

普通高等教育航天类规划教材

可靠性工程基础

RELIABILITY ENGINEERING BASIS

中国航天工业总公司人事劳动教育局 组织编写

周正伐 编著

宇航出版社

PDG

普通高等教育航天类规划教材

可靠性工程基础

中国航天工业总公司人事劳动教育局组织编写

周正伐 编著

宇航出版社

内 容 简 介

本书为非可靠性专业的各工科研究生的入门教材。详细介绍了可靠性工程的基本原理与方法。重点论述硬件可靠性(包括维修性)设计、试验、评估的基本技术。内容包括:系统可靠性、可用性模型,可靠性设计,生产过程可靠性控制,可靠性、维修性试验,可靠性、维修性评估和可靠性管理。在论述中密切结合航天系统产品研制中的可靠性问题,书中给出了大量的例题与图表,帮助读者掌握如何正确运用可靠性工程的基本技法。

本书的读者对象为非可靠性专业的各工科研究生,航天系统产品研制的设计人员以及各类工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性工程基础/周正伐编著. -北京:宇航出版社,1999.8

ISBN 7-80144-273-3

I. 可… II. 周… III. 可靠性工程-研究生-教材 N. TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 26560 号

宇航出版社出版发行

北京市和平里滨河路1号(100013)

发行部地址:北京阜成路8号(100830)

北京市东光印刷厂印刷

新华书店经销

1999年8月第1版 1999年8月第1次印刷
开本:787×1092 1/16 印张:15.25 字数:380千字
印数:1—1000册 定价:27.00元

中国航天工业总公司教材编审委员会名单

主任 陈求发
副主任 阚力强 郑仙兴 郭瑞霞
委员 薛成位 黄培康 韩锡礼 阮崇智 童 铠 穆 虹
万 达 刘家琦 贾世楼 郭铁良 姚洪庆 谢伟良
薛来宾 魏志敏 乔晓明 刘建华 刘以良 刘 杭
秘书长 魏志敏(兼)
副秘书长 刘 杭(兼)

出版说明

按照国家教委关于高等教育教材工作分工原则,中国航天工业总公司负责组织全国高等教育航天类专业教材的规划、编审和出版。根据航天教育发展规划,为适应航天事业发展的需要和满足航天专业教学的要求,中国航天工业总公司教材编审委员会负责组织编审、出版“九五”期间航天专业教材,分成航天器、导弹、飞行力学、发动机、控制与制导、空间电子学六类。适应的专业范围为:飞行器系统工程、飞行器总体设计、飞行器结构与强度、飞行器动力工程、飞行器制造工程、飞行器控制与制导、飞行器发射技术与装置、飞行器环境与模拟工程、飞行力学、宇航光电工程、空间工程和卫星与卫星应用等。

编委会为航天专业教材制订的出版原则是:

1. 教材应保证思想性、科学性、先进性和启发性,注意理论联系实际。内容的深度与广度应有利于培养学生的自学能力、创造能力及解决实际问题的能力。

2. 技术专家长期从事航天科研工作,学校教师长期从事教学,他们各自都积累了丰富的经验。为使教材既有一定的理论水平,又能很好地联系实际,因此,要求教材的编审必须坚持技术专家与学校教师相结合的原则。

3. 这套教材除作为本科、研究生教材外,也可作为航天领域工程技术人员继续教育的教学参考书以及有关科技人员的参考书。

限于水平和经验,航天专业教材的编审出版工作肯定有不少缺点和不足之处,欢迎使用教材的单位、广大教师、同学和有关技术人员提出宝贵意见,以进一步提高航天类专业教材的质量。

中国航天工业总公司人事劳动教育局

1997年8月

前 言

随着科学技术的发展,产品可靠性问题越来越突出,特别是对于航天产品,可靠性问题更是至关重要,普及与推广可靠性工程技术已是势在必行,而可靠性工程是一门边缘性的现代学科,范围非常广泛,几乎涉及到机械、电子、机电等所有工程项目。这就意味着应用可靠性工程技术并非局限于少数的可靠性专业人员之中,还要求各类工程设计人员普遍地掌握可靠性工程理论与方法。在这种背景下,目前在各类工科研究生中将增设“可靠性工程”基础课程。本书正是为了适应这种需要而编撰的,它主要适用于非可靠性专业的各工科研究生,也可作为各类工程设计人员的参考书。

