

可靠性 工程与应用

KEKAOXING GONGCHENG
YU YINGYONG

主 编	赵东元	樊 虎	任志久	
副 主 编	刘 皓	郝富春	郑贤武	李松岩
执行主编	李向军	何新宏	纪晓罡	
主 审	秦英孝			



國防工業出版社
National Defense Industry Press

可靠性工程与应用

主 编

赵东元 樊 虎 任志久

副主编

刘 皓 郝富春 郑贤武 李松岩

执行主编

李向军 何新宏 纪晓罡

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

可靠性工程与应用 / 赵东元, 樊虎, 任志久主编. —北京: 国防工业出版社, 2009. 6

ISBN 978-7-118-06325-7

I. 可... II. ①赵...②樊...③任... III. 可靠性工程
IV. TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 065555 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 12 1/4 字数 336 千字

2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

前 言

可靠性是产品质量的重要指标之一,武器装备可靠性是使装备保持、提高战斗力的重要因素,它是设计出来、生产出来、管理出来的,必须在设计中赋予,在生产、管理中保证,在使用中发挥。

当前,随着科学技术迅猛发展,新技术、新材料在产品中的大量应用,以及产品复杂程度的提高和使用环境的严酷,对于作战和作战保障的武器、弹药、车辆、机械、器材、装具等装备,不仅要求性能优越,而且要求寿命长、故障少、易维修、易保障,并使其具有较高的作战效能和较低的寿命周期费用,以达到最佳的效费比。这是世界各发达国家孜孜探索的重要课题。然而,我国可靠性工作起步晚,无论从发展需求还是工程应用方面需解决的问题较多。为扭转这一被动局面,满足装备可靠性工作需求,必须加强可靠性技术的研究和管理工作,同时重视可靠性专业人才培养,提高设计与管理人員素质,以便在装备论证技术要求时,能论证和明确可靠性指标;在产品设计和研制过程中,能进行一系列有关设计和分析,并加强可靠性管理;在制定产品标准时,能将可靠性要求列入,并以此作为考核和鉴定产品性能和质量的重要依据;从国外引进装备和制造技术时,能注意同时引进产品的可靠性指标、设计和试验方法等技术。

由国防科工委组织我国著名可靠性专家、学者编著,国防工业出版社出版的《可靠性、维修性、保障性丛书》,是我国第一部可靠性巨著,它从理论上、方法上对可靠性技术与管理作了系统、严密的论述,对促进我国可靠性工程的普及、发展和应用奠定了坚实的基础。为了方便驻厂(所)军事代表以及从事武器装备研制、生产、使用、管理的科技工作者学习参考,我们结合 GJB 450A《装备

可靠性工作通用要求》，参考国内外可靠性文献，编写了《可靠性工程与应用》一书。

全书分七章，第一章介绍了可靠性的基本概念、重要性及可靠性工程的发展历程；第二章介绍了可靠性特征量，产品常见的寿命分布、装备可靠性要求，人一机系统及软件可靠性问题；第三章介绍了系统可靠性模型的建立及可靠性分配、可靠性预计方法；第四章介绍了故障（失效）分析，故障模式、影响与危害性分析及故障树分析；第五章介绍了产品可靠性的具体设计技术；第六章介绍了环境应力筛选、可靠性增长试验、可靠性鉴定试验、可靠性验收试验、寿命试验与加速寿命试验以及装备外场可靠性试验；第七章介绍了装备可靠性管理与监督。全书内容紧密结合武器装备实际，注重可靠性技术的工程性，以及在武器装备研制、生产、使用中的应用，并对可靠性管理与监督的内容作了较大篇幅的论述。全书体系结构合理，语言通俗易懂，便于自学。

本书是集体劳动的成果。由赵东元、樊虎、任志久任主编，刘皓、郝富春、郑贤武、李松岩任副主编，李向军、何新宏、纪晓罡任执行主编，丁洪伟、于继华、王美义、刘少坤、刘永远、刘红旗、杜盼林、员志新、张军、胡勇、徐赫、高俊峰、高聪杰、寇烈、戴新生同志编写了有关章节初稿，陕西省兵器质量与可靠性专业委员会主任委员、中国管理科学研究院首席专家、原空军驻西北地区军事代表秦英孝老师对本书的编写给予了精心指导，审阅了全书初稿并提出许多宝贵修改意见，最后由编写组讨论修改定稿。在本书编写中，主要参考了杨为民、甘茂治、李良巧、何国伟、高社生、张玲霞、郑鹏洲、傅光民、万小平等老师的著作及国家军用标准，在此，对上述老师以及本书参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中内容定有不少缺点和错误，敬请专家及广大读者批评指正。

