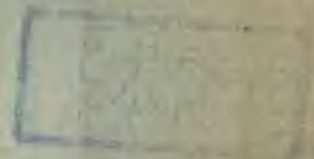


816703

467
G87.1

可靠性基础及其应用

许 陇 云
黎 惠 霖 编 著
刘 建 侯
裘 履 正 审 定



机械工业部仪器仪表工业局

一九八五年三月

可靠性基础及其应用

机械工业部仪器仪表工业局质量工艺处出版
(北京三里河东口)

湖南省黔阳彩色印刷厂印刷
(湖南安江)

机械工业标准发行站发行
(湖南省洪江市)

开本 787×1092 印张 26.5 字数 630,000
1986年1月第一版 1986年1月第一次印刷
印数 12,000

定价 5.90 元

序 言

随着国民经济的发展和科学技术的进步，工业生产、科学研究、对外贸易等各方面的广大用户对提高仪器仪表产品可靠性的要求愈来愈迫切。各大、中型成套装置高速连续生产过程中，各种自动化仪表及装置起着检测、调节、控制、监督和保护的重要作用，一旦失灵，将会给国家造成重大损失；各种科学测试仪器发生故障，也会带来严重后果；出口产品质量不可靠，直接影响我国的对外声誉。当然，各种仪表元器件质量低劣，必然影响到整机的可靠性。为此，提高仪器仪表产品及元器件的可靠性已成为当务之急。

为了贯彻机械工业部“三上一提高”的方针，适应广大用户对提高仪器仪表产品可靠性的迫切需要，我们安排上海工业自动化仪表研究所的几位同志编写了这本《~~可靠性~~基础及其应用》。本书的内容涉及可靠性数学基础，可靠性设计~~和~~可靠性试验评定。内容的选取力求通俗实用，便于普及，并选入了~~许多实例~~供仪器仪表行业及有关专业的设计、工艺、检验、管理人员~~及有关专业~~可靠性的教材，也适用于工程技术人员和技术工人自学。

本书共分十六章，第一章由许陇云同志和黎惠霖同志共同编写，第二章至第四章由许陇云同志编写，第五章至第九章由黎惠霖同志编写，第十章至第十六章由刘建侯同志编写，许陇云同志负责全书的主编工作，最后由裘履正同志修改和审定全稿。

由于安排编写的时间仓促，书中的错误和不当之处在所难免，希望读者批评指正。

机械工业部
仪器仪表工业局质量处
一九八五年三月

目 录

第一章 概论	1
一、可靠性问题的提出	1
二、可靠性的基本概念	2
三、可靠性工程学的历史简述	6
四、可靠性工程学的内容	9
五、寿命期内产品可靠性的变化	15
第二章 概率统计的基本知识	17
一、概率论的基本概念	17
二、事件间的基本关系, 事件的运算	19
三、概率运算基本公式	24
四、随机变量及其概率分布, 数字特征	29
五、大数定律和中心极限定理	46
六、多维分布	44
七、数理统计的基本知识	53
八、点估计和区间估计	59
第三章 可靠性特征量	67
第四章 可靠性工程中常用的概率分布	78
一、二点分布和均匀分布	78
二、抽样检验中应用的分布	79
三、产品的寿命分布	86
四、为了进行统计推断所构造的分布	98
第五章 产品可靠性指标的制订	104
一、产品在寿命期内的可靠性变化规律	104
二、制订可靠性指标的考虑	108
第六章 可靠性预计	901
一、元器件的失效率预计	011
二、系统的可靠性预计	121
第七章 故障分析	141
一、失效模式、影响及后果分析 (FMECA)	141
二、失效树分析 (FTA)	145
第八章 可靠性设计技术	151
一、可靠性分配	151
二、减额设计	158
三、安全系数	167

四、漂移设计.....	176
五、冗余设计.....	182
六、热设计.....	190
第九章 可靠性评定.....	199
一、概述.....	199
二、置信区间方法.....	200
三、贝叶斯方法.....	204
第十章 可靠性试验概论.....	213
一、可靠性试验的基本概念.....	213
二、可靠性试验计划.....	215
三、可靠性试验数据的收集与分析.....	218
第十一章 可靠性增长.....	220
一、产品研制过程和可靠性增长.....	220
二、可靠性增长模式和改进过程.....	221
三、可靠性增长模型.....	223
四、可靠性增长试验.....	230
第十二章 图分析、最小二乘法和 BLUE、GLUE 的应用.....	240
一、威布尔分布情形的应用.....	240
二、正态和对数正态分布情形的应用.....	258
三、短时试验图分析法.....	262
四、中途截尾试验的不完全数据的图分析法.....	263
第十三章 可靠性寿命试验与数据处理.....	267
一、可靠性寿命试验及其安排中的某些实际考虑.....	267
二、指数分布的参数估计和比较试验.....	273
三、威布尔分布的参数估计和比较试验.....	287
四、正态分布的参数估计.....	291
五、可靠度的非参数区间估计和平均寿命的非参数比较试验.....	296
第十四章 可靠性工程中的抽样检验.....	301
一、概述.....	301
二、产品质量指标和抽样方法.....	301
三、一次计数抽样检验.....	303
四、指数分布下的失效率抽样检验.....	312
五、指数分布下的平均寿命抽样检验.....	317
第十五章 分布的拟合检验.....	333
一、概述.....	332
二、分布拟合检验的一般步骤.....	332
三、全样本数据下分布的几种检验方法.....	334
四、截尾样本数据下分布的几种检验方法.....	335

