



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

现代引信技术丛书

Fuze Reliability Technology

引信可靠性技术

张亚 安晓红 ◎ 主编

- 引信可靠性技术的最新进展
- 引信可靠性体系的完整体现
- 引信可靠性成果针对性总结
- 典型的引信可靠性实例分析



国防工业出版社
National Defense Industry Press

引信可靠性技术

张 亚 安晓红 主编

國防工業出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书结合引信可靠性技术发展的实际,系统介绍了可靠性基本概念和引信可靠性技术,论述了可靠性指标与失效分布,研究了引信系统可靠性模型的建立,引信系统故障模式、影响及危害性分析,引信系统故障树分析等引信可靠性分析方法及其在引信中的应用,简述了引信可靠性预计、分配与评估,引信机构可靠性分析和引信产品可靠性试验技术,并对引信系统可靠性设计原理及方法进行了重点介绍。

本书可作为引信专业本科、研究生教材,也可作为从事引信专业研究和设计的工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

引信可靠性技术/张亚,安晓红主编. —北京:国防工业出版社, 2016.4

(现代引信技术丛书)

ISBN 978-7-118-10829-3

I. ①引… II. ①张… ②安… III. ①引信—可靠性
IV. ①TJ43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 116990 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)

北京嘉恒彩色印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 333 千字

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

《现代引信技术丛书》

编委会

名誉主任 马宝华

执行主任 范宁军 姜文忠

编委会委员 (按姓氏拼音排序)

陈慧敏 邓宏彬 冯 跃 何光林 李世中

李晓峰 牛兰杰 申 强 宋荣昌 隋 丽

王军波 吴炎烜 熊永家 杨 喆 张 亚

丛书策划 王京涛

秘 书 吴炎烜 冯 晨

审委会

主 任 朵英贤

副 主 任 黄 峥 秦光泉 谭惠民 游 宁

审委会委员 (按姓氏拼音排序)

蔡瑞娇 陈科山 崔占忠 冯顺山 傅调平

高春清 韩子鹏 胡景林 李长福 李世义

刘明杰 刘小虎 牛少华 齐杏林 施坤林

石 坚 石庚辰 宋遵志 徐立文 徐立新

伊福廷 袁 正 张菁华 邹金龙

引信是利用目标、环境或指令信息，在预定的条件下解除保险，并在有利的时机或位置上起爆或引燃弹药战斗部装药的控制系统（或装置）。弹药是武器系统的核心部分，是完成既定战斗任务的最终手段。引信作为弹药战斗部对目标产生毁伤作用或终点效应的控制系统（或装置），始终处于武器弹药战场终端对抗的最前沿。大量实战案例表明：性能完善、质量可靠的引信能保证弹药战斗部对目标实施有效毁伤，发挥武器弹药作战效能“倍增器”的作用；性能不完善的引信则会导致弹药在勤务处理时、发射过程中或发射平台附近过早炸，遇到目标时发生早炸、迟炸或瞎火，不仅贻误战机，还可能对己方和友邻造成严重危害。

从严格的学科分类意义上讲，“引信技术”并不是一个具有相对独立的知识体系的学科或专业，而是一个跨学科、专业的工程应用综合技术领域。因此，现代引信及其系统是一类涉及多学科、专业知识的军事工程科技产品。纵观历史，为了获取战争对抗中的优势，人们总是将自己的智慧和最新科技成果优先应用于武器装备的研制和发展。引信也不例外，现代引信技术的发展一方面受到武器弹药战场对抗的需求牵引，另一方面受到当代科学技术进步的发展推动。

近30年来，随着人类社会进入以信息科技为主要特征的知识经济时代，作战方式发生了深刻的变化，目标环境也日趋复杂。为适应现代及未来作战需求，高新技术武器装备得到快速发展，弹药战斗部新原理、新技术层出不穷，促使现代引信技术在进一步提高使用安全性和作用可靠性的同时，朝着多功能、多选择，以及引爆—制导一体化、微小型化、灵巧化、智能化和网络化的方向快速发展。

