可靠性工程师必备知识手册

主　编　任立明
副主编　何国伟　周海京

中国质检出版社
中国标准出版社
·北　京·

图书在版编目(CIP)数据

可靠性工程师必备知识手册/任立明主编；何国伟，周海京编. —2版. —北京：中国标准出版社，2013.9
ISBN 978-7-5066-7220-7

Ⅰ.①可… Ⅱ.①任…②何…③周… Ⅲ.①可靠性工程-手册 Ⅳ.①TB114.3-62

中国质检出版社
中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)
北京市西城区三里河北街16号(100045)
网址：www.spc.net.cn
总编室：(010)64275323 发行中心：(010)51780235
读者服务部：(010)68523946
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 26.75 字数 642 千字
2013年9月第二版 2013年9月第三次印刷

*

定价 69.00 元

前　言

可靠性作为产品的重要技术指标，是通过设计确立、生产保证、试验验证并在使用中显现出来的产品的一种固有质量属性。提高产品的可靠性，是提高产品质量、减少维修成本和研发费用的重要途径。因此，在产品研制过程中深入开展可靠性工程具有十分重要的意义。

随着产品市场竞争的加剧以及可靠性专业的发展，可靠性工程师岗位要求逐渐趋于专业化和全面化，很多单位、企业设立了产品保证部门或质量部门。为了规范可靠性工程师任职资格管理，国外于20世纪70年代就陆续建立了质量可靠性工程师的考核注册制度，我国有关部门也正在借鉴国外可靠性工程师注册的有关内容，积极开展可靠性工程师注册制度的研究实施工作。

本书系统、全面地介绍了可靠性工程师必备的各种可靠性技术，全书共分11章。

第1章主要介绍了有关产品、可靠性、维修性、测试性、保障性及可用性等可靠性的基本概念。

第2章主要从可靠性工程、可靠性项目管理、可靠性职责及安全性三个方面介绍可靠性管理相关内容。

第3章主要介绍了概率、统计的基本术语以及离散和连续概率分布、统计过程控制。

第4章主要介绍了包括统计推断、方差分析、回归分析和试验设计等四个可靠性相关的高等统计学方法，并详细介绍了如何基于样本的信息得出总体特征量的有关结论；方差分析的数学基础及工程示例；一元、多元回归方法及拟合优度评价；利用试验设计提高试验效率，优化试验结果的各种方法。

第5章主要介绍了可靠性的设计和开发，分别就“可靠性设计技术”及“零件和系统管理”这两方面进行了详细的介绍。从可靠性设计的重要性、需求、各项分析技术、人的因素、零件的选择和控制等多个方面进行阐述。

第6章主要包括可靠性模型和可靠性预计两个部分，分别对可靠性数据来源、可靠性模型以及电子产品可靠性预计的两种常用方法进行了介绍，并引用了

大量的例子对可靠性模型和可靠性预计进行了详细的说明。

第7章主要介绍了加速寿命试验、步进应力加速试验、可靠性增长试验、可靠性验收试验、应力筛选、性能试验、退化试验等。

第8章主要从计划、维修战略、维修性分配和维修性可用性权衡四个方面说明了维修性和可用性的战略管理；从维修时间分布、预防性和修复性维修分析、测试性和零部件更换的优化五个方面阐述了维修性和可用性分析。

第9章主要介绍了数据收集、数据运用。从数据类型、数据来源和具体的数据收集方法三个方面阐述了数据收集；从数据的整理与管理两个方面说明了可靠性数据的运用。

第10章主要介绍了FMEA/FMECA、FTA、FRACAS三项技术。结合工程实例，全面阐述“三F”技术的基本理论与实施流程及实施过程中的关键环节，并引入根源分析(RCA)内容，完善了FMCECA的闭环系统。

第11章主要介绍了软件测试、软件维护等软件可靠性的相关内容。

在本书的编写过程中，参考和引用了国内外一些典型案例、文献资料和应用成果，各章节加入了大量的可靠性工程应用案例及试验数据，通过生动详实的工程案例提高了全书的可读性。这也是本书区别于其他可靠性专业书籍的独特之处。