第十六章 加速寿命试验及其数据处理.....	348
一、概述.....	348
二、故障物理及其常用失效模型.....	349
三、恒定应力加速寿命试验时的某些实际考虑.....	350
四、恒定应力加速寿命试验数据的图分析法.....	352
附录 有关产品履历卡和故障记录卡填写内容的规定和要求.....	365
附表.....	368
参考资料.....	415

附 表 目 录

9-1	η 表	368
12-1	标准正态累积分布函数的数值表	376
12-2	标准正态分布的双侧分位数 ($U_{1-\frac{\alpha}{2}}$) 表	377
12-3	χ^2 分布分位数表	378
12-4	中位秩表	380
12-5	10%和90%秩置信限	381
12-6	5%和95%秩置信限	383
12-7	2.5%和97.5%秩置信限	385
12-8	0.5%和99.5%秩置信限	387
12-9	相关系数 ρ 的临界值 ($\rho_{\nu, \alpha}$) 表	389
13-1	F分布分位数 $F_{1-\alpha}(\nu_1, \nu_2)$ 表	390
13-2	t分布双侧分位数 ($t_{1-\frac{\alpha}{2}}$) 表	395
14-1	随机数表	396
15-1	定数截尾样本, 统计量 D_r 的分布函数及临界值表	399
15-2	定时截尾样本, 统计量 D_0 的分布函数及临界值表	406
15-3	截尾样本, 统计量 D_0 的极限分布 $G(Z)$ 分位数表	414

第一章 概论

一、可靠性问题的提出

产品可靠性是什么？简单地说，产品可靠性就是产品不易丧失工作能力的性质。研究产品可靠性的工程学科称为可靠性工程学。产品的可靠性问题似乎早应予以注视，但事实上到第二次世界大战后，它对现代科学技术发起来势凶猛的挑战，才迫使人们耗费大量的财力和物力来研究它、解决它，并克服了当时科学技术上由此引起的巨大困难，把世界科学技术推向现代化的更高水平。与此同时，人们创立了一门独立的边缘科学——可靠性工程学。归纳起来，形成可靠性工程学这一学科的原因有如下四个方面：

1. 产品的性能优异化和结构复杂化之间的矛盾

第二次世界大战以来，产品的性能越来越优异。但为了实现其优异的性能，结构也就越来越复杂。结构复杂化带来的主要问题之一是容易出故障。很明显，由一百个相同元件串联组成的产品比单一元件出故障的可能性要大一百倍。有些机器由于不能长时间可靠地工作而陷于十分尴尬的局面。出了故障，功能就无法实现，再优异的性能又有什么实际价值呢？这正是第二次世界大战末到五十年代初许多高级电子设备面临的严峻现实。例如世界上第一台电子计算机ENIAC每33分钟就要更换一只失效的电子管；美国空军研究发现，使用中的每个电子管要有7个备件，每250个电子管需要有一个电子设备师来维修；侵朝战争中美军的电子设备维修费超过了采购费，国防部已无力负担由于装备失效而造成的经济 and 兵员方面的损失。为了使产品具有优异性能，常不得不采用复杂的结构；为了保证这些优异的性能在使用时付诸现实，又必须尽量减少故障。因而，人们不得不郑重其事地研究原来被忽视的产品可靠性问题。

2. 产品使用场所广泛性与工作环境严酷性之间的矛盾。

第二次世界大战后是航天、航空、兵器、大型工业系统日新月异的时代。但这些产品，如导弹、人造地球卫星、飞机及机载电子设备、大型化工系统和核电站内的自动控制系统等，其工作条件却十分严酷。例如机载电子设备要能经受 -40°C 到 $+100^{\circ}\text{C}$ 的环境温度，在炮弹上的元器件要经受 20000g 的冲击加速度，大型化工系统的设备常受到诸如硫化氢、二氧化硫、二氧化氮等多种腐蚀性气体的危害。这就要求在这些条件下工作的设备，其功能不受恶劣环境的影响。此外，运输与贮存环境中的振动、冲击和气候变化条件又常是产品设计者常常忽略的问题。这在第二次世界大战时使美军设备处于啼笑皆非的局面：60%的机载电子设备运到远东后不能使用，50%的电子设备又在储存期间失效，所剩者寥寥无几！这些现实迫使人们重视起产品的耐环境性，并研究有关的客观规律和解决办法。