由于可靠性工程内容十分丰富,本书不可能揽括所有方面,例如以下几方面内容,本书未作介绍:

1)安全性工程。虽然安全性与可靠性存在某种内在联系,但安全性与可靠性毕竟是两个不同概念,它们分属于不同的独立学科,安全性工程超出了本书的范围。

2)软件可靠性,虽然它属于可靠性工程范畴,但是软件可靠性发展远滞后于硬件可靠性,且软件可靠性概念体系与硬件可靠性概念体系有所不同,目前已有软件可靠性专著诞生,本书不再赘述。

3)可靠性设计项目中的某些技术,如潜通路分析技术,在我国尚处于开发研究阶段,实际应用尚有距离,故本书未作介绍。

4)可靠性费用分析。它涉及到的因素很复杂,而且这些因素目前我国国情下多为不确定,因此费用分析技术实用性受到很大限制,本书将此略去。

本书仅就硬件可靠性(包括维修性)设计、试验、评估等较为成熟的基本技术加以介绍,因此定名为《可靠性工程基础》,希望它成为非可靠性专业的各工科研究生掌握可靠性工程基本原理与方法的入门教材,及各类工程设计人员应用可靠性工程基本技术的桥梁。

本书承著名可靠性专家何国伟教授认真审阅了原稿,在此谨致谢意。

欢迎读者对本书批评指正。

作者

1998年9月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 可靠性基本概念	1
1.2 可靠性定量指标	4
1.2.1 狭义可靠性指标	5
1.2.2 维修性指标	6
1.2.3 可用性指标	7
1.2.4 贮存期指标	8
1.3 可靠性工程简述	8
1.3.1 可靠性工程的基本环节	8
1.3.2 可靠性工程诸环节的关系.....	10
第 2 章 系统可靠性、可用性模型	11
2.1 不可修系统可靠性模型.....	11
2.1.1 系统可靠性框图.....	11
2.1.2 典型系统可靠性模型.....	12
2.1.3 一般系统可靠性模型.....	17
2.1.4 具有多功能单元的系统可靠性模型.....	26
2.2 可修系统可用性模型.....	27
2.2.1 系统可用性模型建立要素.....	27
2.2.2 马尔可夫过程基本概念.....	27
2.2.3 典型系统可用性模型.....	31
第 3 章 可靠性设计	48
3.1 可靠性指标论证与分配.....	48
3.1.1 可靠性指标论证.....	48
3.1.2 可靠性指标分配.....	50
3.1.3 维修性指标分配.....	55
3.2 预防性设计.....	58
3.2.1 可靠性预计.....	59
3.2.2 维修性预计.....	62
3.2.3 FMEA(FMECA)	63
3.2.4 FTA 法	66
3.3 基础性设计.....	82
3.3.1 原材料与元器件的选用.....	82
3.3.2 系统简化设计.....	82
3.3.3 耐环境设计.....	83
3.4 裕度设计.....	87

3.4.1	降额设计	87
3.4.2	裕度的概率设计	88
3.5	边缘性能设计	101
3.5.1	最坏情况分析法	101
3.5.2	矩法(概率法)	102
3.6	冗余设计	104
3.6.1	冗余设计的一般考虑	104
3.6.2	冗余设计方法	105
3.7	人机设计	109
3.7.1	信息显示设计	110
3.7.2	控制或操纵机构设计	112
3.7.3	操作环境条件设计	113
3.8	非工作状态下贮存期控制设计	114
3.8.1	贮存期与贮存可靠性	114
3.8.2	贮存可靠性设计	115
3.9	维修性设计	120
3.9.1	硬件维修性设计	120
3.9.2	基本维修策略	127
第4章	生产过程可靠性控制	135
4.1	设计符合性控制	135
4.2	工艺可靠性控制	135
4.3	筛选与老炼	136
4.3.1	筛选的一般方法	136
4.3.2	高效环境应力筛选	137
4.4	可靠性验收	138
4.4.1	可靠性验收的目的与特点	138
4.4.2	可靠性验收抽样方法	139
第5章	可靠性、维修性试验	141
5.1	可靠性试验	141
5.1.1	可靠性试验的意义与分类	141
5.1.2	可靠性增长试验	141
5.1.3	可靠性验证试验	160
5.2	维修性试验	178
5.2.1	维修性试验的意义、分类、特点	178
5.2.2	维修性验证抽样方案	179
第6章	可靠性、维修性评估	185
6.1	数据收集与处理	185
6.1.1	可靠性数据	185
6.1.2	维修性数据	186