“现代引信技术丛书”共12册，较系统和客观地反映了近30年来现代引信技术部分领域的理论研究和技術发展的现状、水平及趋势。丛书包括：《激光引信技术》《中小型智能弹药舵机系统设计与应用技术》《引信安全系统分析与设计》《引信环境及其应用》《引信可靠性技术》《高动态微系统与MEMS引信技术》《现代引信装配工程》《引信弹道修正技术》《高价值弹药引信小子样可靠性评估与验收》《弹目姿轨复合交会精准起爆控制》《侵彻弹药引信技

术》《引信 MEMS 微弹性元件设计基础》。

这套丛书是以北京理工大学教师为主，联合中北大学及相关科研单位的教师 and 研究人员集体撰写的。这套丛书的特色可以概括为：内容厚今薄古；取材内外兼收；突出设计思想；强调普适方法；注重科技创新；适应发展需求。这套丛书已列为 2015 年度国家出版基金项目，既可作为从事兵器科学与技术，特别是从事弹药工程和引信技术的科技工程专业技术人员和管理人员的使用工具，也可作为高等学校相关学科专业师生的教学参考。

这套丛书的出版，对进一步推动我国现代引信技术的发展，进而促进武器弹药技术的进步具有重要意义。值此丛书付梓之际，衷心祝贺“现代引信技术丛书”的出版面世。



2016 年 1 月

随着科学技术的发展,可靠性技术已成为与国民经济和国防科技密切相关的、迅速发展的综合学科,世界各国对此都高度重视。我国的可靠性研究工作发展很快,并通过可靠性技术的开发与应用,已在民用产品和武器装备的研制中获得了良好效果。

可靠性是军用产品的首要质量指标。在武器系统中,引信可靠性历来为设计、研制和使用部门所重视,在战场上,引信不可靠将导致军事任务不能完成或危及己方人员的生命。因此,引信的生产部门和使用部门都把可靠性问题放在重要的地位。

20世纪80年代以来,企业、研究所和院校相继开展了可靠性研究,从事产品可靠性工作的专业队伍不断壮大。“产品的可靠性是设计出来的、生产出来的、管理出来的”这一思想越来越被人们所理解。但是,专门介绍引信可靠性技术的书籍比较少,为此,作者结合近30年来的科研和教学实践成果,编著了本书。全书共9章:第1、2章主要介绍可靠性基本概念、可靠性设计程序,论述可靠性主要数量指标、可靠性指标确定、失效分布形式等基础知识;第3~8章介绍引信可靠性设计原理、分析方法及其在引信中的应用,主要包括引信系统可靠性模型的建立,引信系统故障模式、影响及危害性分析,引信系统故障树分析,引信可靠性预计、分配与评估,引信机构可靠性分析,引信系统可靠性设计等;第9章介绍引信产品可靠性试验,包括可靠性试验分类、环境试验内容、引信寿命试验等。本书在阐述理论的前提下,紧密结合引信产品的工程实践,例举了大量实例,内容完整,针对性强,实用性强。

参加本书编写工作的有张亚(第1章)、安晓红(第2章)、赵河明和赵海峰(第3章)、顾强(第4章)、袁泽慧(第5章)、彭志凌(第6章)、罗小林(第7章)、马慧明(第8章)、王锋(第9章)。全书由张亚、安晓红统稿。刘帅、徐康杰、刘恒、张勇、刘曼、周雪丽、梁国强、向金鑫、武晨飞、武园园、刘时华、和晓杰、王瑾、牟春阳、杨鹏飞等硕士研究生参与了资料整

理和插图处理工作。本书在编写过程中引用和参考了诸多文献资料，在此谨向原作者表示衷心感谢！

由于作者水平有限，编写时间仓促，书中难免有不妥之处，恳请有关专家和广大读者批评指正。

作 者
2016 年 2 月

第1章 绪论	1
1.1 可靠性概论	1
1.1.1 可靠性的基本概念	1
1.1.2 可靠性的特点	5
1.2 可靠性工程的基本内容	6
1.2.1 产品的寿命循环期	6
1.2.2 产品可靠性工程的基本内容	7
1.3 可靠性设计程序	7
1.4 引信可靠性技术	9
1.4.1 可靠性技术	9
1.4.2 引信可靠性技术	11
第2章 可靠性指标与失效分布	12
2.1 可靠性主要指标	12
2.1.1 特征量的估计值	12
2.1.2 特征量的外推值	12
2.1.3 特征量的预测值	12
2.1.4 可靠性特征量	12
2.2 可靠性指标确定	18
2.2.1 产品在寿命期内可靠性变化规律	19
2.2.2 可靠性指标论证	20
2.2.3 确定系统可靠性指标的原则和方法	22
2.3 失效分布形式	23
2.3.1 指数分布	23
2.3.2 正态分布	24
2.3.3 对数正态分布	25
2.3.4 威布尔分布	26
第3章 引信系统可靠性模型的建立	28
3.1 系统可靠性模型与框图	28