3. 产品可靠程度与国家及社会安全之间的关系日益密切

许多产品，尤其是军工产品或大型工业系统（如核电站或大型化工系统），一旦发生故障，将引起严重后果，有的还会直接危及国家和社会安全。六十年代初，美国洲际导弹及其发射系统发生了几起灾难性的事故。例如，一块集成电路的失效，使得美国预警系统于1979年11月9日，1980年1月3日和6月3日三次错误地发出核袭击警报，其经济和政治损失无法估计。在1962年，广义可靠性的一个重要分支——安全性作为一门独立的学科开始得到发展。

4. 可靠性工程学的内部矛盾

不但外界对产品可靠性的要求推动了可靠性工程学的创立和发展，可靠性工程学内部的许多矛盾也推动它进一步发展。例如可靠性寿命试验是研究产品可靠性问题的重要手段，也是许多数据的主要来源。但是可靠性寿命试验耗时长、设备昂贵，人力消耗也很大。如果产品的可靠性很高，更会使常规的试验不可能实现。因此在六十年代初，美国罗姆航空发展中心发展了加速寿命试验的方法，即通过加大试验应力的方法来缩短寿命试验的时间。它在电子元器件的寿命试验中已获得了广泛的应用。再如现代产品由于竞争性和经验性的要求，相应产生了可靠性预计技术，即在产品尚未制成实物之前就能预先计算出它的可靠性。但五十年代的预计技术没有考虑失效模式和重要部件的参数漂移，影响了预计效果。六十年代初期发展了蒙德卡洛模拟技术，即从电路的转换函数、元部件及它们的参数随时间及应力的变化特性出发，可迅速预计将来任何时候转换函数变化的概率分布。这一技术在系统可靠性设计中得到广泛应用。

总之，在时代要求下，以概率统计为基础，集系统工程、运筹学、质量控制、生产管理诸科之大成，创立了一门独立的可靠性工程学，并得到了迅速发展。

二、可靠性的基本概念

如果一台仪表在极端工况下（如极限负荷下）长时间运转而不坏是否说明它的可靠性高？它在恶劣的环境条件下能正常工作是否说明可靠性高？它坏了以后很易修复是否说明可靠性高？在日常生活中，我们对一台测量仪器使用“可靠”这个词时通常是指不管发生什么情况，不论在什么时候，它都能忠实地工作，或者说它很少出毛病。把日常生活中的概念用合乎逻辑的语言确切地表达出来，就得到可靠性的定义：

可靠性是产品在规定的条件下，在规定的时间内完成规定功能的能力。

作为“产品”，在我们仪器仪表行业中，可以是一台整机，如差压变送器、电动调节器，也可以是一个部件以至一个元器件，如步进电动机、放大器、集成块、电阻、还可以是一个装置甚至一个系统，如控制柜、某生产线的负荷调节系统等。总之，可大可小，完全视我们所研究的问题范围而定。所以，产品被定义为：作为单独研究和分别试验对象的任何元件、器件、设备或系统，可以表示产品的总体、样品等。其确切含义在使用这一词时应加以说明。

必须指出，随着可靠性工程学应用范围的扩大，不但机器设备可以作为产品，连操作机器的人也可以与被操作的机器一起组成人机系统，作为一个产品看待；不但看得见摸得着的硬件（机器、仪表、元部件等）可作为产品，连作为语言、方法、程序的软件也可作为产品。总之，“产品”这一概念正在不断扩大之中。

“规定的条件”有着广泛的内容，必须充分重视。这一条件一般分为以下几个方面：

（1）环境条件

环境条件是指能影响产品性能的环境特性。它不但包括产品正常工作时经受的环境，也包括了运输、贮存和安装时经受的环境。根据国际电工委员会（IEC）的有关标准，环境条件由环境参数和严酷度组成。实际环境条件通常由若干单一环境条件复合而成。单一环境参数可分为四大类：

1）气候环境，主要包括温度、温度变化、湿度、大气压力、气压变化、周围介质的相对移动（空气或水）、降水（雨、雪、冰雹）、辐射（太阳辐射、除太阳以外的热辐射、离子辐射）、雨以外的其它水源（滴水、溅水、喷水和射水、水浪、浸水）、湿润；

2）生物和化学环境（包括微粒），包括生物作用物质（植物——霉菌和真菌、动物）、化学作用物质（海盐、二氧化硫、硫化氢、二氧化氮、臭氧、碳氟化合物和氨）、机械作用微粒（砂粒、尘、泥浆）；