6.2	可靠性评估	186
6.2.1	不变母体情形下单元产品可靠性评估	186
6.2.2	变动母体情形下单元产品可靠性评估	202
6.2.3	系统可靠性综合评估	208
6.2.4	性能可靠性评估	209
6.2.5	贮存期评估	213
6.3	维修性评估	220
6.3.1	平均修复时间评估	220
6.3.2	可用性评估	221
第7章	可靠性管理	223
7.1	可靠性管理概念及意义	223
7.2	可靠性管理的基本环节	223
7.2.1	可靠性保障体系	223
7.2.2	可靠性大纲	224
7.2.3	可靠性工作计划	225
7.2.4	元器体、原材料管理.....	226
7.2.5	可靠性设计评审	227
7.2.6	故障报告、分析纠正措施系统(FRACAS)	227
7.2.7	数据管理	228
7.2.8	技术状态管理	228
7.2.9	标准与规范管理	228
7.2.10	教育与培训管理.....	229
7.3	可靠性管理的实施方针	229
7.3.1	倍可靠、半维修.....	229
7.3.2	早期投入、预防为主.....	229
7.3.3	避免“两张皮”	229
7.3.4	计算总帐	229
参考文献	230

第1章 概 论

1.1 可靠性基本概念

论述产品的质量状况的指标有很多,例如导弹的射程、落点精度、威力等性能指标,它们从不同侧面反映了导弹的质量状况。此外还有另一类指标,即可靠性指标,它反映导弹保持其合格性能的能力。如果一枚导弹试射结果各项性能符合标准,那么能否保持多枚导弹发射结果各项性能都符合标准呢?这就需要提出可靠性指标来加以衡量。可见可靠性指标与性能指标都是同等重要的,如果仅有性能指标,而没有反映性能稳定性的可靠性指标,那么再好的性能也是没有实用意义的。

可靠性首先是从不可修系统中发展起来的。对于不可修系统,可靠性基本定义是:在规定条件下和规定时间内,完成规定任务的能力。

“规定条件”是指使用工作条件、环境条件等。如发动机工作时的振动应力条件、电子设备工作时的电应力条件就是使用工作条件;产品外部的的气候条件、力学条件等就是环境条件。使用工作条件、环境条件不同,可靠性也不相同。

“规定时间”是指产品执行任务时间。任务时间长短随产品对象不同与使用任务不同而各异,例如火箭的飞行要求在几分到几十分钟内可靠,而卫星则要求在几年到十几年内可靠。一般来说,时间越长,可靠性越低。

“规定任务”是指产品作什么用,即产品的用途,通常用产品应具有的使用性能来描述,例如运载火箭的规定任务是将有效载荷送到预定的轨道,也就是运载火箭应具有符合要求的运载能力和精度。规定任务不同,可靠性也不同,例如飞行器在飞行阶段与发射阶段内,各自规定任务不同,因而分为飞行可靠性与发射可靠性。由此可见,必须对产品规定任务给出明确定义,制定出故障判据,这种判据既包括结构故障,也包括性能故障。

“能力”是指可能性,但是衡量可能性大小仅靠定性描述是不够的,还必须有定量描述,通常用“概率”来度量这种可能性,因此产品可靠性基本定义也可表述为:在规定条件下和规定时间内,完成规定任务的概率。

为理解上面的定义,再对以下几点作深入讨论。

(1) 可靠性是一种概率

怎样理解可靠性?可以通过一个具体问题来讨论。例如,怎样理解“某产品可靠性为90%”?有人认为这个问题意味着“抽检100件产品,一定有90件合格品”。但是实际情况如何呢?实际上随机抽检100件产品,可能出现的结果有以下101种:

- 100件产品全为合格品
- 100件中有1件为次品
- 100件中有2件为次品
-
- 100件中有99件为次品
- 100件产品全为次品

如果说一定有 90 件合格品,就排除了其它 100 种可能,因此是错误的。正确理解应当是这个问题意味着“多次随机抽取 100 件产品,平均来看约有 90 件为合格品”。