本书由任立明担任主编，何国伟、周海京担任副主编。中国航天标准化研究所可靠性与安全性研究部、信息标准化研究部软件安全性验证实验室的许多同志参与了本书的编写、绘图、制表、文字和图表的编辑、电子文档的录入等工作。各章节具体分工如下：第1章角淑媛；第2章第1节杨静，第2～3节沈岭、刘春雷、郑恒、王喜奎、韩天龙；第3章刘金燕、刘春雷、李福秋；第4章朱炜；第5章第1节胡红叶、许皓、刘蕴慧，第2节刘蕴慧、刘慧林；第6章第1节杜刚，第2节李福秋；第7章石士进、张云中、胡红叶；第8章王栩；第9章和第10章赵婉；第11章周新蕾；附录及中英文对照部分角淑媛，角淑媛还负责全书统稿及全文的校对工作。

在本书编写过程中也得到了中国航天标准化研究所所长卿寿松研究员、副所长顾长鸿研究员及邵德生研究员等专家的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

限于时间仓促，水平有限，本书的疏漏和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编　者

目　录

第1章 可靠性的基本概念

1.1 有关产品的基本概念

1.1.1 “活动”与“过程”及其相关术语

为了某项目的而进行的单项具体工作叫“活动”(Activity)。一项活动是定义好的工作模块。例如,把一种材料用机械加工成一个零件是一个活动;将一批电子元器件进行高低温测试是一个活动;进行电源的结构设计是一个活动;采购一批某种规格型号钢材是一个活动。

活动需要“资源”(Resources)。资源包括人员、设施(Facilities)、设备(Equipment)、技术、方法和资金。为进行某项活动或过程所规定的途径叫“程序”(Procedure)。这里的途径(Way)包括由什么样水平的人员,按什么样的先后次序,用什么样的设施或设备,按照什么技术规定操作来进行及完成某项活动。在许多情况下,程序要形成文件,成文件的程序叫“书面程序”或“文件化程序”。“活动”的书面程序通常包括:活动的目的、范围,做什么,由谁来做,何时、何地及如何做,要用什么材料、设备,按照哪些文件做,如何予以控制及记录。

一组将输入转化为输出的有关联或相互作用的资源和活动叫“过程”(Process)。这里的输入输出是广义的。将原材料加工成零部件组成一个机械产品是一个过程,这里的输入是原材料,输出是一个机械产品。将质量信息收集、汇总、分析得出一份质量趋势动向的报告也是一个过程,这里的输入是质量信息,输出是报告。

活动或过程的结果叫“产品”(Product,Item)。产品是一个非限定性的术语,用来泛指元器件、零部件、组件、设备、分系统或系统。可以指硬件、软件或两者的结合。一个过程的输入通常是其他过程的输出。

“组织”(Organization)是职责、权限和相互关系得到安排的一组人员及设施。这里的安排通常是有序的。

具备自身职能和独立经营管理的公司、社团、商行、企事业或公共机构,或其一部分,不论是否是股份制,也不论是公营的或私营的,都是组织。公司是一个组织,工厂也是一个组织。某组织为行使其职能按某种格局而安排的职责、权限及其相互关系叫“组织结构”(Organization Structure),“组织结构是否适当”与这个组织发挥的能力密切相关。例如:科学管理之父美国人泰勒(Taylor)在工厂中建立了由专职检验人员为主组成的检验机构,实行对产品的检验,就是一个重大的组织结构改革,真正的工厂体制改革。

向顾客提供产品的组织或个人叫“供方”(Supplier)。在合同环境下,供方可叫“承包方”(Contractor)。供方可以是诸如生产厂、销售商、进口商、装配厂或服务组织。“供方”可以是组织外部的,也可能是内部的。向某工厂订购一批某种产品,该工厂为供方;在该工厂内部,上一道工序是下一道工序的供方;有时,供方也叫做一笔买卖的“第一方”。

供方提供的产品的接受者叫“顾客”(Customer)。在合同环境下,顾客可以叫“需方”(Purchaser)。顾客可以是诸如:最终消费者、使用者(用户)(User)、相关方或需方等。顾客

可能是组织内部的，也可能是外部的。如在工厂内部，下一道工序就是上一道工序的顾客。

“相关方”(Interested Party)是与组织的业绩成就有利益关系的个人或团体。例如：组织的顾客、所有者、员工、供方、合作伙伴或社会等。

可以单独描述和考虑的事物叫“实体”(Entity)。实体可以是某项活动和过程，某个产品，某个组织、体系或人，或它们的任何组合。“特性”(Characteristic)是帮助识别和区分各类实体的一种属性，这种属性包括物理、化学、外观功能或其他可识别的性质。后面要讲到的质量特性是一种重要特性。