3）机械环境，包括冲击在内的非稳态振动、稳态振动〔周期性（正弦）振动和非周期性（随机）振动〕、自由跌落、硬撞、摇摆和倾斜、稳态力（稳态加速度和静负荷）；

4）电和电磁环境，包括电场（静态和交变）、磁场（静态和交变）、传输导线的干扰。

在实际使用中，环境条件常以复合形式给出，如“地面固定”“地面移动”“舰船舱内”等等。其中“地面固定”的环境条件是指装在永久支架上且有适当通风、可能装在不受热的建筑物内。换句话说，这是气候条件良好，化学环境影响和冲击振动都不大的条件。

（2）动力条件

动力条件是能影响产品性能的动力特性。它主要指产品正常工作时动力源的情况。一般分为：

1）电源，主要参数为电源电压和频率、电流等等；

2）流体源（包括气源和液体源），主要参数为压力、流量等等；

（3）负载条件

负载条件是指能影响性能的负载特性，也包括输入信号的特性。根据产品的不同，常有不同的形式。对输入输出量为电量的产品指的是输入电压和电流、负载阻抗等，对输入输出为机械量的产品指的是信号力或负载力和力矩，其它力学量等等。

（4）使用和维护条件

产品的可靠性只有在使用中才得以实现，并在维护中得到提高。对于使用和维护条件来讲，首先要注意的是完善的产品使用和维护说明书。许多产品由于不恰当地使用而损坏，但责任不一定全在使用方。制造方没有提供完善的使用说明书并对使用方提供使用方法的技术也是一个重要原因。对使用方而言，必须要求使用者达到相应的技术水平。此外，产品是连续使用还是间断使用也是一个重要因素。对于可修理的产品，还应考虑修理条件和方式、技术水平和修理时的环境条件。

“规定的条件”是产品可靠性定义中最重要又最容易忽略的部分。必须牢牢记住：不同条件下产品的可靠性是截然不同的，离开了具体条件谈论可靠性是毫无意义的。

“规定的时间”是可靠性区别于产品其它特性，如功能性、工艺性等的重要特征。所以日本工业标准（JIS）定义可靠性为“系统、设备、元器件等的功能在时间上的稳定程度或特性。”也就是以时间为尺度度量的产品特性。离开了时间就无可靠性而言。以数学形式表示可靠性的各特征量，如可靠度、失效率、MTBF 等来讲，时间是最重要的显参数，或者本身就是一个时间量。

“规定的功能”是指表征产品能完成任务的各参量，即各性能指标。如对仪器仪表而言，常常有输出范围、精度、线性度、动态范围、量程、信噪比、失真度、分辨能力、回差、重复性、灵敏度、漂移等等。不同的产品完成的功能是不同的，必须在研究其可靠性之前先明确具体的定义什么是“规定的功能”。值得注意的是对于同一个产品，在不同的情况下，规定的功能常常是不同的。对制造方或质量认证方来讲，规定的功能是很严酷的，一般将产品说明书上列出的全部性能参数的指标数值作为规定功能的度量，但对使用方来讲，常常只考虑在具体使用条件下他所需要的主要功能。对于他认为不影响正常工作的其它功能上的失效，或对他来讲是根据没有用的其它功能方面的失效，他往往不予理睬或不能察觉。例如一台阀门的微量泄漏常被使用者忽略，一台带有信号输出的指示仪表如果仅仅作指示用，则输出功能上的缺陷不会被发现。这些是可靠性试验室试验结果常比现场采集到的数据的结果差得多的主要原因。这也说明，对产品每个功能逐个规定可靠性特征量的数值比对整个产品规定一个可靠性特征量的数值更为合理。

一个产品的可靠性是由固有可靠性和使用可靠性两部分组成。固有可靠性是产品早在规划阶段就确定了可靠性指标，并在生产的各阶段得以确立。固有可靠性是产品本身具有的，由生产方在模拟实际工作条件的标准环境下，进行检测并予以保证的可靠性。

但是，产品生产出来后要经过包装、运输、贮存、安装、使用、维护保养、修理诸环节。在这过程中产品的可靠性会受到种种条件、如环境、技术条件、维修方式的影响，即使一个本来不会失效的产品也可能由于这些环节中的不利因素，如包装不良、运输时的强烈冲击、使用时的误操作等等造成失效。这些环节中存在的可靠性称为使用可靠性。

一般认为，产品可靠性可近似看作固有可靠性和使用可靠性之积。国外介绍电子设备不可靠原因及比例如表 1—1。

表 1—1 产品不可靠的原因及比例

可 靠 性	固 有 可 靠 性	零部件材料	30%	技 术	电 气	30%
		设计技术	40%		机 械	10%
		制造技术	10%	制 造	20%	
	使 用 可 靠 性	使用（运输、环境、操作、安装、维修技术）	20%	现场使用	30%	
				其 它	10%	