由此讨论可见,在规定条件下和规定时间内,能否完成规定任务,具有不确定性,只有在大量试验或观测中,这种规定任务的完成能力才呈现稳定性,也就是说,这种能力具有统计学意义,它说明可靠性水平不是靠 1~2 次试验成功而能作出定论。

(2) 可靠性是衡量故障发生难易程度的尺度

不能完成规定任务即产品发生故障,但是故障是多种多样的,按照故障发生的性质可把故障分为两大类:

1) 必然故障。例如设计错误、材料选错、工艺不当、生产条件变坏等,将导致整批产品出现故障,这种故障具有必然性,发生概率较大,甚至接近于 100%。

2) 偶然性故障。在一定的设计、生产、管理水平下,由于许多随机因素的作用导致产品故障,但这种故障时而发生,时而不发生,即这种故障具有偶然性,可以用概率来衡量故障发生的可能性。

不同性质的故障发生难易程度不同,从而产品可靠性也不同,发生必然故障,可靠性很低,甚至近于零,即无可靠性可言。发生偶然故障越频繁,可靠性越低;反之,可靠性越高。

对于必然故障,应设法杜绝;对于偶然故障,应尽量使其发生的可能性控制到最低限度。

(3) 可靠性反映寿命裕度

设产品任务时间记作 t ; 产品从工作开始到故障为止的时间称做寿命,记作 T 。产品可靠性就是在 $[0, t]$ 内产品不出故障的概率,记作 $R(t)$, 即产品寿命超过任务时间的概率:

$$R(t) = P(T > t) \quad (1.1)$$

该式说明产品寿命超过任务时间越多,产品可靠性越高,因此可靠性反映了寿命裕度。

有一类产品,如应力-强度型产品,其可靠性定义为

$$R = P(X_S > X_L)$$

即强度 X_S 超过应力 X_L 的概率。这类产品似乎可靠性与时间无关。但是强度可能随时间而退化,应力也可能随时间而强化,直到强度低于应力,从而出现不可靠。如果无故障完成规定功能的任务时间越长,则认为可靠性越高,因此严格地说,应力-强度型产品可靠性也是随时间变化的,只不过这种变化效应十分缓慢而已,特别是对任务时间较短的产品,可以忽略其时间的效应。

(4) 任务可靠性与基本可靠性

按照对规定任务影响的不同可划分为任务可靠性与基本可靠性。

任务可靠性仅考虑对任务有致命影响的故障;而基本可靠性不但要考虑致命故障,还要考虑非致命故障。

任务可靠性模型包括既串联又并联的复杂系统;而基本可靠性模型则是一个全串联系统。有冗余的系统虽然提高了任务可靠性,但降低了基本可靠性,增加了维修和后勤保障费用,因此基本可靠性反映了用户的基本费用负担。值得指出的是,无论任务可靠性或基本可靠性,实质上只是完成规定任务中所定义的范围不同而已,都是衡量故障发生难易程度的尺度,虽然它们都有维修需求,但它们并不反映维修能力。

以上讨论的是不可修系统的可靠性定义,但是实际情况中还有另一类可修系统,当产品发生故障后,可通过维修使产品恢复和保持产品适用性,产品的维修能力用维修性来衡量。

维修性的基本定义是在规定条件下和规定时间内,完成对故障产品维修而恢复规定功能的概率。

规定条件是指维修场地、维修设施、维修工具、维修人员等维修条件。通常将这些维修条件划分为现场级、中间级和基地级三个维修级别。

规定时间是指对故障产品完成维修预定的时间。

设规定维修时间为 τ ，从维修开始到完成维修的时间为 ζ ，则维修性就是满足下式的概率

$$M(\tau) = P(\zeta < \tau) \quad (1.2)$$

由此式可见，实际维修时间越短，维修性越高。

在不可修系统中，由于没有维修，可靠就是可用，因此只提可靠性要求就足够了；而对于可修系统，由于含有维修因素，仅提可靠性指标就不够了，原不可修系统中的可靠性概念需要扩展，须采用含义更广泛的指标，这个指标就是可用性，有些资料把它称为广义可靠性，而将不可修系统中的可靠性特称为狭义可靠性，以示区别。