编者

2009年1月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 可靠性、可靠性工程概述	1
第二节 可靠性的重要意义和作用	17
第三节 可靠性工程的形成和发展	22
第二章 装备可靠性基础	29
第一节 可靠性特征量	29
第二节 维修性、可用性与系统效能特征量.....	49
第三节 产品常用的寿命分布	56
第四节 装备可靠性要求	65
第五节 关于人一机系统及软件可靠性问题	83
第三章 装备可靠性设计	94
第一节 可靠性设计有关概念	94
第二节 系统可靠性模型	97
第三节 系统可靠性分配.....	109
第四节 系统可靠性预计.....	119
第四章 故障模式、影响与危害性分析和故障树分析	136
第一节 故障及故障(失效)分析	136
第二节 故障模式、影响及危害性分析(FMECA)	141
第三节 故障树分析(FTA)	152
第五章 产品可靠性设计方法	169
第一节 制定可靠性设计准则和确定可靠性 关键产品.....	169
第二节 电子产品可靠性设计方法.....	176

第三节	非电子产品可靠性设计方法·····	201
第四节	产品非工作状态可靠性设计方法·····	208
第六章	可靠性试验·····	216
第一节	可靠性试验概述·····	216
第二节	环境应力筛选·····	227
第三节	可靠性增长试验·····	242
第四节	可靠性鉴定试验和验收试验·····	257
第五节	寿命试验与加速寿命试验·····	275
第六节	装备可靠性外场试验·····	289
第七章	装备可靠性管理与监督·····	296
第一节	可靠性管理与监督概述·····	296
第二节	可靠性管理组织·····	308
第三节	可靠性计划与工作计划及评审·····	312
第四节	可靠性评审·····	322
第五节	可靠性过程管理与监督·····	339
第六节	元器件的可靠性管理·····	369
第七节	可靠性信息管理·····	383
参考文献 ·····		399

第一章 绪 论

可靠性是产品质量的重要指标,产品的可靠性水平是一个国家技术队伍素质、管理以及工业基础水平的重要标志。武器装备的可靠性是使装备保持、恢复、提高战斗力的重要因素。可靠性工程是研究产品的故障及其和故障作斗争的一系列技术与管理活动。

本章重点介绍可靠性、可靠性工程有关概念、重要性、形成与发展的历程以及与相关专业工程之间的关系等内容。

第一节 可靠性、可靠性工程概述

一、可靠性基本概念

(一) 可靠性的定义

可靠性的定义比较多,GJB 451A 的定义为:可靠性指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。

此定义中包含产品、规定的条件、规定的时间以及规定功能四个要素,并指出可靠性的特点是产品的一种能力。

(1) 产品——指研究的对象。因为产品不同其可靠性可能不同,不宜进行比较,因此,一提到可靠性就应明确是哪种产品的可靠性,这种产品包括哪些组成部分。有时某设备的一部分发生故障,但是由于人的控制并不影响完成规定的功能;有时,不是硬件问题,而是由于人或软件差错导致故障,所以还应指出研究对象是否包括人和软件。本书中所指的产品泛指元器件、零部件、组件、设备、分系统或系统(武器装备),可指硬件、软件或两者的结合。

(2) 规定的条件——指预先规定产品所受到的外部作用条件。所谓外部作用条件是指环境、使用 and 维修等条件。

环境条件包括自然环境条件和诱发环境条件。自然环境条件包括气候、地理等地球表面存在的各种因素。气候因素包括：温度、大气压、盐雾、尘埃、风、雨、雾、霜、冰、雷电、太阳辐射等。地理因素包括海拔高度、土壤、植物、动物、微生物等。诱发环境条件包括人工制造的和人工改变的两种环境条件，人工制造的是指人为放射现象、核爆炸冲击波、燃料燃烧引起的空气污染以及电磁干扰等；人工改变的是指人的活动对自然环境条件的作用而产生的环境条件，例如城市的存在引起地面和空气温度的升高，植物的变迁引起的水土流失和地面湿度的降低等。此外，诱发环境条件还包括振动、冲击、碰撞、跌落、惯性力等。

使用条件包括工作模式（是连续工作还是间歇工作）；工作时间和使用频度；输入信号的要求和误差；工作时能源特性和误差（如电压、电磁场强度等）；机械应力（静载荷/动载荷的振幅和频率）；设备的操作程序；使用人员的技术水平等。

