可靠性为中心的全面质量管理。这种形势促进了可靠性工程的迅速发展。产品的可靠性是设计出来的、生产出来的、管理出来的。设计决定了产品的固有可靠性,如果设计水平不高,例如选用了不恰当的设计方案和工艺、不合适的原材料等,则无论怎样控制生产过程的质量,产品的可靠性仍然是不高的,所以一定要把可靠性设计到产品中去;生产部门要努力实现设计的意图,并在生产过程中不引进不可靠因素,使产品尽可能达到设计的可靠性;我国工业现状是:产品的故障有很大比例是由管理不当造成的,如果进行严格的科学管理,产品质量可以大幅度提高。

可靠性理论发展到现在已形成可靠性工程、可靠性物理、可靠性数学三个独立的分枝。可靠性工程是系统工程的一个重要的专门课题。它运用系统工程的观念和方法,从设计、生产和使用等方面来研究对系统可靠性进行控制的技术,它是一门综合性工程学科。

可靠性工程活动要贯穿于产品的全寿命周期,全寿命周期是指产品从系统规划、工程开发、批量生产、运用到退出的全过程。在产品寿命期内可靠性工程活动有两个并行过程,一个是工程技术过程,一个对工程技术过程的控制过程——可靠性管理活动。

1.2 基本概念

(1) 可靠性

可靠性是指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,可靠性的概率度量称为可靠度。

产品是一种通用术语,它指从系统、设备、组件到元件的任何物品,使用这一术语可以避免做出有关基准的物品大小或复杂程度的规定。

规定的条件是指产品在其寿命周期内所处的预先规定的全部外部条件。外部作用条件包括环境、使用、维修等条件。

环境条件包括自然环境、诱发环境两类。自然环境条件包括气候、地形等地球表面存在的各种因素。气候因素包含有温度、湿度、大气压、盐雾、尘雾、风、雨、太阳辐射等,地形因素包含地形轮廓、土壤、植物、动物、昆虫、微生物等。诱发环境条件包括人为制造环境与人为改变环境两种。前者涉及到这样一些环境,例如放射现象、核爆炸冲击波、燃料燃烧引起的空气污染以及电磁干扰等;人为改变环境是人的活动对自然环境条件作用而产生的环境条件,例如城市的存在引起地面和空气温度的增高,植物的变迁引起水土的流失和地面温度的降低等等。诱发环境条件还包括振动、冲击、加速度等。

使用条件包括:功能模式、工作时间及使用频度,输入信号的要求及误差,工作能源的特性及误差,如电流电压、周波、波形、瞬变等,负载条件,设备操作的程序,使用人员技术水平等。

维修条件包括维修体制、维修方式,维修人员状况,维修设备和工具等。

外部条件各因素的强度是在某个范围内随机的变化着,并且各种因素、因素的不同状态互相交织在一起作用于产品。

产品能承受的外部条件是预先规定的,由任务书所明确的,而不是任意的。为了便于管理有些环境条件已标准化,国军标对环境条件有明确的划分。

规定的时间是指产品完成规定功能的时间,可用时间单位表示,也可用相当于时间单位的公里数,周期数表示。

规定的功能是指产品的性能技术指标,一个产品往往具有若干项功能。这里所说的“完成规定功能的能力”,是指产品若干功能的全体,而不是其中的一部分。对功能的描述有些场合能用定量的,有些场合只能用模糊的方式。在这个问题的程度上容易发生争执。一些产品的源特征是明确的,比如直流稳压电源的指标有输出电压及其调节范围,额定输出电流、纹波电压、电压调整率、负载调整率这些指标可用一组数值表达。有些产品的性能,如音质优美,操作方便等指标,照理也应用某种尺度加以表示,但是在测定音质时却会由于听者的爱好、试听室的混响和内部状况以及听者的身体状况等的不同而产生各种误差;同样对操作方便不方便的评价也会因人、因时、因事、因地的不同很难准确地评价。对这类指标必须采用数量化的方法给予评价。性能指标和技术要求越高,产品完成规定功能的可能性就越小。“规定功能”的定义直接关系到可靠性的大小。

产品的可靠性是时间的函数。产品的可靠度用概率来表示,它是一个统计的概念,是针对一批或多批相同产品而言的。可靠性不能预计一个特定产品能工作多长时间就失效,但可以借助于统计的方法,预计一个产品在规定的时间内正常工作的概率。

(2) 维修性

维修性是指可修产品在规定的条件下和规定的时间内,按照规定的程序和方法进行维修时,保持或恢复其规定状态的能力。维修性的概率度量称为维修度。

(3) 可用性

可用性指产品在规定的条件下,在任意随机时需要和开始执行任务时,处于可之作或可使用状态的程度,其概率度量亦称为可用度。

可用性综合反应了产品的可靠性和维修性所达到的成绩,也称广义可靠性。狭义的可靠性不包括维修性的概念。

现以导弹为例来说明可靠性、维修性、可用性三大指标。

设贮存寿命为十年。导弹是一次使用的产品,但在贮存期间许多部件是可以维修更换的。在十年之内的某一(随机的)时刻,接受发射命令时处于良好状态的概率(例如90%)即其可用度。在规定的使用维修条件下,在规定时间(例如一小时)内完成发射准备工作的概率(例如85%)为发射准备的可靠度。由于在这一小时内考虑了暂停工作和进行维修的可能性,如果要使这短时间内的可用性达到高水平,主要只能依靠导弹的高可靠性,因为一旦发生故障或故障较多时往往是来不及修理的。在规定的一小时内无论是否进行了维修,如能正常发射出去,就算成功。这种成功的概率就是发射的可靠度。在发射后能够正常飞行,结构上不出故障,并且命中目标区的概率(例如99%)为飞行可靠度(狭义可靠度)。