失效是指产品丧失功能的现象，它是“可靠”的对立面。但多数整机或部件，仅由于元器件失效而导致整体丧失功能的现象可通过更换元器件予以消除。这类产品称为可修复产品。对可修复产品来讲，失效可称为故障。

也有许多产品，如电阻、电容、晶体管之类的电子元件或集成电路之类的电子器件，一旦失效就难以修复，或修理的费用会超过制造的成本使得经济上是不值得修理的；还有些产品属于一次性使用，如熔断品，导弹上的部件、发射卫星的火箭。上述两类产品一旦丧失规定功能，则或者不可能，或者不值得，或者不要求修复，这类产品称为不可修复产品。对不可修复产品而言，丧失规定功能的现象只能称为失效。在未涉及修理问题时，失效和故障都指丧失功能，所以许多定义和规律是一样的，我们往往只提出其中之一，读者可视情推广到另一个。

可靠性有狭义和广义两种意义。狭义可靠性仅指产品在其整个寿命期内完成规定功能的能力。以后对“可靠性”一词若不加另外注明，均指狭义可靠性。广义可靠性通常包含狭义可靠性和维修性两方面内容，常被称为有效性。而耐久性、环境适应性和安全性也是广义可靠性所涉及的内容。

维修是为了保持或恢复产品能完成规定功能而采取的技术管理措施，当然仅适用于可修复产品。维修性则是在规定条件下使用的产品在规定的时间内，按规定的程序和方法进行维修时，保持或恢复到能完成规定功能的能力。有效性是指可维修产品在某时刻具有或维持规定功能的能力（当然是在规定的条件下）。可靠性好，产品不易产生故障，维持其功能的能力当然较强；维修性好，一旦故障则容易修复，故障持续时间就较短，大部分时间仍能维持其功能的正常发挥，则具有规定功能的能力也较大。所以说有效性由可靠性与维修理综合而成。耐久性是指产品在规定的使用和维修条件之下，达到某种技术或经济指标极限时（可以认为是其寿命终了时），完成规定功能的能力。因此，可以把耐久性看作某一特定“时刻”的有效性，但这个时刻不是预定的时间终点，而是达到某种技术或经济指标极限的“时刻”。

可靠性的概念可根据其定义和日常生活中的理解延拓到包括环境适应性，甚至延拓到包括其它条件（动力、负荷、使用、维护条件等）的适应性。因为环境条件和其它条件在逻辑上是和时间条件等地位的。我们固定环境条件，研究在规定时间内产品能否完成规定功能，我们就得到可靠性；如果我们固定时间（理论上为无限长，实际上为足够长）改变环境条件，研究产品在不同环境下完成规定功能的能力，就得到环境适应性。所以环境适应性可看作广义可靠性的一个方面，这就是环境适应性和可靠性之间的关系。这与我们日常生活中的概念是完全一致的。当然，概念上的统一并不意味方法上的一致。可靠性（包括有效性）和环境适应性的研究方式和数学上的深入程度是不同的。产品的可靠性已在实验基础上，主要通过概率统计等数学方法，建立起严密的理论体系。

正由于可靠性的数学体系比较成熟，初学者常从书本上学习可靠性数学开始。但必须明确，可靠性工程决不等于可靠性数学。前者从研究实际工程中的可靠性问题出发，以解决这些实际问题为目的；后者可作为可靠性工程中的数学工具，当然是极为重要的工具。

在开始建立可靠性理论时，常需从试验出发。为了获得原始的可靠性数据，为了验证预计的产品可靠性，也必须做可靠性试验。我国的仪表行业可靠性工作也是从试验上马的。但

是可靠性工程不仅仅是可靠性试验，后者只是前者的一个组成部分而已，而且穿插在产品的整个寿命循环期（从构思到不能使用而报废为止）的各阶段进行。

可靠性与功能性、工艺性等，一样是产品的固有属性之一。可以认为，产品具有五个主要属性：

- a. 功能性，指产品所具有的功效或作用；
- b. 可靠性，指在各种情况下产品维持功能的能力；
- c. 工艺性，指设计、元器件供应、尤其是加工时的难易程度；
- d. 时间性，指设计方案的提出时间、产品提交的时间长短；
- e. 经济性，指在产品的寿命循环期内，为使产品正常工作而付出的总费用，包括设计、采购、加工、维修、使用等费用之和的大小。

所以有产品就有可靠性，可靠性寓于产品之中，而不论你是否认识它、研究它。当然如前文所述，只有在一定的条件下可靠性才成为亟待解决的尖锐问题。或者让可靠性来找我们，迫使我们打被动仗；或者我们吸取国外的经验教训，主动去研究可靠性，防大患于未然，哪种做法更好呢？