维修条件包括维修体制、维修方式、维修人员的素质、维修设备和工具以及各种配置与供应等。

外部条件的各种因素都在其某个范围内随机地变化着，并且互相交织在一起作用于产品。

产品的可靠性受外部条件的影响很大，因此，必须在产品设计任务书中明确规定产品所处的条件。为了便于管理，有些环境条件已经标准化，例如日本将温度环境分为 13 种，湿度环境分为 4 种，振动环境分为 4 种。

(3) 规定时间——指产品能执行任务的时间。由于产品可靠性一般随时间延长而逐步下降，离开时间就无可靠性而言，而规定时间的长短又随产品对象不同和使用目的不同而异。例如，火箭系统要求在几秒或几分钟内可靠地工作；地下电缆、海底电缆系统则要求几十年内可靠地工作。产品的规定时间，是广义的时间或“寿命单位”，它可以是使用小时数（如电视机、雷

达、电机等),行驶千米数(如汽车、坦克)、射击发数(如枪、炮、火箭发射架),也可以是储存年月(如弹药、导弹等一次性使用而长期储存的产品)。

(4) 规定的功能——指产品的战术性能指标。要强调指出,这里所指的完成规定功能,是指完成所有规定功能而不是其中的一部分。如航炮的功能包括射速、射程和命中精度。只是射速和射程达到要求而命中精度达不到要求,就不能说它完成了规定的功能。在判断产品是否具有完成规定功能的能力时,人们往往有不同的理解,争执不休,因此必须明确规定故障(指产品不能执行规定功能的状态。它和产品丧失完成规定功能的能力事件的“失效”的定义相类似)判据。有的产品在规定的时间内不允许发生故障;有的虽发生小故障,但因人的控制(如修理)仍能使其在规定的时间内完成规定的功能,这时就允许小故障发生,计算可靠性时可以不考虑此故障。这一点也应该用故障判据规定出来。

综上所述,一提到可靠性,应明确是什么产品的可靠性,在什么条件下的、什么时间内的可靠性,故障判据是什么。例如,引信可靠性是引信在规定条件和规定时间内完成规定功能的能力,其规定条件包括引信在生产、勤务处理和使用过程中所经受的各种环境条件。其规定时间包括从成品交验、勤务处理、使用,一直到正常作用所经历的时间。其规定功能包括安全性、解除保险可靠性、引爆(燃)的适时性及完全性、抗干扰性等性能。

(二) 可靠性的分类

可靠性的分类方法很多,经常用到以下概念。

1. 基本可靠性与任务可靠性

研制、采购一个武器系统,一方面要求它有先进的技术性能和良好的使用效果,另一方面要求用户能负担起使用武器系统的费用(使用、维修与保障费用)。简单的说,对一个武器系统要买得起,也能用得起。这决定了武器系统可靠性设计的目标是:

(1) 提高武器系统的作战效能;

(2) 减少用户的费用。

如前所述,传统可靠性的定义是:“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”,这一定义本身是正确的,它是建立在统计数学基础上的。然而在工程设计使用时,就有局限性,它约束不了为实现上述两个目标的可靠性设计,因此,若把可靠性区分为基本可靠性和任务可靠性两个概念,用任务可靠性反映第一个可靠性设计目标,度量任务可靠性仅考虑那些影响完成任务的故障(产品功能故障)。用基本可靠性可以反映出第二个可靠性设计目标,即度量基本可靠性还要考虑所有引起维修(排除故障维修亦即非计划维修)的故障,而这些故障的发生未必都会影响产品规定的功能,这就更加科学。为了讨论基本可靠性和任务可靠性,先引入寿命剖面和任务剖面的定义:

1) 寿命剖面与任务剖面

寿命剖面与任务剖面是产品在研制、生产期间设计(包括可靠性设计)、分析、试验设计、综合保障分析等的依据。

“剖面”一词的含义是对所发生的事件、过程、状态、功能以及所处环境的描述。显然,事件、状态、功能及所处环境都与时间有关,因此这种描述事实上是一种时序描述。

剖面一般根据产品的用途、风险要求来制定。剖面是否符合产品工作的实际情况,将直接影响到产品的研制、生产的进度、寿命周期费用和使用质量。寿命剖面、任务剖面确定后,产品的功能要求和环境条件才可确定。此要求和条件即为该产品及其零、部、组件的设计要求。