1.1.2　产品

产品(Product)是过程的结果，包括下述四种或其组合：

(1) “硬件”(Hardware)。是有形的、不连续的、具有特定形状的产品，通常由制造的、建造的或装配的零件、部件或(和)组件组成。如飞机、电视机、桌子、电灯泡等。

硬件产品可以分为如下等级：

(a) “零件”(Part)。这是由一件、两件或更多件结合在一起构成的东西。其特点是：除非出于特殊使用要求需要拆开外，一般是不拆散使用的。例如：电子管、螺钉、齿轮、云母电容器、铣刀等。

(b) “部件”(Subassembly)。这是由两个或两个以上的零件组成的，它构成一个组件或一个单元的一部分。其特点是可以整体更换，也可以分别更换其中的一个或几个零件。例如：电话拨号盘、中频放大器、挖土机的铲斗臂等。

(c) “组件”(Assembly)。它是由若干零件或部件结合在一起构成的一个整体，它能完成一种特定的功能，并能予以拆装。例如：风扇、音频放大器等。

(d) “单元”(Unit)。它是由组件或零件、部件及组件结合装配在一起构成的。其特点是：一般在不同的环境里能够独立工作。例如：液压千斤顶、马达、内燃机、发电机、无线电接收机、电源等(在某些外文资料中，Unit 与 Component 有时是同义的)。一个东西叫不叫单元，有时要视具体情况而定。例如一个钟的马达，一般是不会被拆开的，所以应算为一个零件，而不算单元。

(e) “机组”(Group)。它是一些单元、组件或部件的结合体。它可以是一个装置的一部分，也可以附加到装置上或与装置联合使用，用来扩大装置的功能范围，但它不能实现一个完整的功能。例如：一个天线组。

(f) “装置”(Set)。它是由一个或几个单元，有时还加上为了实现某项工作功能需要把它们联接在一起的或联合使用的组件、部件及零件构成的。例如：无线电导航装置；包括电缆、话筒、测试仪器等在内的无线电接收机的全部等。在某些外文资料中，有时 set 表示有类似功能特性的产品集合，例如：一套工具、一套冲模等。

(g) “系统”(System)。是指为执行一项功能所需的硬件、软件、器材、设施、人员、资料和服务等的有机组合，或者为执行一项使用功能或为满足某一要求，按功能配置的两个或两个以上相互关联单元的组合。一个完整的系统应包括在规定的工作环境下，使系统的工作和保障可以达到自给所需的一切设备、有关的设施、器材、软件、服务和人员。例如：远程预警系统。

〔注〕：装备系统是装备及其保障系统的有机组合。

(h) “分系统”(Subsystem)。是在系统内为执行某一使用功能的一组部件、组件或设备

的组合。如电源分系统、姿态控制分系统、动力分系统等。

“附件”亦是一种产品，它用来连接或补充一个组件、单元或装置，增加它们的作用，但并不改变这种组件、单元或装置的基本功能。例如：备用电源。

(2) “流程型材料”(Processed Materials)。即由固体、气体、液体或由它们的组合所组成，经转换形成的产品(最终产品或中间产品)，包括：粒状、块状、丝状或片状结构的材料。流程性材料通常由管道、筒、袋、罐等容器或以卷的形式交付，如化工原料等。

(3) “软件”(Software)。是由书面的或可记录的信息、概念、文件或程序组成的产品。它是由媒体支持表示的信息组成的一种智力创作。例如与数据处理系统有关的程序、规程和其他有关文件的智能产品，不限于计算机程序及其有关文档。注意：这里所指的软件独立于记录它所用的媒介，这些媒介通常指记录软件的软盘、硬盘、光盘、磁带及程序文件。

(4) “服务”(Services)。是为了满足顾客需要，在供方和顾客接触之间的行动和供方内部活动所产生的结果。在接触时，供方或顾客可以由人员或设备来代表。例如：街上设置了自动取款机，供方就由取款机这一设备来代表。服务可以与有形产品的制造和提供结合在一起。例如：餐饮业的服务。

为提供服务，供方必需开展的活动叫“服务提供”(Service Delivery)，这里的活动包括人员与设备在内。

产品可以是有形的(如组件或流程性材料)或无形的(如知识或概念)，或它们的组合；产品可以是有意生产的(如提供给顾客的)或无意生产的(如污染或有害的影响)。

1.2 质量、可信性

1.2.1 质量

在上节中定义的实体是一个很广的概念。实体可以是某个产品，如一台彩电、一块集成电路；也可以是某项活动或过程，如一个软件的开发、一项事故的调查；也可以是某个组织、体系或人，如一个工厂、企业的经理或它们的任何组合。