3.1.1	系统的定义	28
3.1.2	基本可靠性模型和任务可靠性模型	29
3.1.3	系统的结构框图与可靠性框图	29
3.1.4	建立系统可靠性模型的程序	31
3.2	系统可靠性模型的建立	33
3.2.1	串联系统	33
3.2.2	并联系统	35
3.2.3	混联系统	36
3.2.4	储备系统	37
3.2.5	复杂系统	40
3.3	引信及其机构的可靠性模型	44
3.3.1	引信系统可靠性模型及可靠度表达式	44
3.3.2	引信安全系统基本结构及可靠性模型	48
第4章	引信系统故障模式、影响及危害性分析	51
4.1	故障分析	52
4.1.1	基本概念	52
4.1.2	故障的分类	53
4.1.3	故障判据	54
4.1.4	故障模式和故障机理	54
4.2	故障模式及影响分析	56
4.2.1	分析方法	56
4.2.2	分析的依据	56
4.2.3	确定严酷度类别	57
4.2.4	故障模式及影响详细分析的程序	57
4.3	危害性分析	61
4.3.1	定性分析	61
4.3.2	定量计算	61
4.3.3	危害性	61
4.3.4	危害性分析工作程序	62
4.4	确定系统关键件和重要件	64
4.5	引信故障 (失效) 模式分析	64
4.5.1	引信故障 (失效) 模式分类	65
4.5.2	确立引信失效模式的原则	66
4.5.3	确立失效模式的步骤和要求	67
4.5.4	某型无线电近炸引信失效模式分析	68