剖面一般由订购方及其驻厂(所)军事代表提出,它是招标、选择承制方及签订合同或任务书的技术依据。

(1) 寿命剖面。

寿命剖面定义为: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。

寿命剖面说明产品在整个寿命期经历的事件,如装卸、运输、储存、检测、维修部署、任务剖面等以及每事件的持续时间、顺序、环境和工作方式。它包含一个或几个任务剖面。

例如,某型引信寿命剖面如图 1.1 所示。



图 1.1 引信寿命剖面示意图

寿命剖面对建立系统要求是必不可少的。由于多数武器系统的大部分时间处于非任务状态。这样在非任务期间由于装卸、运输、储存、检测所引起长时间的应力,将严重影响产品的可靠性。因此,必须把寿命剖面中非任务期间的状况转换为设计要求。

(2) 任务剖面。

任务剖面定义为: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。它还包括任务成功或出现致命故障的判断准则。

对于完成一种或多种任务的产品均应制定一种或多种任务剖面。任务剖面一般包括:

- ① 产品的工作状态;
- ② 维修方案;
- ③ 产品工作的时间与顺序;
- ④ 产品所处环境(外加与诱发的)时间与顺序。

任务剖面在产品指标论证时就应提出,假定任务剖面不能及早确定,那么与可靠性、维修性密切相关的重要的设计决策就不能考虑真实的工作状态。因此,精确的和比较完整的确定任务事件和预期的使用环境,是能否设计出满足使用要求的产品的必要条件。

任务剖面必须建立在最有效的数据基础上。目前有许多产品预计的使用和环境状况并不很科学,造成产品研制出来后,许多工作都花费在如何适应实际的需要以及必须的更改上。

例如,某型引信任务剖面如图 1.2 所示。

有在产品既无冗余又无代换工作模式情况下,基本可靠性模型与任务可靠性模型才一致。

2. 固有可靠性与使用可靠性

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的。固有可靠性是产品早在设计阶段就确定了的可靠性指标,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属性。但是,产品生产出来后要经过包装、运输、储存、安装、使用、维护保养、修理方式的影响,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,使用时的错误操作等造成失效。在这些环节中的可靠性称为使用可靠性。

1) 固有可靠性

指产品在设计和制造过程中赋予的,并在理想的使用和保障条件下所具有的可靠性。固有可靠性是可靠性的设计基准。对于具体产品设计、工艺确定后,其固有可靠性是固定的。

2) 使用可靠性

产品在实际环境中使用时所呈现的可靠性。它反映了产品设计、制造、使用、维修、环境等因素的综合影响。

3. 工作可靠性与不工作可靠性

许多产品往往是工作时间极短,而不工作(待命、储存等)时间较长,为此,可将可靠性区分为工作可靠性和不工作可靠性。

工作可靠性是指产品在工作状态所呈现出的可靠性。例如飞机的飞行,导弹、弹药的发射过程,车辆运行等是装备工作状态,其工作可靠性常用飞行小时、发射成功率、运行小时或千米数等来量度。

不工作可靠性是产品在不工作状态下所呈现出的可靠性。不工作模式包括:储存、静态携带(运载)、战备警戒(待机)或其他不工作状态,此时尽管装备不工作,但由于环境或诱导环境应力等的影响,装备也可能发生故障。例如:弹药、导弹、电子装备在储存过程中,由于高温、潮湿等因素影响而造成失效。

4. 硬件可靠性和软件可靠性

这是为适应软件产品迅速发展而提出的一种分类法。

所谓“硬件”,是指在传统上被看作是从完全相同的器件总体中取出的若干部分的一种组合。前面所述的可靠性定义均指硬件可靠性。

所谓“软件”是指“计算机程序过程、规则及与这些程序、过程、规则有关的文档和从属于计算机系统运行的“数据”。“数据”是用来被计算机设备接收、翻译和处理的~~结构形式~~所表示的事实、概念或规则。它们可以存储于计算机内,也可用计算机可读的形式存在于设备之外。

软件可靠性是指在规定的条件下和规定的时间内,软件不引起系统故障的能力。软件可靠性不仅与软件存在的差错(缺陷)有关,而且与系统输入和系统使用有关。

上述定义中:

(1) 规定条件:是指软件的使用(运行)环境,严格的说,描述软件可靠性所要求的使用环境主要是指对输入数据的要求和计算机当时的状态,而其他一切支持系统及因素都可假定为对软件是理想的。