明示的、通常隐含的或必须履行的需求或期望叫“要求”(Requirement)(可由不同的相关方提出)。“通常隐含”指组织、顾客和其他相关方的惯例或一般做法，所考虑的需求或期望是不言而喻的。

反映实体的一组固有特性满足要求的程度叫“质量”(Quality)。从这质量定义来看，“质量”含义是很广泛的。例如企业经理是一个实体，他的质量反映满足规定的和潜在的经理所需要的能力，诸如开拓性、业务熟练程度、领导才能等。

在合同环境或法规环境下，“要求”是给定的。例如：污染控制是环境统一规定的。在其他环境下，“潜在要求”应予研究，加以标识与确定。如一般顾客对家用电器提不出明确的电气安全要求，但这是潜在要求。例如：彩色电视机的显像管如果爆炸，不应引起爆破碎片伤人。

顾客对要求的表达。有时叫它们为“要求质量”(Required Quality)。要求可以包括很多特性，如：性能(Performance)、易用性(Usability)、可信性(Dependability)、安全性(Safety)、环境(Environment)、经济性(Economics)及美学(Aesthetics)等。其中“易用性”是便于顾客使用的能力。例如俗称“傻瓜”式的相机，便于摄影技术不高的顾客使用，不需要调整光圈距离；

近来发展的模块积木式个人微机，便于个人自己维修等。“安全性”是不发生事故的能力，是把伤害(对人)或损坏的风险限制在可接受水平之内的一种状态，它是质量的一个重要方面，与可靠性密切相关。

1.2.2 可信性

长期保持满足规定要求的能力叫“可信性”。产品的可信性是一个重要特性，表示可长期保持产品满足要求的能力。

具体说，“产品的可信性”是一集合性术语，包括可用性及其影响因素：可靠性、维修性、维修保障性。可信性的定性、定量具体要求通过可用性、可靠性、维修性、维修保障性的定性、定量要求表达。“可用性”(Availability)是产品在任一时刻需要和开始执行任务时，处于可工作和可使用状态的程度。可用性的概率度量称可用度，用通俗的话来说就是“要用时就可用”。

可信性是许多产品的最重要的质量特性之一。

描述产品或服务必须符合的质量要求的文件叫“质量规范”(Quality Specification)。在质量规范中，可信性要求是必要的组成部分，可信性的具体要求通过可用性、可靠性、维修性、维修保障性的具体要求来表达。产品满足规定的要求叫“合格”(Conformity)；不满足规定的要求叫“不合格”(Nonconformity)。不满足规定的可信性要求的产品当然是不合格品。检测(Checkout)是指为确定产品的状态所进行的试验或观测。对实体通过观察与判断，适当时结合测量、试验所进行的符合性评价，亦即对实体的一种或多种特性进行诸如测量、检查、试验、度量并将其结果与规定要求进行比较，以确定各项特性是否合格的活动叫“检验”(Inspection)。可信性检验是产品质量检验的重要组成部分。

安全性是产品所具有的不导致人员伤亡、系统毁坏、重大财产损失或不危及人员健康和环境的能力。安全性是一种有特殊要求的可靠性。因此，可信性这个集合性术语通常包括：可靠性(R)、维修性(M)、维修保障性(S)，有时还加上安全性(S)，简写为可信性(R. M. S. (S))，最后一个(S)指安全性。

1.3 可靠性、故障与失效

1.3.1 可靠性及其相关术语

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叫产品的“可靠性”(Reliability)。可靠性的概率度量亦称“可靠度”。上述定义中的“规定的条件”中包括“环境条件”(Environmental Conditions)，环境是指所有外部和内部条件的集合(比如温度、湿度、辐射、电磁场、冲击、振动等)，无论是自然的、人工的或本身引起的，只要是影响产品的形成、放置或功能的因素均属环境条件。任务剖面(Mission Profile)是指产品在完成规定任务这段时间内所经历的事件和环境的时序描述。环境条件影响产品的形态、性能、可靠性或生存力。由于产品的可靠性与环境条件密切相关，因此在提出产品研制任务时，必须确切地、完整地描述产品可能经受的环境条件。