4.5.5 引信通用失效模式 69

4.6 引信系统进行故障模式、影响及危害性分析注意事项 72

4.7 引信系统 FMECA 步骤 74

4.8 典型引信系统 FMECA 分析示例 75

第 5 章 引信系统故障树分析 79

5.1 故障树的建立和数学描述 80

5.1.1 故障树名词术语和符号 80

5.1.2 建立故障树的一般步骤和原则 84

5.1.3 故障树的数学描述 86

5.2 故障树的定性分析 88

5.2.1 割集与最小割集 88

5.2.2 求最小割集的方法 88

5.3 故障树的定量计算 91

5.3.1 计算顶事件发生的概率 91

5.3.2 底事件的重要度分析 95

5.4 引信故障树底事件数据的确定 96

5.4.1 引信故障树底事件数据的收集方法与底事件分类方法 97

5.4.2 底事件概率基值及概率计算 99

5.5 引信系统故障树分析 106

5.5.1 引信系统故障树顶事件确定 107

5.5.2 引信系统故障树基本结构 108

5.5.3 建立引信系统故障树举例 115

第 6 章 引信可靠性预计、分配与评估 121

6.1 引信可靠性预计 121

6.1.1 可靠性预计的定义及目的 121

6.1.2 可靠性预计的程序 122

6.1.3 引信可靠性预计 123

6.1.4 引信储存可靠性预计 131

6.2 引信可靠性分配 133

6.2.1 考虑重要度和复杂度的分配法 134

6.2.2 最小工作量算法 135

6.2.3 评分分配法 137

6.2.4 容许故障概率法 140

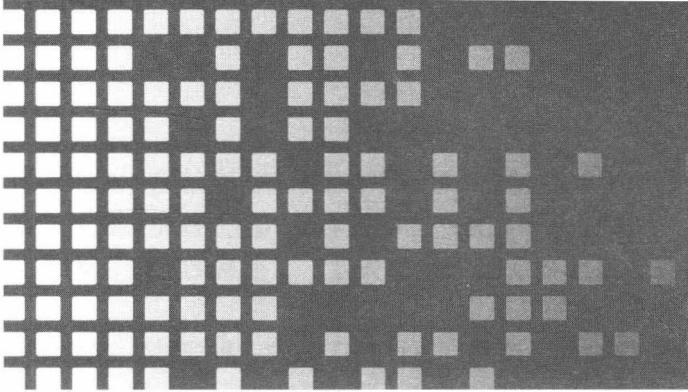
6.3 引信可靠性评估 142

6.3.1 可靠性评估的意义 142

6.3.2	可靠性评估方法	144
6.3.3	引信的可靠性评估	148
第7章	引信机构可靠性分析	151
7.1	机构强度可靠性设计和分析	151
7.1.1	应力与强度干涉理论概念及干涉情况分析	152
7.1.2	应力—强度干涉理论的概率计算方法和举例	155
7.2	机构运动可靠性分析	160
7.2.1	机构运动可靠性基本模型	160
7.2.2	机构运动可靠性的计算方法	161
7.3	引信自调延期机构的可靠性分析举例	163
7.3.1	引信自调延期机构的结构与工作原理	163
7.3.2	引信自调延期机构可靠性模型的建立	164
7.3.3	引信零部件结构参数服从分布规律	164
7.3.4	引信自调延期机构可靠性仿真模型	165
7.3.5	引信的自调延期机构可靠性仿真	166
第8章	引信系统可靠性设计	168
8.1	引信系统可靠性设计程序	168
8.2	引信系统可靠性设计准则	171
8.2.1	制定可靠性设计准则的意义	171
8.2.2	制定可靠性设计准则的方法	172
8.2.3	可靠性设计准则的主要项目	173
8.2.4	引信系统可靠性设计准则	173
8.3	引信冗余设计	174
8.3.1	敏感装置的冗余设计	175
8.3.2	延期管的冗余设计	176
8.3.3	引信安全系统的冗余保险设计	178
8.4	引信系统的防错、容错及故障保险设计	178
8.4.1	引信防错、容错设计	178
8.4.2	引信故障保险设计	179
8.5	耐环境设计	180
8.5.1	热设计	180
8.5.2	防冲击和防振动设计	180
8.5.3	防潮湿、霉菌和盐雾设计	182
8.6	参数漂移和容差分析	183
8.6.1	参数漂移的定量描述	185

8.6.2	容差设计的方法	187
8.6.3	防止参数漂移的措施	197
8.7	潜在通路和兼容性分析	197
8.7.1	引信潜在通路分析	198
8.7.2	引信兼容性分析	202
8.8	引信系统中元器件、零部件的选择、控制与降额使用	206
8.8.1	引信系统中元器件、零部件及关键件和重要件的选择 与控制	207
8.8.2	元器件、零部件的降额设计与使用	212
第9章	引信产品可靠性试验	219
9.1	环境应力与失效的关系	219
9.1.1	温度应力对产品的影响	219
9.1.2	湿度对产品的影响	219
9.1.3	温度冲击对产品的影响	220
9.1.4	机械冲击和振动对产品的影响	220
9.1.5	环境试验	221
9.2	可靠性试验分类	224
9.2.1	筛选试验	224
9.2.2	老化试验	224
9.2.3	型式试验 (验证试验、定型试验)	224
9.2.4	强化试验	225
9.2.5	寿命试验	225
9.3	引信强化试验	225
9.3.1	受试对象的数量要求	225
9.3.2	应力的选择原则	226
9.3.3	试验设备	227
9.3.4	强化应力施加顺序	228
9.3.5	强化试验流程	228
9.3.6	应力的步进施加方式	229
9.3.7	强化试验终止判据	229
9.4	引信寿命试验	230
9.4.1	寿命试验类别	230
9.4.2	寿命试验设计方法	230
9.4.3	步进加速寿命试验	231
9.4.4	步进应力试验的实施步骤	231

9.4.5	最高应力的确定	232
9.4.6	步进应力试验的累积退化模型	232
9.4.7	步进应力试验概率统计的累积失效模型	233
9.4.8	步进应力试验的效率仿真和最优设计	234
9.4.9	步进应力试验的统计分析和精度问题	234
9.4.10	步进应力试验结果分析	234
参考文献		236



1

第1章 绪论

可靠性问题的研究是从第二次世界大战中开始的。几十年来，可靠性技术发展十分迅速，特别是在军事装备和航天领域获得了广泛应用，取得了很大成功。同时，可靠性技术已成为多种学科的边缘学科，从航空、宇航、兵器工业等行业普及到民用工业。

