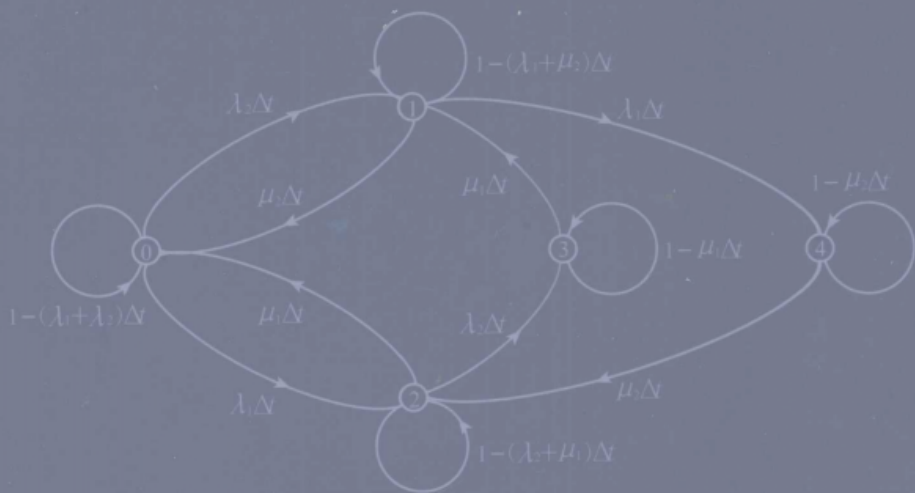




航天科技图书出版基金资助出版

# 可靠性工程基础

周正伐 编著



中国宇航出版社

本书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。

本书的读者对象为产品研制的设计人员以及各类工程技术人员。本书也可作为各类工科研究生的参考教材。

ISBN 978-7-80218-538-8



9 787802 185388 >

定价：68.00 元

航天科技图书出版基金资助出版

# 可靠性工程基础

周正伐 编著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

可靠性工程基础/周正伐编著. —2版. —北京:中国宇航出版社,  
2009.5

ISBN 978-7-80218-538-8

I. 可… II. 周… III. 可靠性工程 IV. TB114.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第058632号

责任编辑 刘亚静 责任校对 祝延萍 封面设计 03工舍

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路8号 邮编 100830  
(010)68768548

网址 www.caphbook.com / www.caphbook.com.cn

经销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)  
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑  
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京画中国印刷有限公司

版次 2009年5月第2版 2009年5月第2次印刷

规格 880×1230 开本 1/32

印张 12.25 字数 338千字

书号 ISBN 978-7-80218-538-8

定价 68.00元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

## 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掌握可靠性工程理论与方法，并在各类工程项目中正确、有效地应用可靠性工程技术，从而保证和提高产品可靠性水平。为了适应这样的背景需求，作者撰写了本书，期望它成为各类工程设计人员应用可靠性工程基本技术的桥梁，并为各类工科研究生提供参考教材。

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，软件可靠性正在形成一门独立分支，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，故本书未作介绍。

4) 可靠性费用分析。它涉及的因素很复杂，而且这些因素目前在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》。

本书承著名可靠性专家何国伟教授认真审阅原稿，中国航天标准化研究所角淑媛工程师、许皓工程师协助校对、整理本书书稿，在此谨致谢意。

欢迎读者对本书不妥之处给予批评指正。

作者

2009年1月

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 基本概念 .....	1
1.1.1 可靠性 .....	1
1.1.2 维修性 .....	4
1.1.3 可用性 .....	5
1.1.4 保障性 .....	8
1.1.5 安全性 .....	8
1.1.6 关于其他指标的讨论 .....	9
1.2 广义可靠性定量指标体系 .....	11
1.2.1 可靠性指标 .....	12
1.2.2 维修性指标 .....	15
1.2.3 可用性指标 .....	17
1.2.4 贮存寿命指标 .....	17
1.3 可靠性工程简述 .....	18
1.3.1 可靠性工程的基本环节 .....	18
1.3.2 可靠性工程诸环节的关系 .....	20
<b>第 2 章 系统可靠性、可用性模型</b> .....	21
2.1 不可修系统可靠性模型 .....	21
2.1.1 系统可靠性框图 .....	21
2.1.2 典型系统可靠性模型 .....	23
2.1.3 一般系统可靠性模型 .....	32
2.1.4 具有多功能单元的系统可靠性模型 .....	46

