

武器装备可靠性 评定方法

■ 刘春和 陆祖建 等 编著



中国宇航出版社

武器装备可靠性 评定方法

刘春和 陆祖建 等 编著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

武器装备可靠性评定方法/刘春和等编著. —北京: 中国
宇航出版社, 2009. 7

ISBN 978 - 7 - 80218 - 604 - 0

I. 武… II. 刘… III. 武器装备—可靠性—评价 IV. TJ01

中国版权图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 096235 号

策划编辑 易新

责任校对 王妍

责任编辑 易新

封面设计 姜旭 李嘉雄

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010) 68768548

网址 www.caphbook.com/www.caphbook.com.cn

经销 新华书店

发行部 (010) 68371900 (010) 88530478 (传真)
(010) 68768541 (010) 68767294 (传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010) 68371105 (010) 62529336

承印 北京智力达印刷有限公司

版次 2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230 开本 1/32

印张 11 字数 380 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 80218 - 604 - 0

定价 40.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

前 言

可靠性是武器装备的一项极其重要的指标，理所当然地受到世界各国和军队的高度关注。因此，不断地提高武器装备的可靠性，是世界各国和军队努力追求的目标。

可靠性是设计出来的，是生产工艺给予保证的，是在不断试验中增长的。而可靠性的实现必须依靠需求的强力牵引和科学的严格管理。因此各级领导和管理部门已经和正在制定各项可靠性管理的标准、条例、规范、规定等。可靠性评定管理是整个可靠性管理工作中的重要一环。为此，我们编写了《武器装备可靠性评定方法》一书。

本书是为需要了解和掌握武器装备可靠性评定方法的可靠性工程管理人员，有可靠性指标要求的新型号论证、定型、鉴定人员而编写的工具书，旨在规范和加强可靠性评定管理。本书对负责武器装备保障和火力计划制定的人员是不可缺少的案头书；对从事可靠性评定的专业人员和承担可靠性设计的研制人员也是很有价值的参考书。本书作者长期从事可靠性评定工作，对可靠性评定的历史和现状有较全面的了解，在编写本书时力求做到理论联系实际，在注重系统性的基础上突出实用性和可操作性，其具体特点如下：

第一，从使用部门的角度来研究可靠性，提出为使武

器装备符合作战需要,使用部门必须根据作战需求,切实、全面地提出可靠性指标要求;并对可靠性指标体系的定义和指标体系选取的原则作了论述。

第二,根据武器装备的特点,强调任务可靠度的概念,指出在产品失效率随着寿命时间变动(非指数分布)的情况下,任务可靠度不仅与任务时间有关,还与该产品已经历的工作和贮存时间有关;并给出了具体的计算方法。

第三,书中汇集了以往的武器装备可靠性评定中的主要方法,对一些有争议的评定方法没有收录。有兴趣的读者可通过所列参考资料了解其一二。

第四,书中收入的评定方法不一定是最好的,但可使读者对现有的评定方法有一个概貌的了解,通过所附的例题及答案对各个方法的优缺点有所了解,并能应用评定方法进行评定。

第五,随着可靠性工作的深入,产品的失效分布类型已不止二项分布、指数分布这一两种。不同失效分布类型产品的可靠性评定方法是不同的,即使是指数分布,同一组数据用单参数指数分布和双参数指数分布不同评定方法的结果也不同。这就要求对产品失效分布的类型必须有一个认定。第7章可靠性评定中的假设检验就是为此提供的。

第六,小子样是可靠性评定中经常遇到的问题。但随着可靠性评定工作深入持久地开展,许多产品都积累了许多相似甚至相同产品的信息。如何利用这些信息已成为一个十分重要又需慎重对待的问题。本书第4章数据类型与数据折合、第7章可靠性评定中的假设检验为解决此类问题提供了思路。

全书分7章。第1章为引言，阐明了本书编写的目的。第2章介绍可靠性概念和指标，第3章介绍各种失效概率分布类型，第4章介绍各种数据类型及环境因子，这三章是可靠性评定的基础理论部分。第5章和第6章是本书的重点。对于与可靠性评定相关但又可以单独处理的部分，如分布的假设检验、相容性检验、异常数据检验等，在第7章中介绍。书中介绍的所有评定方法，只给出了结果，未进行推导和证明。想进一步深入研究的读者，可参阅本书的参考文献。