1.1 可靠性概论

1.1.1 可靠性的基本概念

GJB 451A—2005《可靠性维修性保障性术语》中对可靠性定义为：“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。”

产品的可靠性，首先是与规定的条件相关的。规定的条件是指产品所处的环境条件、负荷条件及工作方式等。环境条件包括气候环境（温度、湿度、气压、辐射、霉菌、雾、风、沙、工业气体等）和机械环境（冲击、振动、离心、碰撞、跌落、摇摆、引线疲劳、变频振动等）。负荷条件包括所加电压、电流的大小和它所处的电场条件等。工作方式可分为连续工作和间断工作等。同一产品在不同的条件下它的可靠性是不一样的。

产品的可靠性是时间的函数，随着时间的推移，产品的可靠性会越来越低。产品的可靠性是有时间性的，在设计产品时通常要考虑产品的使用期、保险期或有效期等。引信的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。

产品的可靠性与规定的功能有着极为密切的联系。产品规定的功能是指产品的性能指标，例如，火炮的射程、射速，弹丸的威力，引信的灵敏度、瞬发度，电阻的阻值、功率、精度，电容的容量、耐压、绝缘电阻，晶体管的放大倍数、反向漏电流等。

产品的可靠性，可以针对产品完成的某一种功能而言，也可以针对其多种功能的综合而言。因此，在讨论某一具体产品的可靠性以前，首先必须对产品在哪种情况下称为不可靠，在哪种情况下称为失效，有明确的规定。也就是说，对产品故障的失效判据标准加以规定。

可靠性是产品的一种“能力”，说明可靠性是产品的一种属性。产品制造出来后，其可靠性就基本确定了。因此可以说，可靠性是设计出来的，制造是保证设计可靠性的实现，可靠性在使用过程中才表现出来。

一般将产品、规定时间、规定条件、规定功能和能力称为可靠性的五要素。

1. 基本可靠性和任务可靠性

在进行可靠性设计时需综合权衡完成规定功能和减少用户费用两个方面。例如：可靠性设计中常采用冗余技术来提高整个系统完成任务的概率，但是，冗余技术将使系统复杂化，因而增加故障发生的概率，导致增加维修（包括人力、备件等）及后勤保障的需要，也就是增加了用户的费用。因而，提出了基本可靠性和任务可靠性的概念。

基本可靠性即产品在规定条件下和规定时间内，无故障工作的能力。基本可靠性与规定的条件有关，即与产品所处的环境条件、应力条件、寿命周期有关，也就是与寿命剖面确定的条件有关。寿命剖面即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、部署等，以及每个事件的持续时间、顺序、环境和工作方式。它包含一个或几个任务剖面。

引信寿命剖面如图 1-1 所示。



图 1-1 引信寿命剖面

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。

任务可靠性即产品在规定的任务剖面内完成规定功能的能力。任务可靠性是衡量产品完成规定任务的能力，反映产品在规定的维护修理使用条件下，在执行任务期间某一时刻处于良好状态的能力。任务剖面即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，其中包括任务成功或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。

引信任务剖面如图 1-2 所示。

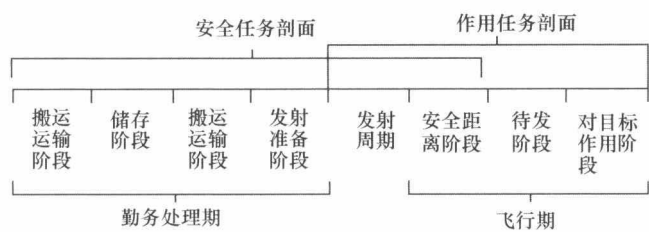


图 1-2 引信任务剖面示意图

任务剖面在产品指标论证时就应提出，如果任务剖面不能及早确定，与可靠性、维修性密切相关的重要设计决策就不能考虑真实的工作状态。因此，精确和比较完整地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需要以及必需的更改上。

2. 固有可靠性与使用可靠性

产品的可靠性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、修理等环节，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。固有可靠性是可靠性的设计基准。对于具体产品，在设计、工艺确定后，其固有可靠性是固定的。

(2) 使用可靠性是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。