可用性的基本定义是：产品在规定条件下使用，于指定时刻处于正常工作状态的概率。据此定义可知：

1) 可用性只研究某时刻 t 产品处于正常状态的概率，而不考虑在 t 以前产品处于什么状态。这一点与可靠性不同，可靠性则表示产品在 t 以前都处于正常状态的概率。产品于指定时刻能否处于正常状态，是由产品本身的可靠性(即发生故障难易程度)和产品的维修性(即故障后修复能力)联合确定的。

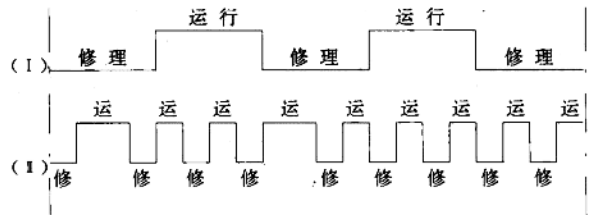


图1.1 可用性与可靠性比较

例如图 1.1 表示了两个可修系统，这两个系统的可靠性，可用性各不相同。

比较可见：对于可靠性，系统(I)大于系统(II)(因为系统(I)的故障数少于系统(II))；对于可用性，系统(II)大于系统(I)(因为系统(II)运行时间比例大于系统(I))。为什么系统(II)运行时间比例大？这是因为系统(II)故障后修复较快，停顿时间较短，通过修复使系统处于正常运行的时间比例增大。当然，如果系统(II)故障次数过于频繁，即可靠性甚差，虽然修复快，可用性也未必提高。可见，可用性是可靠性与维修性的综合尺度。

如果给定使用前的任务时间 t 与允许的维修时间 τ ，产品可靠性、维修性、可用性分别用 $R(t)$ 、 $M(\tau)$ 、 $A(t+\tau)$ 表示，则它们三者之间的关系为

$$A(t+\tau) = R(t) + (1 - R(t))M(\tau) \quad (1.3)$$

此关系式说明降低可靠性提高维修性，或提高可靠性降低维修性，都可使产品达到相同的可用性，但是一般后者比前者要经济。

2) 可用性是时间函数，因此如果要描述产品在任一随机时刻可供使用情况，采用瞬时可用性(也称点可用性) $A(t)$ 。

如果要描述产品在 $[t_1, t_2]$ 之内可供使用情况，采用平均可用性

$$\overline{A(t)} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt \quad (1.4)$$

如果要描述产品在长时间使用中可供使用情况，采用稳态可用性

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (1.5)$$

工程应用中普遍关心的是稳态可用性，它说明可用性随使用时间增加一般逐渐趋于某一

稳定值,即产品可靠性与维修性逐渐趋于稳定的相对关系。

如果产品经长期使用,能工作时间为 U ,不能工作时间为 D ,则稳态可用性可表示为

$$A = \frac{U}{U + D} \quad (1.6)$$

它表示大约有 A 的时间比例产品处于可用状态。

若不能工作时间 D 仅指故障后修复时间,而不考虑预防维护,后勤延误、行政管理延误等时间,则 A 为固有可用性。

对于导弹产品,在飞行期间是严格的不可修系统,可靠就是可用,无需提出可用性指标;但在飞行前则是处于非工作贮存状态下的可修系统,显然可用性是地面条件下的指标。此时若给定贮存时间为 t ,允许维修时间为 τ ,产品贮存可靠性、贮存期内维修性、贮存后可用性分别用 $R_q(t)$ 、 $M_q(\tau)$ 、 $A_q(t+\tau)$ 表示,则根据式(1.3)可知

$$A_q(t+\tau) = R_q(t) + (1 - R_q(t))M_q(\tau)$$

$A_q(t+\tau)$ 就是贮存终了时刻的可用性,如果贮存终了时刻即下达发射准备命令时刻,那么 $A_q(t+\tau)$ 反映了导弹“召之即来”的概率;如果 $t+\tau$ 的最末时刻为起飞时刻,那么 $A_q(t+\tau)$ 反映了导弹“召之即来,来之能战”的概率,又称可发射率。但应注意,可发射率不同于发射准备可靠性(简称发射可靠性),后者是从接到发射准备命令起到正常起飞止,这段时间内完成规定发射准备任务的概率,这是狭义可靠性尺度,不计维修因素,两者不可混淆。