〔注〕：这里的环境条件指产品的环境条件，是狭义的。广义的是组织的环境条件，范围宽得多，包括组织的市场环境(特别是竞争环境、社会环境等)。

产品是为了完成某些任务而研制、生产的。一般情况下，对硬件而言，外界的机械振动和冲击、内部的温升及外部的环境温度(包括温度变化率)是关键性的环境条件。对软件而

言，人们往往只考虑“软件对正确的输入应有怎样的正确输出”，但软件本身如果不明确“对可能的不正确输入（干扰）应如何做出正确反应”，则在干扰作用下，软件就不能正常工作。例如：信息是通过编码输入的，信息传输有一定的错码概率；又如：一个网络系统由若干台计算机联网，它们的时钟不一定完全一致，各自的时钟可能有差别；再如：宇宙空间工作的计算机，其贮存的信息可能因空间的宇宙粒子轰击而使 0-1 产生反转等，俗称“不期望事件”（Undesired Event）。但这类不期望事件是可能出现的。软件的任务书（即需求）应全面地描述可能出现的这类异常事件及正确反应办法。软件的可能输入（一般是一个很高维的向量，向量的每一个维可能还是一个过程）是输入空间 S 的一个点。S 的任一点集合有一个出现概率。因此在 S 上定义一个概率密度函数 $f(p)$。$\{S, f(p)\}$ 就是“软件的任务剖面”，也叫“情景”（Scene）。

产品从交付到寿命终结或退出使用这段时间内所经历的全部事件和环境的时序描述叫“寿命剖面”（Life Profile），它包括一个或几个任务剖面。

产品的研制任务书必须包括全面的、完整的剖面，特别对软件的任务剖面（情景）要引起重视。

产品不能执行规定功能的状态叫“故障”（Fault）。失效（Failure）是指产品丧失完成规定功能的能力的事件。

〔注〕：实际应用中，特别是对硬件产品而言，故障与失效很难区分，故一般统称故障。

相对于给定的规定功能，“故障模式”（Fault Mode）是指故障的表现形式，如短路、开路、断裂、过度耗损。一个产品可能有多种故障模式，例如电阻器可能有开路、短路等多种故障模式。

1.3.2 可靠性参数

描述产品可靠性的量叫“可靠性参数”（Reliability Parameter）。

产品的“寿命”（Life）指产品使用的持续期，“寿命单位”（Life Unit）是指对产品使用持续期的度量单位。如工作小时、年、公里、次数等。

“使用寿命”（Useful Life）是指产品从制造完成到出现不能修复的故障或不能接受的故障率时的寿命单位数。另外，也指产品故障率增大到耗损期之前的时期。

“储存寿命”（Storage Life）是指产品在规定的存储条件下能够满足规定要求的存储期限。

“储存可靠性”（贮存可靠性）（Storage Reliability）是指在规定的储存条件下和规定的储存时间内，产品保持规定功能的能力。也称贮存可靠性。

“平均故障前时间”（MTTF，Mean Time To Failure）是指不可修复产品的一种基本可靠性参数。其度量方法为：在规定的条件下和规定的期间内，产品寿命单位总数与故障总数之比。

“平均故障间隔时间”（MTBF，Mean Time Between Failures）是指可修复产品的一种基本可靠性参数。其度量方法为：在规定的条件下和规定的期间内，产品寿命单位总数与故障产品总数之比。

产品的寿命 T 是一个随机变量。寿命 T 超过指定时间 t 的概率 $P(T>t)$ 叫产品的“可靠性函数”。记为 $R(t)$，即

$$R(t)=P(T>t), 0\leqslant t<\infty \tag{1.3-1}$$

设产品的批量为 M。在 $t=0$ 的时刻投入工作，到时刻 t 为止，有 N 个产品失效，N 是 t

的函数，记为 $N(t)$，表示时间区间$(0,t]$内的失效数。

T 的概率分布函数即$(0,t]$内的失效概率，为

$$F(t)=P(T\leqslant t)=1-R(t) \tag{1.3-2}$$

设 T 的概率密度函数为 $f(t)$。则 $F(t)=\int_0^t f(t)\mathrm{d}t$，故失效数的期望(或平均失效数)

$$E[N(t)]=F(t) \tag{1.3-3}$$

故障率(Failure Rate)是指产品可靠性的一种基本参数。其度量方法为：在规定的条件下和规定的期间内，产品的故障总数与寿命单位总数之比。有时亦称失效率。其数学理论推导如下：

产品的“瞬时失效密度”(Instantaneous Failure Intensity)$Z(t)$是产品在时间区间$(t,t+\Delta t)$内的平均失效数与区间长度 Δt 之比，当 Δt 趋于 0 时的极限(如果存在)，即

$$Z(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{E[N(t+\Delta t)-N(t)]}{\Delta t}=f(t) \tag{1.3-4}$$

