

兵器可靠性技术与管理

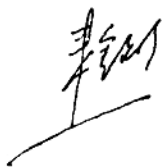
李良巧 等 编著



序

随着国防科学技术的迅速发展，在现代化的武器装备中，可靠性与维修性的重要性越来越突出。武器不可靠将会直接影响战斗的胜负和战士的安危。兵器工业正面临着“军转民”、“内转外”的新形势，产品的质量和可靠性是市场竞争的决定因素。性能可靠的产品必将赢得信誉，赢得市场，赢得效益。我们的可靠性工作起步较晚，必须急起直追。因此：兵器行业一定要十分重视可靠性工作，所有的厂、所都应该把这项工作作为提高装备可靠性和民品质量的一项重要的基础技术工作认真地抓紧抓好，使兵器行业的可靠性工作出现一个新局面！

可靠性工程是一门新的学科。我们都面临着重新学习的任务，特别是各级领导。为了普及可靠性知识，我们委托系统工程研究所组织北京理工大学、华东工学院、太原机械学院共同编写了《兵器可靠性技术与管理》一书。这是一本结合兵器工业实际的好教材。我相信，它的出版将会对兵器行业的可靠性工作起到积极的推动作用。



1988.11.7

前 言

为贯彻落实国务院、中央军委批准颁发的《军工产品质量管理条例》和国军标《装备研制与生产的可靠性通用大纲》关于加强质量和可靠性工作的精神，以及邹家华同志对这项工作的重要批示，1988年2月在原兵器发展司的具体指导下，由系统工程研究所组织北京理工大学，华东工学院，太原机械学院从事可靠性研究与教学人员组成编写组，经过半年多的努力，完成了《兵器可靠性技术与管理》一书的编写工作。本书的内容紧密结合兵器特点，可靠性技术与管理并重，是迅速普及与提高各级领导和广大工程技术人员及管理人员可靠性知识的良师益友。

可靠性工程是一门新的学科，可靠性是产品质量的重要内涵。对兵器产品来讲，可靠性更有特殊重要的意义。它影响武器装备性能的正确发挥，关系到战争胜负、人员的安危。可靠性技术水平是兵器科研和管理水平高低的重要标志；是衡量兵器产品性能、质量的重要指标。各级领导必须充分认识开展可靠性工作的重要性 and 迫切性，积极做好有关兵器可靠性的各项工作，把提高产品可靠性工作当作一件大事来抓，一定要从兵器发展战略的高度搞好兵器可靠性工作。兵器可靠性工作起步晚，基础差，缺乏经验，因此首要的是抓好各类人员的培训工作，特别是随着国民经济的发展和科学技术的进步，必须确立新的质量观念，树立“产品质量就是产品的适用性”的概念，树立产品质量必须不断提高的观点。质量是战略问题，是提高效益的决定因素，是企业兴衰成败的关键。因此，在论证战术技术要求时，要论证和明确可靠性指标；在设计和研制过程中，要进行一系列可靠性设计和可靠性分析，要进行可靠性增长试验，加强可靠性管理；在制、修

订产品标准时，要将可靠性指标列入并以此作为考核和鉴定产品性能和质量的重要依据；从国外引进产品制造技术时，必须注意同时引进产品的可靠性指标、设计和试验方法等技术。可靠性不仅要作为产品质量的考核的重要指标，而且要作为企业升级、产品评优、评奖(科研成果)的重要条件。

借本书出版之机，特向系统工程研究所等单位的编者致谢，并希望兵器行业各单位、各专业的同志，团结合作、勇于探索、积极实践，为共同搞好兵器可靠性工作，提高产品质量做出最大贡献！