1.2 可靠性定量指标

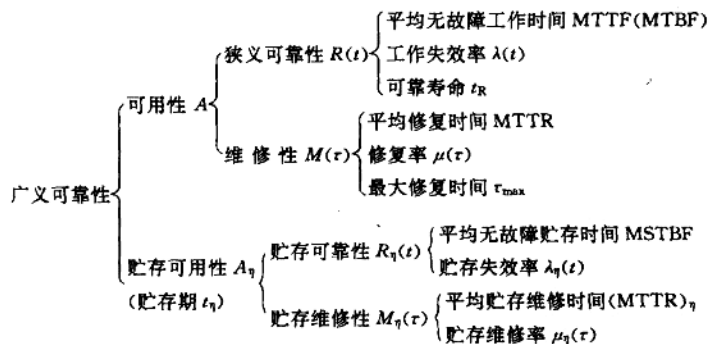
一般可修系统不但要求在使用时期具有高可靠性,同时还要求在使用以前能够保持很高的可用能力,这种可用能力取决于以下三个基本因素:

- 1) 发生故障的难易程度;
- 2) 故障后的修复能力;
- 3) 可用状态的维持能力。

上述的因素 1)、2) 综合起来就是系统可用性;如果进一步还要考虑系统可用能力的维持,则需将上述因素三者都结合起来,称为广义可靠性,用它来全面反映系统的使用效能。

一般可修系统可靠性(广义)定量指标体系列于表 1.1,并就表中各项指标分别讨论于后。

表 1.1 一般可修系统可靠性(广义)定量指标



1.2.1 狭义可靠性指标

狭义可靠性反映产品执行任务期间发生故障的难易程度,其中不考虑维修,它是决定系统可用能力的因素之一,因而是一大指标体系。

设产品总数为 N ,产品在任务时间 t 内失效数为 $r(t)$,则产品可靠性近似为

$$R(t) \approx \frac{N - r(t)}{N}$$

根据不同产品实际特点的不同需要,由狭义可靠性派生出其它的尺度量,常用的有以下几类。

(1) 平均寿命

平均寿命即平均无故障工作时间,它是产品寿命的期望值,设产品寿命为 T ,若已知可靠性函数 $R(t)$,则

$$E(T) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1.7)$$

例如

$$R(t) = e^{-\frac{t}{\theta}}$$

则

$$E(T) = \int_0^{\infty} e^{-\frac{t}{\theta}} dt = \theta = \begin{cases} \text{MTTF} & \text{不可修系统} \\ \text{MTBF} & \text{可修系统} \end{cases}$$

(2) 工作失效率

工作失效率是单位时间内现存产品故障变化率,它反映瞬时失效情况,记作 $\lambda(t)$,它与可靠性 $R(t)$ 的关系为

$$\lambda(t) = \frac{1}{R(t)} \left[-\frac{dR(t)}{dt} \right] \quad (1.8)$$

设 t 时刻失效数为 $r(t)$, $t + \Delta t$ 时刻失效数为 $r(t + \Delta t)$,产品总数为 N ,工作失效率近似为产品在 t 时刻后的一个单位时间内的失效数与时刻 t 尚在正常工作的产品数之比,即

$$\lambda(t) \approx \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{[N - r(t)] \Delta t} \quad (1.9)$$

失效率通常用 1/h 作为单位,对于失效率非常低的元器件,国际上惯用菲特(Fit)作为单位:

$$1 \text{ 菲特(Fit)} = 1 \times 10^{-9} / \text{h}$$

即 10 亿个元件 1 小时内只允许 1 个元件失效。

美国军标与我国军标将元器件失效率分成五个等级,如表 1.2 所示。

表 1.2 元器件失效率等级划分

失效率等级名称	亚五级	五级	六级	七级	宇航级
代 号	L	M	P	R	S
最大失效率(1/h)	$>10^{-5}$	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	$<10^{-7}$