三、 可靠性工程学的历史简述

尽管作为产品基本属性的可靠性随着产品的存在而存在，但可靠性工程作为一门独立的工程科学却只有不到三十年的历史。如前所述，只有现代的科学技术发展达到一定水平，产品的可靠性才突出为一个不仅影响产品性能，而且关系到一个国家经济和安全的重大问题，成为众所瞩目的，致力研究的对象。在这股社会需求的强大力量推动下，可靠性工程学从概率统计、系统工程、质量控制、生产管理等学科中脱胎而出，成为一门新兴的工程科学。

可靠性工程的历史大致可分为以下几个阶段：

1. 可靠性工程的准备和萌芽时期（三十至四十年代）

与可靠性工程有关的数学理论早就发展起来了。可靠性工程最主要的理论基础——概率论早在十七世纪开始就由伽里略、巴斯卡、费尔马、惠更斯、J·贝努里、德莫菲尔、高斯、拉普拉斯、泊松等人逐步确立。布尼科夫斯基在十九世纪写了第一本概率论教程。他的学生切具舍夫发展了大数定律。他的另一个学生马尔科夫创立了随机过程论，这是可维修系统最重要的理论基础。可靠性工程学另一门主要的基础理论——数理统计学在本世纪三十年代开始也得以迅速发展。作为与工程实践的结合，除了三、四十年代提出的机械维修概率，长途电话问题的概率分布，更新论，试件疲劳与极限理论的关系外，值得提出的是在1939年瑞典人威布尔为了描述材料的疲劳强度而提出了威布尔分布。该分布后来成为可靠性工程中最常用的分布之一。

最早的可靠性概念来源于航空。1939年，美国航空委员会出版的《适航性统计学注释》中，提出了飞机由于各种失效造成的事故率不应超过0.00001/小时，相当于飞机在一小时飞行中的可靠度为0.99999，尽管这里并未明确提出“可靠度”的概念。我们至今仍沿用的“可靠性”定义是在1952年美国的一次学述会议上提出来的。

早期的系统可靠性理论见于纳粹德国对 V1 火箭的研制中。他们提出了由 N 个部件组成的系统，其可靠性等于 N 个部件可靠性的乘积，这就是现在常用的串联系统可靠性乘积关系式。

最早作为一个专用学术名词明确提出“可靠性”的是美国麻省理工学院放射实验室。它在 1942 年 11 月 4 日向海军与舰船局提出的一份报告中说：“……由于真空管寿命短，需要一个专门小组对它的可靠性进行研究并协调各个研究所的工作。”

1943 年美国成立了“电子管技术委员会”并领导“电子管研究小组”，开始了电子管的可靠性研究。这是有组织研究电子管可靠性的开始。1949 年，美国无线电工程学会成立了可靠性技术组，这是第一个可靠性专业学术组织。

2. 可靠性工程学的兴起和独立（五十年代）

五十年代初，可靠性工程学在美国兴起。当时，美国的军用电子设备由于巨大的失效率而面临着十分严重的局面：1949 年美国海军电子设备有 70% 失效，一个正在使用的电子管要九个新的电子管作为随时替换的备件；1951 年到 1952 年一般的无线电设备中 14% 有故障，而雷达甚至有 84% 有故障；美国空军每年的设备维修费为设备本身价值的两倍，需有三分之一的地勤人员维修电子设备。

为了扭转被动局面，1952 年 8 月 21 日，美国国防部下令成立由军方、工业界及学术界组成的“电子设备可靠性顾问组”（Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment），即 AGREE。1955 年，AGREE 在给政府的报告中提出了九项建议：设计程序、试验、元件的可靠性、采购、运输、包装、贮存、操作、维修。这是产生美国有关可靠性军标的思想基础。1957 年 6 月 14 日产生了著名的 AGREE 报告《军用电子设备的可靠性》。该报告极为广泛、系统、深入地提出了如何解决产品可靠性问题的一系列办法，成为以后美国一系列军标的基础。这些标准成为世界各国及各世界组织制订有关可靠性技术文件的依据。可以认为，AGREE 报告的发表是可靠性工程学成为一门独立学科的开端。此后美国制订了一系列有关可靠性的军标，确立了可靠性设计方法、试验方法及程序，并建立了失效数据收集及处理系统。同时，其它一些国家，如苏联、日本、瑞典、意大利、联邦德国等也纷纷成立了研究可靠性的专业组织，召开专门会议，开展可靠性活动。