兵器工业总公司质量技安局

目 录

第一章 可靠性概论	(1)
第一节 为什么要研究武器装备的可靠性	(1)
第二节 国内外可靠性工程发展概况	(5)
第三节 可靠性工程研究的基本内容与发展动向	(12)
第四节 可靠性与质量管理的关系和区别	(14)
第二章 可靠性数学基础	(19)
第一节 概率论基础	(19)
第二节 随机变量及概率分布	(28)
第三节 随机变量的数字特征	(32)
第四节 可靠性工程中常用的几种概率分布	(34)
第五节 数理统计基础	(43)
第三章 装备的可靠性指标	(49)
第一节 可靠性特征量	(49)
第二节 装备的可靠性指标	(60)
第四章 系统可靠性模型的建立及可靠度计算	(73)
第一节 引言	(73)
第二节 简单系统	(76)
第三节 冗余系统	(81)
第四节 常用的几种典型可靠性框图	(87)
第五节 复杂系统	(90)
第六节 弹药系统可靠性模型	(96)
第七节 引信及其元部件的可靠性模型和可靠度表达式	(98)
第五章 可靠性预计	(109)

第一节	可靠性预计的目的	(109)
第二节	可靠性预计的程序	(110)
第三节	相似设备法	(113)
第四节	功能预计法	(113)
第五节	元器件计数法	(115)
第六节	应力分析法	(117)
第七节	界限法	(123)
第八节	实例: 坦克系统可靠性预计	(128)
第六章	可靠性分配	(136)
第一节	等分配法	(137)
第二节	比例分配法	(138)
第三节	最少工作量算法	(143)
第四节	考虑重要度的分配法	(146)
第五节	关键性的考虑	(149)
第六节	拉格朗日待定系数法	(150)
第七节	评分分配法	(152)
第七章	系统可靠性分析	(156)
第一节	故障模式、影响及危害度分析	(156)
第二节	故障树分析	(175)
第八章	机械概率设计	(222)
第一节	引言	(222)
第二节	应力—强度“干涉”理论	(228)
第三节	安全系数与可靠度	(238)
第四节	设计变量的统计处理	(244)
第五节	兵器机械零部件可靠性设计	(256)
第九章	电子设备可靠性设计	(289)
第一节	电子元器件的选择与控制	(289)
第二节	降额设计	(292)
第三节	耐环境设计	(309)

第四节	热设计 …耐……………	(321)
第五节	电磁兼容设计 ……………	(327)
第六节	电子元器件和电路容差分析 ……………	(330)
第七节	潜在电路分析 ……………	(336)
第十章	武器装备的维修性 ……………	(344)
第一节	维修性概念 ……………	(344)
第二节	装备维修性的基本要求 ……………	(348)
第三节	故障诊断 ……………	(354)
第四节	维修的方式、方法与维修体制 ……………	(356)
第五节	可靠性与维修性的权衡 ……………	(358)
第十一章	可靠性试验及其数据处理 ……………	(363)
第一节	环境试验及环境应力筛选试验 ……………	(366)
第二节	可靠性增长试验 ……………	(370)
第三节	可靠性鉴定试验和验收试验 ……………	(382)
第四节	加速寿命试验 ……………	(405)
第五节	可靠性试验数据的分析处理 ……………	(409)
第十二章	装备的贮存可靠性 ……………	(435)
第一节	装备贮存时的可靠性参数 ……………	(435)
第二节	装运和贮存期间装备可靠性降低的原因 ……………	(436)
第三节	贮存可靠性预计 ……………	(438)
第四节	贮存可靠性的控制 ……………	(442)
第十三章	装备研制的可靠性管理 ……………	(447)
第一节	引言 ……………	(447)
第二节	可靠性管理的特点和管理的内容 ……………	(448)
第三节	可靠性管理的组织机构 ……………	(450)
第四节	装备型号研制的可靠性管理 ……………	(451)
第五节	装备研制中的可靠性标准 ……………	(461)
第六节	可靠性评审 ……………	(462)
第七节	可靠性数据 ……………	(469)

第八节 可靠性教育	(474)
附表1-8.....	(476)
参考文献	(489)

第一章 可靠性概论

第一节 为什么要研究武器装备的可靠性

武器装备的可靠性历来为设计研制部门和使用部门所重视。早在北宋,《武经总要》就记述了弓箭多次使用弓力不减弱,天气冷热弓力保持不变的问题。这就是早期的武器可靠性。建国后的军工部门提出的“军工产品,质量第一”方针,对提高装备的质量起了重大作用。然而问题并未就此解决,武器装备的质量问题依然强烈地摆在领导和广大研制人员的面前,不断引人深思。其实,所谓装备质量问题,说到底就是可靠性问题。那么,装备可靠性为什么会变得这样重要和突出?我们将从以下几个方面加以说明。