一般失效率随时间而变化,大多数情况下 $\lambda(t)$ 曲线呈浴盆形状,如图 1.2 所示。

把此曲线划分为三段,左段为早期失效期,越是早期,失效率越高,随着时间推移,失效率

急剧下降。中段为偶然失效期,失效率基本为恒值,不随时间变化。右段是耗损失效期,随着产品使用日久逐渐耗损,失效率逐渐增加。应该尽量避免在早期失效期与耗损失效期使用产品,避免早期失效的办法是进行筛选和老化,避免耗损失效的办法是采取预防维修,及时更新。偶然失效期的长度称为产品使用寿命,偶然失效期内产品失效分布规律呈指数分布,即

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{\theta}}$$

$$\theta = \frac{1}{\lambda}$$

(3) 可靠寿命

可靠寿命就是满足下式

$$P(T > t_R) = R \quad (1.10)$$

的 t_R ,即对应于给定可靠性水平为 R 的寿命限。

当 $R=0.5$ 时, $t_{0.5}$ 称为中位寿命;当 $R=e^{-1} \approx 0.368$ 时, $t_{0.368}$ 称为特征寿命,对于指数分布,特征寿命就是平均寿命。

如果 $P(T > t_R)$ 已知,则由式(1.10)可解出 t_R 。

例如

$$P(T > t_R) = \exp\left[-\left(\frac{t_R}{\eta}\right)^m\right]$$

则由式(1.10)

$$\exp\left[-\left(\frac{t_R}{\eta}\right)^m\right] = R$$

$$t_R = \eta \left(\ln \frac{1}{R}\right)^{\frac{1}{m}}$$

式中 m 与 η 分别为寿命是威布尔分布的形状参数与特征寿命。

可靠寿命通常用来作为更新期。例如,轴承 95% 的可靠寿命为 1000h,若轴承实际工作已到 1000h,约有 5% 已失效,说明该更新了。

1.2.2 维修性指标

维修性指标是反映维修能力的尺度,通过维修提高了系统可用能力,可见维修性也是决定系统可用能力的因素之一,因而是另一大指标体系。

设维修开始时处于故障状态的产品总数为 K ,到时刻 τ 的修复数为 $S(\tau)$,维修性可近似表示为

$$M(\tau) \approx \frac{S(\tau)}{K} \quad (1.11)$$

由维修性派生出的其它维修性尺度量,常用的有:

(1) 平均修复时间

平均修复时间即修复时间的期望值。设修复时间为 ζ ,若已知维修性函数 $M(\tau)$,则

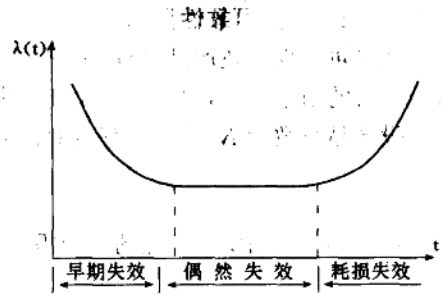


图1.2 失效率曲线

$$E(\xi) = \int_0^{\infty} [1 - M(\tau)] d\tau \quad (1.12)$$

例如

$$M(\tau) = 1 - e^{-\frac{\tau}{MTTR}}$$

则

$$E(\xi) = \int_0^{\infty} e^{-\frac{\tau}{MTTR}} d\tau = MTTR$$

(2) 修复率

修复率是单位时间内现存的待修产品修复变化率,它反映故障产品瞬时修复情况,记作 $\mu(\tau)$,它与维修性 $M(\tau)$ 的关系为

$$\mu(\tau) = \frac{1}{1 - M(\tau)} \frac{dM(\tau)}{d\tau} \quad (1.13)$$

例如

$$M(\tau) = 1 - e^{-\frac{\tau}{MTTR}}$$

则

$$\mu(\tau) = \frac{1}{e^{-\frac{\tau}{MTTR}}} (e^{-\frac{\tau}{MTTR}}) \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{MTTR} = \mu$$

即修复率不随 τ 而变化,保持恒值,意味着维修时间服从指数分布。

设 τ 时刻修复数为 $S(\tau)$, $(\tau + \Delta\tau)$ 时刻修复数为 $S(\tau + \Delta\tau)$,待修产品总数为 K ,则修复率可近似表示为产品在 τ 时刻后的一个单位时间内的修复数与时刻 τ 尚在进行维修的产品数之比,即

$$\mu(\tau) \approx \frac{S(\tau + \Delta\tau) - S(\tau)}{[K - S(\tau)]\Delta\tau} \quad (1.14)$$