本书第1章至第3章由刘春和和周巍编写，第4章至第6章由张仕念、李新俊、蔡军、宋亚男、孟涛等编写，第7章由陆祖建、刘雪峰、王首臻、王玉森等编写。在编写过程中徐福荣、王静等同志提出了许多宝贵意见，在此向他们表示衷心感谢。

由于作者水平有限，经验不足，错误和不当之处在所难免，欢迎读者和专家批评指正。

作 者

2009年1月

目 录

第 1 章 引 言	1
第 2 章 可靠性概念及指标	4
2.1 可靠性的基本概念	4
2.1.1 可靠性的定义	4
2.1.2 失效分布函数与平均寿命	5
2.1.3 可靠度函数与可靠寿命	9
2.1.4 失效率函数	12
2.1.5 任务可靠性与基本可靠性	18
2.1.6 固有可靠性与使用可靠性	20
2.1.7 条件概率、全概率公式与贝叶斯公式	21
2.2 可靠性指标体系	24
2.2.1 指标体系的定义	25
2.2.2 指标体系选取的原则	25
2.3 导弹武器的可靠性与维修性指标	26
2.3.1 与战备完好性有关的可靠性与维修性参数	27
2.3.2 与任务成功性有关的可靠性与维修性参数	27
2.3.3 与维修人力费用有关的可靠性与维修性参数	27
2.3.4 与装备保障费用有关的可靠性与维修性参数	27

第3章 失效概率分布	28
3.1 离散型失效概率分布	28
3.1.1 两点分布	29
3.1.2 二项分布	29
3.1.3 泊松分布	32
3.1.4 超几何分布	33
3.1.5 几何分布与负二项分布	34
3.2 连续模型失效概率分布	38
3.2.1 均匀分布	38
3.2.2 指数分布	40
3.2.3 威布尔分布	46
3.2.4 正态分布	50
3.2.5 伽马分布	56
3.3 关于选择失效分布类型的注释	60
 第4章 数据类型与数据折合	 63
4.1 数据类型	63
4.1.1 完全数据	64
4.1.2 II型截尾	64
4.1.3 I型截尾	64
4.1.4 区间数据	65
4.2 数据折合	66
4.2.1 相同产品的数据折合——环境因子	66
4.2.2 相似产品的数据折合	67
4.2.3 同类产品的数据折合	68

第 5 章 单元可靠性评定	69
5.1 二项分布单元可靠性评定	69
5.1.1 点估计	70
5.1.2 区间估计	70
5.2 指数分布单元可靠性评定	71
5.2.1 单参数指数分布	72
5.2.2 两参数指数分布	87
5.3 威布尔估计单元可靠性评定	96
5.3.1 两参数威布尔分布	96
5.3.2 三参数威布尔分布	110
5.4 正态分布单元可靠性评定	117
5.4.1 性能可靠性	117
5.4.2 寿命可靠性	121
5.4.3 结构可靠性	129
5.4.4 极小子样可靠性	135
5.4.5 防热可靠性	136
 第 6 章 系统可靠性评定	 139
6.1 不同成败型单元串联系统	139
6.1.1 MML 方法	140
6.1.2 L—M 方法	141
6.1.3 修正的 L—M 方法	141
6.2 相同成败型单元串联系统	145
6.2.1 成败型近似置信下限	145
6.2.2 指数寿命型近似置信下限	145
6.3 不同指数寿命型串联系统	147
6.3.1 R 的加权—算术平均近似置信下限	147