一、现代装备的可靠性更具有特殊的意义

武器装备是一种特殊用途的产品,直接为战争服务。在冷兵器时代,一根长矛的脱落,一张弓箭的断裂也会影响打仗,但毕竟影响不大。然而,现代装备在战场上可靠与否却直接影响战争双方的力量对比。在平时训练、武器可靠与否也直接影响并危及战士生命的安危。迫击炮弹早炸,一次伤亡数十人。飞机发动机在空中因故障而“停车”,驾驶员在空中弹射救生失败,机毁人亡。

在核技术和空间技术迅速发展的今天,武器装备的可靠性还可能给人类带来战争的灾难。1979年与1980年间的半年多时间里,美国战略预警系统曾三次因计算机出故障而发出警报。其中如,“苏联××导弹基地已向美国发射洲际导弹”及“从西部海岸外一艘不明国籍的潜艇发射的导弹正向美国飞来”,当时都给美国造成了巨大的虚惊。

二、武器装备复杂程度日益增加

科学技术的迅速发展为提高武器的性能提供了充分的条件，但同时却使武器的复杂程度大为增加。例如，现在的坦克与50年代的坦克相比，普遍都增加了以计算机为中心的火控系统，双向稳定器，自动灭火系统，红外、微光、激光和热成像等观测装置。这就要增加数以千万计的接点和焊点，元件和零件。而其中任何一个发生失效，都可能使坦克不能完成规定的功能。由可靠性知识可知，两个可靠度为0.9的零件组成的串联部件，其可靠度为0.81。由四个组成，其可靠度仅为0.66。由十个组成，其可靠度只有0.35。可见，系统越复杂，所带来的可靠性问题必然越多。

三、武器装备使用环境日趋严酷

武器能否经得起恶劣使用环境考验而正常工作，是研制人员遇到的重大课题。武器既要在 50°C 高温环境下工作，还要在 -40°C 低温下工作；既要在高原低气压和风沙中工作，又要在海上和沼泽地工作，如此等等。然而，高温会引起热老化，使绝缘失效；低温会引起零件体积缩小，使结构损坏，运动件磨损加剧；沙尘会引起堵塞；潮湿会引起电腐蚀，使机械强度降低……所有这些正如美陆军武器装备司令部组织编写的《可靠性设计指南》中说的：既不饶恕，也不谅解，它会有条不紊地把一个系统包围起来，向系统的每一个部件发起进攻。只要某个部件有弱点，装备的可靠性就会降低。据报道，同一装置，在实验室条件下，单位时间内失效数若为1，则在野外地面上使用则为2，军舰上使用则为10，飞机上使用则为20。以往研制的武器装备定型时几进几出靶场，往往都是可靠性问题，而可靠性问题相当多是由使用环境条件恶劣所致。

四、可靠性指标是型号研制合同中的重要内容

以往的武器装备型号研制几乎没有什么可靠性定量要求，一般都笼统地规定：“具有一定的可靠性。”这种没有量化的要求，

是无法比较和考核的。

近几年，科工委已明文规定，凡新研制装备必须有定量的可靠性要求。总后军械部提出“以可靠性为中心的定购验收，以可靠性为中心的维修和以可靠性为中心的贮存保管”。明确产品必须有可靠性指标。实际上，在研的一些装备已有明确的可靠性要求，如某装甲车，要求平均无故障行驶里程500公里，射击故障率不得大于0.3%，一类零件使用寿命5000公里等，同时对维修性也提出严格要求，如更换身管不得大于6分钟，本车乘员使用随车工具更换易损件1小时，用手动工具及两吨以上吊车3人操作更换一种主要部件4小时等。

国军标《装备研制与生产的可靠性通用大纲》已经颁布，大纲详细规定了装备研制中如何开展可靠性工作，以及订购方如何要求和监督承制方开展可靠性工作。可见，可靠性问题已成为研制合同中不能回避的重要内容了。只有认真开展可靠性研究，才能顺利地各种装备研制合同。