这里的 $E[\ ]$是期望符号，故 $Z(t)$即寿命 T 的概率密度函数。

设 T 是指数分布的随机变量，这时其概率密度函数为

$$f(t)=\lambda \mathrm{e}^{-\lambda t},t\geqslant 0 \tag{1.3-5}$$

则

$$Z(t)=\lambda \mathrm{e}^{-\lambda t},t\geqslant 0 \tag{1.3-6}$$

规定时间区间(t_1,t_2)内的瞬时失效密度的均值，即

$$\overline{Z}(t_1,t_2)=\frac{1}{t_2-t_1}\int_{t_1}^{t_2}Z(t)\mathrm{d}t \tag{1.3-7}$$

叫“平均失效密度”$\overline{Z}(t_1,t_2)$(Mean Failure Intensity)。

设产品在时刻 t 处于可用状态，在时间区间$(t,t+\Delta t)$内出现失效的条件概率与区间长度 Δt 之比，当 Δt 趋于 0 时的极限(如果存在)，为

$$\lambda(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{P(t<T<t+\Delta t\mid T>t)}{\Delta t} \tag{1.3-8}$$

$\lambda(t)$叫“瞬时失效率”(Instantaneous Failure Rate)，简称“故障率”或“失效率”，T 为“失效前时间”或“首次失效前时间”。

产品在时刻 t 处于可用状态。即$(0,t]$内未失效，其概率为 $R(t)$；在时间区间$(t,t+\Delta t)$内出现失效的概率为 $R(t)-R(t+\Delta t)=-R'(t)\Delta t$，故条件概率

$$P(t<T<t+\Delta t\mid T>t)=-R'(t)\Delta t/R(t) \tag{1.3-9}$$

由此得

$$\lambda(t)=-R'(t)/R(t) \tag{1.3-10}$$

很多电子产品及机电产品的寿命 T 是指数分布。一个由较多部分组成的产品，不论组成部分的寿命是什么分布，只要出故障就修复，则一定时间后，其寿命亦是渐近于指数分布。此时，

$$R(t)=\mathrm{e}^{-\lambda t} \tag{1.3-11}$$

代入 $\lambda(t)$公式，得

$$\lambda(t)=-\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\mathrm{e}^{-\lambda t}\right)\Big/\mathrm{e}^{-\lambda t}=\lambda \tag{1.3-12}$$

即指数寿命产品的失效率为常数 λ。

此时寿命的均值即平均寿命 θ 为

$$\theta = E(T) = \int_0^\infty tf(t)\mathrm{d}t = \int_0^\infty t \cdot \lambda \mathrm{e}^{-\lambda t}\mathrm{d}t = 1/\lambda \tag{1.3-13}$$

亦即平均寿命正好是失效率的倒数。但对非指数寿命的产品而言，此倒数关系一般不成立。

“基本可靠性”(Basic Reliability)是指产品在规定的条件下，规定的时间内，无故障工作的能力。基本可靠性反映产品对维修资源的要求。确定基本可靠性值时，应统计产品的所有寿命单位和所有的关联故障。

“固有可靠性”(Inherent Reliability)是指设计和制造赋予产品的，并在理想的使用和保障条件下所具有的可靠性。

“使用可靠性”(Operational Reliability)是指产品在实际的环境中使用时所呈现的可靠性，它反映产品设计、制造、使用、维修、环境等因素的综合影响。

1.3.3 失效率曲线

在电子元器件的生产过程中，总免不了有一部分元器件存在一些缺陷。这些有缺陷的元器件投入使用后较快失效。在产品寿命的早期，可能存在一段时间，在这期间的 $\lambda(t)$ 明显高于随后的期间，这叫产品的“早期失效期”(Early Failure Period)。在早期失效期内 $\lambda(t)$ 较快下降。到一定时间后，$\lambda(t)$ 有一段时间基本上不变。在产品寿命周期中，可能存在的失效率近似恒定的期间叫“恒定失效率期”(Constant Failure Rate Period)，也叫“偶然故障期”。

退化(Degradation)是指产品逐渐丧失完成其功能或能力的过程。耗损(Wear Out)是指故障率的增加或故障概率随寿命单位数的增加而增加的过程。有的产品由于老化、磨损、疲劳等原因，在一定时期后，其失效率随寿命单位数的增加而迅速增加。在产品的寿命周期中，可能存在一段时间，在这期间的失效率明显高于先前时期，这叫“耗损失效期”(Wear-out Failure Period)。$\lambda(t)$ 的典型图形如图 1.3-1 所示，形如浴盆，所以亦叫“浴盆曲线”(Bath-tub Curve)。