(4) 时间

时间是一个重要的概念,根据国军标 GJB451 定义,时间的构成见图 1.2。

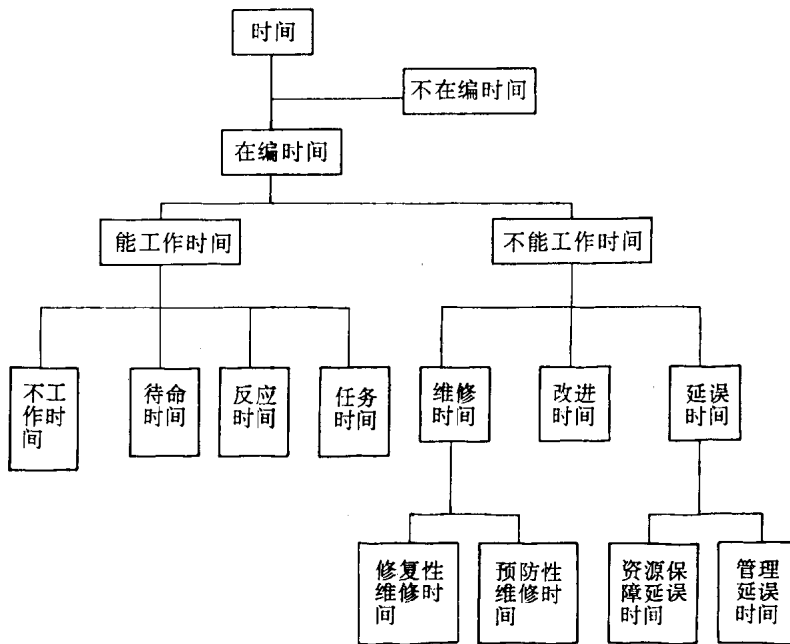


图 1.2 时间分解图

(5) 故障

故障是指在规定的条件下,产品丧失规定的功能的现象。一般对可维修产品使用“故障”。对不可修产品使用“失效”。有时两种说法混用。在可靠性工作中,故障必须有明确的定义,要定出丧失规定功能的标准,故障可分为以下 5 类。

① 间歇故障

间歇故障指产品在某时间呈现出故障状态,但能自然地恢复其功能,如此反复出现的故障。处于这种故障状态的系统,系统的元件并没有发生物理性损坏,这种故障可能是由于元件的稳定性不好,如其性能对温度、湿度、压力的稳定性差,或者由于元件之间连接不好如虚焊或不匹配引起,或者由于环境污染如受严重电磁干扰或器件表面沾污等原因引起,也可能由于逻辑设计的不完善而引起的,如果仔细观察这种故障往往是有规律性的。

② 独立故障

若一个元件发生故障,只是由于自身的原因所引起的,不是由于另一产品故障引起的故障,则这种故障称为独立故障。

③ 从属性故障

若一个元件由于其他部分失效的原因而引起的故障叫从属性故障。例如电子设备中电源电压过高或过低时也会导致其他元件发生从属故障,因此电源要设置过、欠电压保护电路。

④ 人为故障

人为故障可分为：

- 误用故障：未按规定使用条件运用设备而引起的故障。
- 事故故障：违反操作规程而引起的故障。
- 误判故障：由于对系统性能没有充分理解或所收集数据有错误，而错误地做出“有故障”的判定。

人为故障并不主要取决于产品所具有特性，因此在估计产品的可靠性时一般不考虑。然而，这并不是说和产品的的设计无关。如在硬件可靠性设计中设置操作顺序保证逻辑时，就可以减少某些由于人为操作错误造成的故障。

⑤ 灾害性故障

灾害性故障指自然和人为的灾难所造成的故障。

依据不同的研究目的。从各种不同侧面认识和分析故障的方法很多。如从研究维修工作效率出发，还有局部故障和整体故障、固定性和不固定性故障等。这里仅举了以上几个类型。

(6) 故障概率分布函数

故障概率分布函数用 $F(t)$ 表示，它是 t 时间内产品发生故障的可能性，即 $F(t) = P(T \leq t)$ ，其中， T 表示产品正常工作时间，设 $f(t)$ 为产品的故障分布密度函数，则

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1.3)$$

(7) 可靠度

可靠度是可靠性的概率度量，用 $R(t)$ 表示，它是产品在 t 时间内正常工作的概率，即

$$R(t) = P(T > t) \quad (1.4)$$

其中， T 表示产品正常工作时间， $R(t) = 1 - F(t)$ 。

(8) 失效率 $\lambda(t)$

失效率 $\lambda(t)$ 表示已工作到时刻 t 的产品，在时刻 t 后单位时间内发生失效的概率，可表示为

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} \quad (1.5)$$

其中， T 表示产品正常工作时间，由上式可得

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.6)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.7)$$

人们在各种产品的使用和试验中得到大量的数据，对它进行分析后发现一般产品（例如大部分电子产品）的失效率有像浴盆那样的曲线图形，因此称为浴盆曲线，如图 1.3。

这条曲线明显地分为三段，并对应着产品的三个时期。

① 早期失效期

早期失效出现在产品开始工作后的较早时期，其特点是失效率高，但随着时间的增加失效率迅速下降。这是由于设计和制造工艺上的缺陷导致产品失效，例如原材料有缺陷，