五、军贸中可靠性至关重要

美国军事部门在专门建立的一套可靠性管理程序文件中明文规定，哪个企业没有可靠性机构，国防部就不订它的货。在国际贸易中，可靠性已是客商极为关心的问题。有的外商已明确提出要有可靠性报告。可见，要促进军贸的发展，必须研究和提高产品的可靠性，否则一旦发生问题，不仅要造成重大的经济损失，还有损我国的国际声誉。

六、可靠性是产品开发和市场竞争的关键

军民结合，努力开发民品，为国民经济建设服务是兵器工业的努力方向。但民品市场的竞争激烈，优胜劣汰。要想在强手如林的民品市场中站住脚并发展壮大，除了以军用技术优势去开发民品外，根本出路是开发和生产高可靠的产品。美国声称，今后能竞争留存于世界市场的只有那些能掌握自己产品可靠性的企业。日本人则断言，今后产品竞争的焦点是可靠性。

七、研究提高产品的可靠性，经济效益显著

开展可靠性工作必然要投入必要的人力和物力，还要耗费大量的时间，这是否值得？这方面，国外开展可靠性研究工作过程的教训是可供借鉴的。美国开展可靠性研究的初期，也有人怀疑，甚至称可靠性为“富人科学”，“奢侈科学”。每当经费缩减时，就把可靠性研究项目砍掉。然而，人们从大量的不可靠装备造成的恶果中得到极深的教训，认为不搞可靠性不行。此外，人们还从武器装备需要昂贵的使用维修费中认识到可靠性工程是一门减少全寿命周期费用的最有效和最经济的科学。据国外统计，装备的研制费比采购费比后勤维修保障费等于1:3:6。可见维修费已达到惊人的地步，以至于出现研制得起，买不起，而买得起，维修保障不起的局面。因此，迫使领导和设计人员的设计思想发生变化，即从单纯的性能设计转变至效能（性能、可信性、可用性）设计。据美国有的公司统计，在研制阶段为改善可靠性与维修性所花的每一美元，将在以后使用中和后勤支援中节省30美元，也就是30:1的经济效益。可靠性与成本关系的典型曲线如图1.1所示。

可靠性经济效益不仅仅孕育于未来，大量的报偿将在使用后

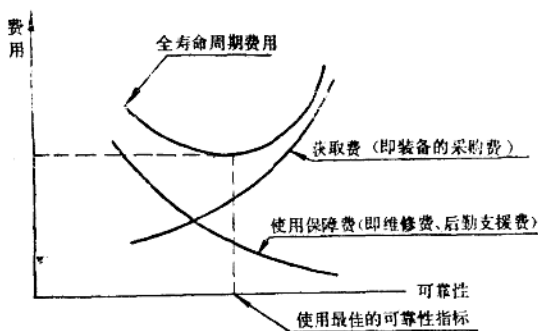


图1.1 可靠性与费用

的那些年代里以降低后勤保障费的形式得到，而且在研制中可以直接减少样机研制的次数，减少一轮样机，不仅节省大量资金而且节省时间。

至于民品可靠性的经济效益更是显而易见的，增加市场竞争能力，增加产量，减少“三包”费用和“赔偿”费用都是直接的效益。

第二节 国内外可靠性工程发展概况

一、国外可靠性工程发展

1. 美国的可靠性工程发展

可靠性工程诞生地在美国，40多年来发展十分迅速，特别是在军事装备和航天领域获得广泛应用，取得很大的成功。因此，了解可靠性工程的发展就必须首先了解美国的可靠性工程发展。

40到50年代——可靠性工程形成：

二次大战期间，当时德国V—1火箭的诱导装置和美国军用雷达与以往的电子设备相比，均达到更加精密程度，但在运输、贮存和使用中却大量出现因故障而丧失战斗力，导致人员的伤亡，甚至导致战役的失败。如美国对日作战的电子设备50%到达战场不能工作，海军电子设备在规定时间内，仅有30%的时间能有效工作。于是，德国火箭研制者之一R. Lusser首先利用概率乘法法则，认为 N 个部件组成的串联系统，其可靠度等于 N 个部件的可靠度的乘积，这就是现在常用的串联系统可靠性乘积定律，并以此算出V—1诱导装置可靠度为0.75，第一次定量表示产品的可靠性。美国则从电子管开始可靠性研究。1952年美国国防部成立了电子设备可靠性咨询小组，对电子产品的设计、制造、贮存、运输、使用等各方面问题进行深入调查研究，经过5年时间的努力，于1957年6月发表了《军用电子设备可靠性报告》，从此确定了美国可靠性工程发展的方向，成为美国可靠性工程发展奠