由此可见 $\mu(\tau)$ 与 $\lambda(t)$ 在形式上相仿。

(3) 最大修复时间

最大修复时间是根据产品实际需要,对故障修复所需时间的最大限制,这种限制通常是相应于一定概率要求而言的,即预期完成全部维修工作的某个百分比所需时间。显然这里的概率要求就是规定的维修性,因此最大修复时间可以定义为满足下式

$$P(\xi < \tau_{\max}) = p$$

的 τ_{\max} ,通常 $p=0.9$ 或 0.95 ,即产品维修性达到规定要求所对应的修复时间

设修复时间 ξ 服从对数正态分布,则

$$\left. \begin{aligned} \ln \tau_{\max} &= \overline{\ln \tau_{ct}} + u_p \sigma_{\ln \tau_{ct}} \\ \tau_{\max} &= e^{\ln \tau_{\max}} \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

式中 $\overline{\ln \tau_{ct}}$ ——修复时间取对数后母体均值;

$\sigma_{\ln \tau_{ct}}$ ——修复时间取对数后母体标准差;

u_p ——标准正态分布的 p 分位数。

$$p=0.9, u_p=1.28; p=0.95, u_p=1.65$$

1.2.3 可用性指标

可用性指标是综合反映狭义可靠性与维修性的尺度量。

工程上最常用的是稳态可用性,当产品工作寿命与故障后修复时间均为指数分布时,稳态固有可用性为

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{1}{1 + \frac{MTTR}{MTBF}} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}} \quad (1.16)$$

式中, $\frac{MTTR}{MTBF} = \frac{\lambda}{\mu}$ 称为维修系数,此式反映了可用性、可靠性、维修性三者之间的关系。不同的 MTBF 和 MTTR 相配合,可以得到相同的可用性。例如,下述两种产品:

第一种, MTBF=100h, MTTR=10h

第二种, MTBF=10h, MTTR=1h

两种产品稳态可用性都是 0.99,但是该两种产品维修的频度是不一样的,第一种产品大约是 110h 修理 1 次,而第二种产品大约是 11h 修理 1 次。为了反映这种差别,以便准备足够的备件,采用修理频度这一尺度,如下式所示

$$W = \frac{1}{MTBF + MTTR} \quad (1.17)$$

1.2.4 贮存期指标

产品在使用前要保持很高的可用能力,取决于产品在贮存期限内非工作状态下的维护、保养。期望保持可用能力的时间越长越好,这个保持期就是产品的贮存期。

设产品贮存寿命为 η ,贮存期就是满足下式

$$P(\eta > t_1) = p \quad (1.18)$$

的 t_1 ,即对应于概率为 p 的贮存寿命限。

对于不可修系统, p 就是贮存可靠性,记作 $R_1(t)$, t_1 就是贮存可靠寿命,它反映产品在非工作状态下对于贮存环境的固有适应能力;对于可修系统, p 就是贮存后可用性,也记作 A_1 , t_1 就是贮存可用寿命,它综合反映不计维修的贮存可靠性 $R_1(t)$ 与贮存期间内维修性 $M_1(\tau)$ 。 t_1 在不可修系统与可修系统中含义有所不同,两者不可混淆。

与 1.2.1~1.2.2 节相仿,贮存状态下的可靠性指标体系见表 1.1

1.3 可靠性工程简述

所谓可靠性工程,它是以保证和提高产品可靠性,维修性为目标,在给定资源条件约束下,在全寿命周期过程中,最大限度地纠正与控制各种偶然故障并预防与根除各种必然故障的工程技术。由此可见,可靠性工程涉及产品设计、试制、试验、定型生产、贮存、使用直到寿命终止全过程。

1.3.1 可靠性工程的基本环节

(1) 可靠性设计

可靠性设计就是考虑可靠性的工程设计,不存在独立于工程设计之外的可靠性设计。详细来说,就是对产品的性能、可靠性、维修性、费用等各方面因素进行综合平衡,从而得到产品的最优设计。由此可见,可靠性设计和产品的设计、研制阶段相对应,产品经过设计和研制阶段后,产品固有可靠性与维修性就确定了,以后的各工程阶段使可靠性、维修性提高的因素就不多了。