3. 可靠性工程学的全面发展（六十年代）

六十年代是世界经济发展较快的年代。可靠性工程学以美国为先行，带动其它工业国家得到了全面、迅速的发展。其主要表现是继续制订、修订了一系列有关可靠性的军标、国标和国际标准，包括可靠性管理、试验、预计、设计、维修等内容；成立了可靠性研究中心，深入进行可靠性基础理论、工程方法的研究；发展了加速寿命试验、快速筛选试验这两种更有效的试验方法；发展了按系统功能和参数预计可靠性和蒙德卡洛模拟法等新的可靠性预计技术；开拓了旨在研究失效机理的可靠性物理这门新学科；发展了失效模式、影响及后果分析（FMECA）和失效树分析（FTA）两种有效的系统可靠性分析技术；开展了机械可靠性的研究；发展了维修性、人为可靠性和安全性的研究；建立了更有效的数据系统；创建了可靠性教育课程。

值得提出的是日本。日本在1956年从美国引进了可靠性技术和经济管理技术。不到十年，它的工业增长速度就高达15%，1960年日本成立了质量管理委员会。同年由科技联合会召开了第一次全国可靠性讨论会。六十年代中期，日本成立了电子元件可靠性中心。日本将美国在航空、航天及军事工业的可靠性研究成果应用到民用工业，特别是民用电子工业中，使其民用电子工业产品质量大幅度地提高，产品在世界各国广为销售，赢得了良好的质量信誉。

4. 可靠性工程学的深入发展（七十年代以来）

在六十年代全面发展的基础上，可靠性工程学不但在处于领先地位的美国和经济较发达的欧、日、苏各国得以向纵深发展，而且在发展中国家，如印度和中国等国也得到了迅速发展。

美国在1975年9月正式成立了直属美国三军联合后勤司令部领导的电子系统可靠性联合技术协调组来进行统一的可靠性管理。在1978年2月，该组织能扩大到非电子设备，故改名为“可靠性、可用性及维修性联合技术协调组”。1970年9月，美国成立了全国性的数据交换网“政府—工业部门数据交换网”，它是全国统一的数据交换网，已有220个政府机构及404个工业组织参加了该网。

在可靠性设计和试验方面，七十年代以来，更严格、更符合实际、更有效的设计和试验方法得到了发展和采用。它们是：更严格的简化和降额设计，使产品零件数大大减少，使用功率值大大降低，从而其可靠性大为提高；发展了计算机辅助可靠性设计，包括复杂电子系统的可靠性预计和精确的热分析和热设计；研究非电子设备（机械和机电设备）的可靠性设计和可靠性试验，采用组合环境应力试验，如温度—湿度—振动（正弦）试验，以便更真实地模拟环境；加强环境应力筛选试验；进行可靠性增长试验。

此外，维修性的中心思想转移到以可靠性为中心（即努力提高维修工作的可靠性）。1970年美国联邦航空局颁布了以可靠性为中心的维修大纲MSG—2。它包括定时维修，视情维修，状态监视等三种维修方式，在军、民两界的飞机上都得到了广泛应用。由于电子计算机技术的飞速发展，软件可靠性成为一个重要问题。1978年美国成立三军软件可靠性技术协调组来负责国防部范围内的软件可靠性研究及协调工作。目前对软件可靠性的研究工作正在迅速发展成一个新的可靠性分支。

印度和以色列在七十年代成立了全国性的可靠性学术组织，并在航空、航天及电子工业部门设有专门的可靠性机构和试验室。印度在可靠性理论研究方面，在世界权威杂志上发表的可靠性论文数量与质量都是举世瞩目的。这两个国家都是从欧美引进可靠性技术并结合本国国情采用合适的设计、试验、预计和分析方法来解决本国产品的可靠性问题。

我国的可靠性工程研究是六十年代中期开始的，主要在电子、航空、航天、核能、通讯等领域内得到应用。1979年中国电子学会电子产品可靠性与质量管理专业委员会召开第一次工作组会议。1980年国家标准总局召开全国电子产品环境条件与环境试验标准化技术委员会第一次会议，同年成立了可靠性数据交换网。1981年和1983年中国电子学会电子产品可靠性与质量管理委员会召开了两届学术年会。清华大学、上海交大、华东师大、天津大学、北京轻工业学院、北航、西工大、上海机械学院等院校已从事可靠性研究，开设可靠

性课程，并与其它研究所一起招收可靠性专业的研究生。在仪器仪表行业中，上海工业自动化仪表研究所于1975年成立“可靠性与环境试验研究室”，对全行业的可靠性与环境技术的研究和应用起了带头作用。该室已完成了一批环境条件与环境试验、可靠性试验、可靠性评定等方面的课题，完善了各种环境试验与可靠性试验方面的设备和技术能力。同时，仪器仪表行业还多次举办学习班，培养了一批具备可靠性工程基础知识和实践能力的人员。目前，仪器仪表行业的可靠性工作正在向纵深发展。