基础性文件，随后制定了许多可靠性标准、规范等。如《电子设备可靠性》，《电子设备可靠性保证大纲》等。

1954年美国正式召开第一届可靠性与质量管理学术交流会。

60年代——可靠性工程全面发展：

美国由于推行阿波罗计划，投入了大量的资金，对航天装置提出了极高的可靠性要求，大大推进可靠性工程的全面发展。例如，作为飞船的运载火箭，“土星”号共有760万个零件和元件，要求其可靠性相当于2万台电视机同时工作而不允许有一台发生故障。这样高的可靠性要求，除了大力提高元器件的可靠性之外，重要的是进行充分的可靠性设计。到了60年代中期，对可靠性的一些误解，例如“可靠性是电子领域的事情”。“搞可靠性要有高深的概率与数理统计”，“可靠性工程深奥，一般企业搞不了”等被排除了，使可靠性进入普及和全面发展时期。美国这一时期主要发展的是：

(1) 改善可靠性管理，建立可靠性研究机构。1965年美国国防部颁布 MIL—STD—785《系统与设备的可靠性大纲》，把可靠性与设计，试制及生产的工程活动结合起来，以保证在产品研制初期能预测并排除潜在的不可靠问题，从而获得良好的经济效益。经过4年的实践，1969年修改为 MIL—STD—785A。此外在空军罗姆航空发展中心组建可靠性分析中心。

(2) 制定可靠性试验标准，发展新的试验方法。1963年颁布 MIL—STD—781《可靠性试验(指数分布)》，1965年修改为781A，1967年进一步修改为781B，并改名为《可靠性鉴定试验及产品验收试验(指数分布)》。5年之内对标准修改两次，可见美国对可靠性研究的重视程度和研究的不断深入。这一标准在国际上得到广泛应用。为了缩短试验时间，又发展了两种新的试验方法，即加速寿命试验和快速筛选试验。

(3) 发展新的可靠性预计技术。1962年颁布 MIL—HDBK—217《电子设备可靠性预计》，1965年修改为217A，1979年修改为

217C。这本设计手册提供了大量的电子元器件可靠性数据和预计方法，被人们誉为电子设备可靠性的“圣经”，在世界各国得到广泛应用。1961年颁布MIL—STD—756《可靠性模型的建立与可靠性预计》，1963年修改为756A。60年代初，美国还颁布MIL—STD—721《可靠性和维修性术语的定义》。

(4) 开展失效物理研究，发展新的失效模式分析技术。1962年召开了第一届电子设备失效物理年会，1967年改名为可靠性物理年会，深入研究设备失效的机理，制定了MIL—STD—1629《故障模式、影响及危害度分析程序》。此外，对安全性也深入研究并制定了MIL—STD—822《系统及有关分系统、设备的安全性大纲》。

(5) 重视维修性研究。1963年颁布MIL—STD—470《维修性大纲要求》，1966年颁发MIL—STD—471《维修性鉴定，验收及评价》和维修性手册MIL—HDBK—472《维修性预计》，从而出现了以可靠性为中心的维修性理论。

(6) 创建可靠性教育。美国十分重视可靠性知识的普及和教育，到60年代后期，美国40%的大学都设置了可靠性课程，培养了大批的包括硕士和博士在内的各种可靠性工程技术专家。

70年代——可靠性工程进入成熟期，得到深入发展：

(1) 建立统一的可靠性管理机构，1978年2月成立了直属三军联合后勤司令部领导的可靠性、可用性和维修性联合技术协调组，该组下设系统管理，电子设备设计，电子设备试验，机械设备设计，机械设备试验和维修等六个分组，统一组织，协调国防部内各种可靠性工作，制定可靠性工作的政策和指导性文件。