2.2 可修系统可用性模型 .....	48
2.2.1 系统可用性模型建立要素 .....	48
2.2.2 马尔可夫过程基本概念 .....	48
2.2.3 典型系统可用性模型 .....	53
<b>第3章 可靠性、维修性设计 .....</b>	<b>78</b>
3.1 可靠性指标论证与分配 .....	78
3.1.1 可靠性指标论证 .....	78
3.1.2 可靠性指标分配 .....	82
3.1.3 维修性指标分配 .....	89
3.2 预防性设计 .....	93
3.2.1 可靠性预计 .....	93
3.2.2 维修性预计 .....	100
3.2.3 FMEA (FMECA) .....	102
3.2.4 FTA .....	116
3.3 基础性设计 .....	140
3.3.1 原材料与元器件的选用 .....	140
3.3.2 系统简化设计 .....	141
3.3.3 耐环境设计 .....	142
3.4 裕度设计 .....	148
3.4.1 降额设计 .....	149
3.4.2 强度裕度的概率设计 .....	150
3.4.3 强度裕度概率设计方法的推广 .....	166
3.5 边缘性能设计 .....	171
3.5.1 最坏情况分析法 .....	172
3.5.2 矩法 (概率法) .....	174
3.6 冗余设计 .....	177
3.6.1 冗余设计的一般考虑 .....	177
3.6.2 冗余设计方法 .....	178



---

3.7 人机设计 .....	184
3.7.1 信息显示设计 .....	184
3.7.2 控制或操纵机构设计 .....	187
3.7.3 操作环境条件设计 .....	188
3.8 非工作状态下贮存期控制设计 .....	191
3.8.1 贮存期与贮存可靠性 .....	191
3.8.2 贮存可靠性设计 .....	193
3.9 维修性设计 .....	201
3.9.1 硬件维修性设计 .....	203
3.9.2 基本维修策略 .....	212
<b>第4章 生产过程可靠性控制 .....</b>	<b>225</b>
4.1 设计符合性控制 .....	225
4.2 工艺可靠性控制 .....	226
4.3 筛选与老炼 .....	227
4.3.1 筛选的一般方法 .....	227
4.3.2 环境应力筛选 .....	228
4.4 可靠性验收 .....	231
4.4.1 可靠性验收的目的与特点 .....	231
4.4.2 可靠性验收抽样方案 .....	231
<b>第5章 可靠性、维修性试验 .....</b>	<b>234</b>
5.1 可靠性试验 .....	234
5.1.1 可靠性试验的意义与分类 .....	234
5.1.2 可靠性增长试验 .....	235
5.1.3 可靠性验证试验 .....	264
5.1.4 关于非电子产品可靠性试验的讨论 .....	293
5.2 维修性试验 .....	295
5.2.1 维修性试验的意义、分类、特点 .....	295

---

5.2.2	维修性验证试验抽样方案 .....	296
<b>第6章</b>	<b>可靠性、维修性评估 .....</b>	<b>305</b>
6.1	数据收集与处理 .....	305
6.1.1	可靠性数据 .....	305
6.1.2	维修性数据 .....	307
6.2	可靠性评估 .....	308
6.2.1	不变母体情形下单元产品可靠性评估 .....	308
6.2.2	变动母体情形下单元产品可靠性评估 .....	330
6.2.3	系统可靠性综合评估 .....	338
6.2.4	性能可靠性评估 .....	346
6.2.5	贮存期评估 .....	352
6.3	维修性评估 .....	362
6.3.1	平均修复时间评估 .....	362
6.3.2	可用性评估 .....	363
<b>第7章</b>	<b>可靠性管理 .....</b>	<b>366</b>
7.1	可靠性管理概念及意义 .....	366
7.2	可靠性管理的基本环节 .....	367
7.2.1	可靠性保障体系 .....	367
7.2.2	可靠性大纲 .....	369
7.2.3	可靠性工作计划 .....	369
7.2.4	元器件、原材料管理 .....	370
7.2.5	可靠性设计评审 .....	371
7.2.6	故障报告、分析纠正措施系统 (FRACAS) .....	372
7.2.7	数据管理 .....	374
7.2.8	技术状态管理 .....	375
7.2.9	标准与规范管理 .....	376
7.2.10	教育与培训管理 .....	376