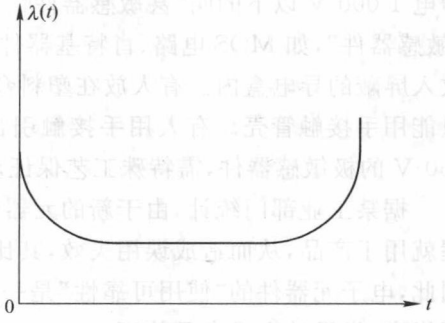

图 1.3-1 浴盆曲线

当产品进入耗损失效期时，到某一时刻 T_w 后，其失效率大于要求的 λ_w。产品应及时更新。T_w 即产品的使用寿命。偶然故障率及使用寿命是产品可靠性的两个重要参数。

耐久性(Durability)是指产品在规定的使用、储存与维修条件下，达到极限状态之前，完成规定功能的能力，一般用寿命度量。极限状态是指由于耗损(如疲劳、磨损、腐蚀、变质等)使产品从技术上或从经济上考虑，都不宜再继续使用而必须大修或报废的状态。

系统、设备进行科学合理的维修(包括及时检测及更新等)，可以延长系统、设备的耐久性。

带有早期失效的元器件如果装上设备、系统，就会很快失效，大大降低设备、系统的可靠性。

“筛选”(Screening)是指一种通过检验剔除不合格或有可能早期失效的产品的方法。检验包括在规定环境条件下的目视检查、实体尺寸测量和功能测量等。为剔除或检出有缺陷

的或早期失效的产品而进行的试验或一组试验叫“筛选试验”(Screening Test)。筛选的检验包括在规定环境条件下的目视检查、实体尺寸测量和功能测量等。某些功能测量是在强应力下进行的。

“老练”(Burn In)是指产品在规定的应力条件下,使其特性达到稳定的方法;是产品置于功能运行的一种筛选试验。

不同的要求使用条件对电子元器件有不同的筛选要求,但有一条通用的准则:“电子元器件未经筛选不得装上设备、系统”。

1.3.4　有关失效的若干概念

故障机理(Failure Mechanism)是指引起故障的物理的、化学的、生物的或其他的过程,也叫“失效机理”(Failure Mechanism)。例如:某导弹一级发动机点火后立即熄火的失效机理是继电器内有多余物;某电阻开路的失效机理是安装连接时未按工艺标准进行,引线根部弯曲过大造成伤害以致断开;等等。

故障模式对产品的使用、功能或状态所导致的结果叫“故障影响”(Failure Effect)。例如上述导弹一级发动机点火后立即熄火的故障影响为导弹飞行试验失败。

产品在规定的条件下使用,由于产品本身固有的弱点而引起的失效叫“本质失效”(Inherent Failure,Weakness Failure)。例如正常的双极型晶体管在规定条件下使用,有一定的失效率,其中开路约占 42%,短路约占 38%,增益等性能的退化约占 20%。

不按规定条件使用产品(例如使用中施加的应力超出产品允许范围)而引起的失效叫“误用失效”(Misuse Failure)。例如:半导体器件的抗静电能力用静电放电敏感度表示。耐静电 1 000 V 以下的叫“甚敏感器件”。如微波半导体器件等;耐静电 1 000～4 000 V 的叫“敏感器件”,如 MOS 电路、肖特基器件等。对这些敏感器件应在不带静电情况下拆除包装,放入屏蔽的导电盒内。有人放在塑料盒内,导致静电损伤,这就是误用失效。对甚敏感器件只能用手接触管壳。有人用手接触引出腿,导致静电损伤,这也是误用失效。还有耐静电 150 V 的极敏感器件,需特殊工艺保证。

据某工业部门统计,由于新的元器件不断出现,设计人员对新元器件的特性没有充分掌握就用于产品,从而造成误用失效,其比率竟然达到电子元器件失效的 1/3 甚至 40%以上。因此,电子元器件的“使用可靠性”是一个值得引起重视的实际问题。有必要编制元器件使用指南,供设计人员参照使用。