(2) 成立全国统一的可靠性数据交换网。1970年正式成立政府—工业部门数据交换网，到1980年已有220个政府机构和404个工业组织参加该交换网。

(3) 重视机械可靠性研究。

(4) 改善可靠性设计及试验方法。例如，计算机可靠性辅助

设计, 研究设备可靠性预计的软件包, 研究非电子设备的可靠性设计与试验方法。1977和1978年先后成立机械设备可靠性设计及可靠性试验研究组织, 研究机械设备的可靠性。制定相应的新设计程序和试验程序。在可靠性试验中采用综合环境应力试验, 加强环境应力筛选试验, 发展可靠性增长试验, 1978年颁布MIL—STD—1635《可靠性增长试验》。

(5) 广泛运用以可靠性为中心的维修思想以及自测试设备, 提高维修水平。

(6) 开展软件可靠性研究。70年代由于微机的出现, 使计算机的应用出现高潮, 软件研究及应用更加迅速, 使一些计算机的软件费用已经超过硬件。而软件同样存在可靠性问题。于是1978年成立三军软件可靠性技术协调组来负责国防部范围内的可靠性研究与协调工作。

(7) 制定产品责任法。产品责任(PL)问题是指产品不可靠使消费者蒙受损失, 从而到法庭上起诉、为赔偿损害而争执的问题, 为此制定产品责任法, 使企业更感到可靠性的重要性。据1975年美国《质量进展》杂志的预测, 由于PL问题, 当年请求赔偿金额达500亿美元。

80年代——可靠性工程更受重视和成熟:

美国从实践中认识到过去装备过分追求先进的性能而对可靠性和维修性仍然重视不够, 致使装备完好率下降和后勤保障费用大幅度猛增。这一教训使美国国防部技术政策发生了变化, 即从过分追求先进性能转变为强调可靠性和维修性。于是国防部制定第一个可靠性及维修性条令, 即1980年正式颁布的5000.40条令《可靠性及维修性》。该条令规定发展各种武器的可靠性和维修性政策, 规定国防部各部门对可靠性及维修性的职责, 规定所有武器装备从一开始就要考虑可靠性和维修性, 条令还规定武器装备可靠性应包括可用性, 任务可靠性, 维修人力和后勤支援四个方面的指标。此外, 还修订和颁发一批可靠性标准和手册, 如表1.1。

表1.1 美国80年代颁发的可靠性军用标准及手册

标准代号	标准名称	颁发日期
MIL-STD-721C	可靠性及维修性的术语定义	1981.6.21
MIL-STD-756B	可靠性模型及预计	1981.11.18
MIL-STD-785B	系统及设备研制与生产阶段可靠性大纲模式、影响及危害度分析程序可靠	1980.9.15
MIL-STD-1629A	性增长管理	1980.11.24
MIL-HDBK-189	电子设备的可靠性预计	1981.2.13
MIL-HDBK-317D	工程研制鉴定及生产的可靠性试验	1982.2.15
MIL-STD-781D		1987

2. 苏联的可靠性工程发展

苏联早在1958年就曾统计过因产品的质量和可靠性问题而损失1500~2000亿卢布，认识到了可靠性工程的重要性。苏联可靠性工作的特点：一是重视对工程师普及可靠性知识，建立在总工程师领导下的可靠性工作机构，并把可靠性工作机构设在质量管理部门；二是重视可靠性理论研究，苏联不仅培养了一批如莫戈洛夫、斯米尔诺夫和马尔可夫那样著名的统计学家和可靠性理论专家，而且不少成果为世界公认，如马尔可夫过程就是可靠性维修性研究中常用的工具；三是注意研究实用的可靠性方法，如设计中采用降额与冗余以弥补苏联电子元器件可靠性较差的不足；四是积极吸收和引用美国的经验和标准；五是苏联对机械可靠性理论和方法都做较深入的研究，不少研究著作作为各国转载；六是重视可靠性信息工作，各工业部门都设有可靠性信息系统，使用户和主管工业部门有机联系起来，及时分析产品的可靠性变化趋势，评定可靠性对策的有效性。

3. 日本的可靠性工程发展

日本可靠性工作特点有四。一是把重点放在民用工业产品，不拘于理论意义，采取实用化应用可靠性的观点。这一点可以从我国近几年翻译的日本可靠性书籍中明显看出。二是日本在成功的质量管理基础上引入可靠性工程，两者紧密结合，效果十分显