---

7.3 可靠性管理的实施方针 .....	377
7.3.1 倍可靠、半维修 .....	377
7.3.2 早期投入、预防为主 .....	377
7.3.3 避免“两张皮” .....	377
7.3.4 计算总账 .....	378
参考文献 .....	379

# 第 1 章 概 论

## 1.1 基本概念

任何产品，当需要使用时，用户总是希望它具有满意的使用效能。下面以满足产品使用效能这个总目标为出发点，展开介绍各种相关指标的基本概念。

### 1.1.1 可靠性

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；产品外部的氣候条件、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入预定轨道，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。由此定义可知：

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 件产品全部为次品

如是说一定有 90 件合格品，就排除了其他 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。产品容易出故障，可靠性低；反之，可靠性高。因此可靠性基本定义可以简洁表述为产品不出故障的概率。产品可靠性与产品故障紧密相关，保证产品不出故障就是保证了可靠性，保证产品可靠性的历史就是与各种故障作斗争的历史。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：

**必然故障。**例如设计错误、材料选错、工艺不当、生产条件破坏等，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%。

**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，应尽量将其发生的可能性控制到最低限度。

按照故障对产品任务的影响也可分致命故障和非致命故障。

所谓致命故障，就是导致产品任务失败的故障。当产品仅计入致命故障时，对应的产品可靠性就是任务可靠性。

所谓非致命故障，就是不会引起产品任务失败的其他所有故障。当产品既要计入致命故障，也要计入非致命故障时，对应的产品可靠性就是基本可靠性。

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。据此，有冗余的系统会降低基本可靠性，从而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，但任务可靠性则是反映产品使用效能的最基本因素，

产品具备满意的使用效能，这是用户与承制方期望的总目标，因此首要关注的应是任务可靠性。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。

### 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。由于寿命是随机变量，可长可短，因此由可靠性指标派生出另一常用的寿命指标为平均寿命 (MTBF)。某些产品，如电子产品，其可靠性对于时间效应反应敏感，从而惯用寿命指标。但是需要指出，产品的该两种指标具有确定的对应关系，没有必要将二者分割开来独立对待，否则将产生重复与矛盾。

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。这类产品的可靠性似乎与时间无关。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，可以忽略其时间效应。

## 1.1.2 维修性

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产品，称为可修系统，当产品发生故障后，可通过维修使产品恢复和保持产品可用性，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，基地级优于中间级，更优于现场级。

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  $\tau$ ，从维修开始到完成维修的时间为  $\zeta$ ，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，完成维修速度越快，维修性越高。因此维修性是对故障维修难易程度的度量。然而对故障维修作业的难度除了与维修人员的技能、检测及维修手段完善程度有关外，最根本的是取决于产品本身是否易检测、易诊断、易修理、易维护，即产品本身的维修性设计是否完善。

由于实际完成维修的时间是随机变量，可长可短，因此由维修性指标派生出另一常用指标为平均修复时间 (MTTR)。

维修时间包括故障诊断与定位时间、修理或更换时间、调校与检验时间。这些维修作业时间是评估产品维修性指标 (如 MTTR) 的基础数据，应予积累。

### 1.1.3 可用性

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。对此，本书特别指出：如无特别标注，本书中提到的可靠性，均指狭义可靠性。

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。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。

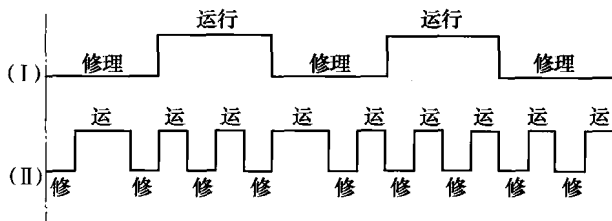


图 1-1 可用性与可靠性比较

如果给定任务时间  $t$  与允许的维修时间  $\tau$ ，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） $A(t)$ 。