四、 可靠性工程学的内容

产品可靠性工程学包括的内容很广，其基本任务概括起来就是两句话：确定产品可靠性和获得产品可靠性。在时间上，这两个基本任务是相互穿插在一起的。

确定产品可靠性就是通过各种途径，如各种预计、试验、系统分析等来确定产品的失效机理、失效模式以及各种可靠性特征量的数值或范围等。

获得产品的可靠性就是通过产品的寿命循环期（包括仅存在于意识、图纸、计划、公式中的“虚”的产品时期和从产品生产、出厂到报废为止的“实”的产品时期），即从构思、审查、研制、生产、使用、维修等一系列活动中的各种获得并提高可靠性的各项措施，得到最优化的可靠性。

1. 产品的可靠性工作程序

一个产品的可靠性与产品寿命循环期内的各种可靠性活动有关。为了达到可接受的现场可靠性，必须在产品投入现场使用前做大量的工作。这就需要从方案论证开始到产品报废处理为止的整个寿命循环期内有计划地开展可靠性活动。

一个产品的寿命循环期包括以下六个阶段

a. 方案论证（构思）阶段。在该阶段中要发现和探索能满足规定要求的各种可能解决办法和初步草案，还包括拟定可靠性等级和对可靠性与成本的初步分析工作。

b. 评审阶段。该阶段的工作主要是完善所提出的方案，进行必要的硬件研制、试验及对产品的可靠性进行初步评估。

c. 设计研制阶段。在该阶段中要对产品及主要辅助设备设计、生产、试验及评估，包括建立可靠性模型，故障模式、影响及后果分析，潜在通路分析（异常功能的出现与抑制），电子元器件及电路的容差分析，贮备分析，可靠性数据采集与分析，制定元器件规划（控制元器件的选择与使用），进行可靠性分配与预计，实施可靠性增长试验，考虑功能试验和各种环境因素及维修对产品可靠性的影响，估计生产及现场使用的退化系数。

d. 生产阶段。该阶段从批准生产直到最后产品的提交与接收。其工作内容为提出质量一致性检验方法，元器件的筛选规范，可靠性验证试验（包括早期生产产品的鉴定试验与最后生产批的抽样检验），还有确定耗损失效模式是否存在的耐久试验。

e. 使用阶段。在该阶段，我们应通过使用及维修，收集现场可靠性数据以测定产品的现场可靠性，为改进设计及改进工作提供依据。

f. 报废处理阶段。

设计人员最感兴趣的是规定在系统的研制阶段必须进行哪些可靠性工作。标准的可靠性设计条文在美国文件 AF SCP—800—XX《可靠性和维修性管理指南》中有明确规定。现摘录其中一表为表 1—2，它反映了产品可靠性计划内容及每一内容在寿命循环期各阶段的重要性。表 1—2 也符合美国 MIL—STD—785 B《系统和设备的研制和生产可靠性管理规划》的要求。

表 1—2 可靠性程序的内容

内 容	寿 命 期 的 各 阶 段				
	方案论证	评 审	设计研制	生 产	使 用
确定要求	xxxxxxxxxx	xxxxxxxxAAAA	A.....		
可靠性模型	xxxxxx	xxxxxxxxxxxx	xxxxxxxx.....		
可靠性预计	xxxxxx	xxxxxxxxxxxx	xxxxxxxx.....		
可靠性分配	000000	000000000000	000000.....		
失效形式分析	000000	000000000000	xxxxxxxx.....		
可靠性设计	000000	xxxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxxx	
元件选择	000000	xxxxxxxxxxxx	AAAAA.....	
设计审查	000000	xxxxxxxxxxxx	xxxxxxxx.....		
编制设计规范	xxxxxxxx	xxxxxxxxxxxx	x.....		
编制交收规范	xxx	xxxxxxxxAAAA	A.....		
可靠性评价试验	---	xxxxxxxxxxxx	xxxxxx		
失效分析	---	xxxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxxx	00000000000	00000000000
数据收集系统	---	xxxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxxx	00000000000	00000000000
质量管理		000000000000	xxxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxxx	00000000000
环境试验		xxxxxxAAAAA	A.....	
可靠性交收试验		xxAAAA	A0000000000	

表 中 说 明

- (为获得最高成功率) 所规定的措施;
- 000000 必要的措施 (误差影响极少);
- xxxxxxxx 非常重要的措施 (误差常有影响);
- AAAAA 关键性的措施 (误差甚有影响);
- 不太重要的措施 (用以修正以前的结果)。

根据设计单位制订的可靠性计划，拟出在设计、制造各阶段为全面达到既定指标的各项
工作顺序，称为可靠性设计程序。它可用图 1—1 来说明。

图 1—1 中各项工作说明如下：

a. 可靠性指标的制订

根据收集到的可靠性数据，拟定产品的可靠性等级，通过可靠性分析提出设计要求。这是在方案论证阶段和评审阶段的工作任务之一。第五章将对此专文叙述。