独立故障(Independent Failure)是指不是由另一产品故障引起的故障。亦称原发故障。由于另一产品的故障而直接或间接引起的产品故障叫“从属故障”(Dependent Failure)。例如:某项产品在测试时,二次电源连续出现二次高压,产品上的 CMOS 器件受高压冲击损坏。经分析,是二次电源的一支晶体管短路,产生高压脉冲。因此晶体管短路是独立故障,而 CMOS 器件被该高压引起的浪涌电流烧毁则是从属故障。尽管如此,此电路设计上是有缺点的,应该在二次电源中增加保护电路,保证即使晶体管短路,也不至于有高压脉冲输出。

“系统性故障”(Systematic Failure)是由某一固有因素引起,以特定形式出现的故障。它只能通过修改设计、制造工艺、操作程序、文件或其他关联因素来解决。例如:某一遥控设备出现故障,遥控命令与执行的命令不符。说明故障出在译码器与数-模变换器组合上。此组合用了多个干簧继电器。经高低温及随机振动试验,发现故障率相当高。因此,这是由于陈旧的干簧继电器不能承受新的设备环境而导致的故障,属于系统性故障,因而需改进设

计，用大规模专用集成电路代替干簧继电器。注意：只更换故障件，不能消除系统性故障。

产品由于偶然因素引起的故障叫“偶然故障”(Random Failure)，它只能通过概率或统计方法来预测。

系统性故障一般可以通过模拟故障原因来诱发，而偶然故障则不能。

产品是否故障与产品的预定功能密切相关。例如：在某些复杂系统中，金属膜电阻器的阻值超过额定值上、下5%的区间时叫故障；但对某些民用品而言，可能在额定值的上、下10%的区间内都不算故障。

产品的某一项性能指标超差叫“性能故障”，也可叫性能不可靠，性能故障有相当部分属于性能退化所致。“渐变故障”(Gradual Failure)是通过事前的检测或监测可以预测到的故障，它是由于产品的规定性能随时间的推移逐渐变化引起的，对电子产品也称“漂移故障”(Drift Failure)。渐变故障只要有检测或监测条件，就是可能预防的。事前的检测或监测不能预测到的故障叫“突然故障”(Sudden Failure)。

“间歇故障”(Intermittent Failure)是一种产品在发生故障后，不经修理而在有限时间内自行恢复功能的故障。例如：虚焊就是这类故障之一。间歇故障由于不易复现证实，一般很难查找。但间歇失效是很大的隐患，应该千方百计地找到故障原因加以排除。例如：某产品的燃料箱有一个报燃料耗尽的传感器，当燃料将耗尽时，它就发出信号让设备停车。但在一次执行任务时，燃料还未耗尽就发出错误停车命令，表面上是传感器故障。久经查证，才发现问题在于二次电源中的液体钽电容瞬间短路。使二次电源瞬间掉电引起的。最后，用固体钽电容代替液体钽电容。

美军标MIL-STD-2074中3.2.1的(e)规定：“一台设备只要还有一个曾出现的间隙故障尚未排除，没有得到政府检查员的批准的情况下，该设备不得交付”。实际工作中，确有像瞬间断电这类间歇故障找不到故障机理从而无法排除的。此时应记录在案，在鉴定验证时一并处理。

故障按其后果来分包括“灾难性故障”(Catastrophic Failure)及“严重故障”(Critical Failure)。灾难性故障即导致人员伤亡、系统毁坏、重大财产损失的故障；严重故障即导致产品不能完成规定任务的故障。

故障按其产生原因来分，除前述的本质故障及误用故障外，还包括由于对产品操作不当或粗心引起的故障，即“误操作故障”(Mishandling Failure)；由设计不当造成的故障，即“设计故障”(Design Failure)；由于产品的制造未按设计或规定的制造工艺造成的故障，即“制造故障”(Manufacturing Failure)；由于故障率随时间推移而增大的故障，它是产品固有过程的结果，叫“老化故障”(Ageing Failure)、“耗损故障”(Wear-out Failure)。

非责任故障(Non-chargeable Failure)是指非关联故障或事先已经规定不属某个特定组织提供的产品的关联故障；否则为责任故障。非关联故障(Non-relevant Failure)是指已经证实是未按规定的条件使用而引起的故障，或已经证实仅属某项将不采用的设计所引起的故障；否则为关联故障。共因故障(Common Cause Failure)是指不同产品由共同原因引起的故障。二次故障(Secondary Failure)是指一种故障，由于它的影响造成使用环境超出设计范围而导致早期故障。故障分析(Failure/Fault Analysis)是指发生故障后，通过对产品及其结构、使用和技术文件等进行系统的研究，以鉴别故障模式，确定故障原因和故障机理的过程。