(2) 规定时间:共有三种,第一种为“程序执行时间”。即处理机实际用于执行程序指令的时间。第二种为“日历时间”,即日常生活中所用时间。第三种为“程序的时钟时间”,即程序在计算机上运行时,从始至终所经历的时间。

5. 储存可靠性

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

许多产品交付以后,由于并非立即使用,而是要在仓库储存一段时间,由于期间库房环境的变化影响以及维护保养等原因,将使产品的可靠性发生变化。尤其对弹药、导弹等储存期限较长的产品,确定不同储存时间的产品可靠性将显得尤为重要,例如炮弹目前规定储存寿命为 15 年,即炮弹在 15 年内使用时,仍能完成规定

功能。有时要求给出炮弹储存若干年后可靠性的变化,以确定该批炮弹能否完成功能,这就是储存可靠性研究的问题。

二、可靠性工程

可靠性工程是指为了确定和达到产品可靠性要求所进行的一系列技术与管理活动。

可靠性工程的内容很多,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的可靠性。在时间上,这两个基本任务是交织在一起的。

确定产品可靠性就是通过各种途径,如可靠性预计、试验、系统可靠性分析等来确定产品的失效(故障)机理、失效模式以及各种可靠性特征量的全部数值或范围等。得到产品的可靠性是通过产品寿命周期中的一系列技术与管理措施来得到并提高产品可靠性,从而实现产品可靠性的最优化。

可靠性工程的内容,不同著作有不同的含义,本书根据 GJB 450A《装备可靠性工作通用要求》,将其分为以下三部分:

1. 可靠性设计与分析

可靠性设计与分析就是通过可靠性预计、分配、分析、改进等一系列可靠性工程技术活动,把可靠性定量要求设计到产品的技术条件和图样中去,从而形成产品的固有可靠性。它包括建立系统可靠性模型,进行可靠性预计、可靠性分配和各种可靠性分析(故障模式、影响及危害性分析、故障树分析、潜在通路分析、电路容差分析、贮备分析、耐久性分析、有限元分析,确定测试、储存、装卸、包装、运输及维修的影响分析,并提出必要的对策),以及选择和控制元器件、部件,确定可靠性关键部件等。

2. 可靠性试验

可靠性试验是对产品的可靠性进行调查、分析和评价的工程活动。其作用是通过试验结果的统计分析和失效分析,评价产品的可靠性,找出可靠性的薄弱环节,推荐改进建议以便提高产品的可靠性。GJB 450A 规定的可靠性试验包括:环境应力筛选、可

可靠性研制试验、可靠性增长试验、可靠性鉴定试验、可靠性验收试验、寿命试验与加速寿命试验、耐久性试验、可靠性强化试验、高加速应力试验等。

3. 可靠性管理

是指为确定和满足产品可靠性要求而必须进行的一系列组织、计划、协调、监督等工作。它包括制定可靠计划、可靠性工作计划,对承制方与转承制方和供应方的可靠性监督与控制,可靠性过程管理,可靠性评审,建立故障报告、分析和纠正措施系统(FRACAS),建立故障审查组织,可靠性增长管理,收集可靠性信息和进行可靠性教育以及驻厂(所)军事代表对可靠性工作的监督等。

可靠性工程内容涵盖了产品研制、生产、使用阶段的可靠性工作,以上三部分基本内容在不同阶段有不同的重点要求。

三、可靠性与相关专业的关系

当前,可靠性工程在国际上得到迅速发展,并与维修性、保障性、测试性、安全性、质量管理等工程专业密切相关,成为产品尤其是武器装备研制、生产、使用中保证装备战备完好性、任务成功性、维修人力费用和综合保障费用等要求指标实现的密不可分的重要工程技术,以下就其之间关系作一简述。

(一) 可靠性与维修性的关系

维修性是指产品在规定的条件下和规定的时间内,按规定的程序和方法进行维修时,保持或恢复到规定状态的能力。而维修性工程是为了确定和达到产品的维修性要求所进行的一系列设计、研制、生产、试验和管理工作。同可靠性一样,维修性也是一种重要的质量特性、它应在设计时注入。

装备可靠性与维修性的关系非常密切,主要表现在:

(1) 同战斗性能一样两者都是装备本身所固有的重要属性,它们研究的目标一致,都是和装备的故障作斗争,从而提高系统效能,降低全寿命周期费用。但它们是从不同的方向进行研究的。可靠性是从降低故障率方面进行研究,维修性是研究产品出了故