6.3.2	M 法	148
6.3.3	近似最优置信下限	148
6.3.4	定数截尾 M 法	149
6.3.5	不同指数寿命型单元串联系统的 MML 法	149
6.4	相同指数寿命型单元串联系统	156
6.4.1	成败型近似置信下限	156
6.4.2	指数寿命型近似置信下限	157
6.5	不同正态型单元串联系统	159
6.6	相同正态型单元串联系统	163
6.6.1	成败型近似置信下限	163
6.6.2	指数寿命型近似置信下限	163
6.7	相同成败型单元并联系统	167
6.7.1	成败型近似置信下限	168
6.7.2	指数寿命型近似置信下限	168
6.8	相同指数寿命型单元并联系统	170
6.8.1	成败型近似置信下限	171
6.8.2	指数寿命型近似置信下限	171
6.9	相同成败型单元的 $k/n(G)$ 系统	173
6.9.1	成败型近似置信下限	173
6.9.2	指数寿命型近似置信下限	174
6.10	相同指数寿命型单元的 $k/m(G)$ 系统	176
6.10.1	成败型近似置信下限	177
6.10.2	指数寿命型近似置信下限	177
6.11	不同单元组成的系统与相同单元组成的系统 的对比	179
6.12	不同类型可靠性数据计算与转换	183
6.12.1	利用产品可靠度 R 的极大似然估计 $E = \hat{R}$ 及其 渐近方差的极大似然估计 D 进行转换	183

6.12.2 利用产品置信度为 0.50 和其置信下限 $R_{0.50}, R_y$ 转换为成败型数据	184
6.13 一般复杂串联系统	185
6.13.1 成败型近似置信下限	185
6.13.2 指数寿命型近似置信下限	186
第 7 章 可靠性评定中的假设检验	191
7.1 分布的假设检验	191
7.1.1 皮尔逊 χ^2 检验法	191
7.1.2 柯尔莫哥洛夫检验	195
7.1.3 正态分布的柯氏检验	197
7.1.4 指数分布的柯氏检验	199
7.1.5 双参数威布尔分布的假设检验	201
7.1.6 分布的似然比检验	203
7.1.7 截尾子样下的柯氏检验	212
7.1.8 指数分布的拟合检验	215
7.1.9 威布尔分布的拟合检验	219
7.2 分布的相容性检验	222
7.2.1 两个指数分布的检验	222
7.2.2 指数分布的似然比检验	224
7.2.3 指数分布的 F 检验	227
7.2.4 两个威布尔分布的检验	229
7.2.5 两个威布尔分布的比较	232
7.2.6 两个正态分布的检验	234
7.2.7 符号检验法	237
7.2.8 秩检验法	238
7.2.9 Smirnov 检验	239
7.2.10 Cramer-von Mises 两样本检验	241

7.3 异常数据检验	243
7.3.1 指数分布异常数据的检验	243
7.3.2 威布尔分布异常值检验	248
7.3.3 正态分布异常值检验	250
附表	252
附表 1 $\beta(f_1, f_2)$ 分布的下侧分位点 $\beta_\alpha(f_1, f_2)$ 表	252
附表 2 满足 $P(\hat{r}_1/\hat{r}_2 < l_\alpha) = 1 - \alpha$ 的百分点 l_α	276
附表 3 满足 $P(G < z_\alpha) = 1 - \alpha$ 的百分点 z_α	278
附表 4 正态双侧容许限系数表(控制双尾)	280
附表 5 正态截尾样本时的区间统计系数表(基于 BLUE)	
$\frac{t_R - \mu^*}{\sigma^*}$ 的分位数	284
附表 6 W 分布的分位数值	292
附表 7 $V_{0.90}$ 的分布的分位数值	294
附表 8 $\frac{\bar{\mu} - \mu}{\hat{\sigma}}$ 的分布的分位数值	297
附表 9 极值分布参数 μ 和 σ 的 BLUE 的 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 的协方差 系数 $B_{r,n}$ 表	299
附表 10 极值分布参数简单线性无偏估计表	302
附表 11 柯氏检验的临界值 $D_{n,\alpha}$ 表	304
附表 12 柯氏检验统计量 D_n 的极限分布表	306
附表 13 $\hat{D}_n$ 的临界值 $\hat{D}_{n,\alpha}$ 表	308
附表 14 S_n^* 的临界值 $S_{n,\alpha}^*$ 表	309
附表 15 定数截尾子样, 统计量 D_r 的分布函数及临界值表 ...	310
附表 16 定时截尾子样, 统计量 D_0 的分布函数及临界值表 ...	317
附表 17 截尾子样, 统计量 D_0 的极限分布 $G(z)$ 分位点表	322

附表 18	双参数威布尔分布符合度检验时 S -统计量分布 的百分位数	324
附表 19	等样本容量 n 的两样本 Smirnow 检验统计量的分位数	332
附表 20	不等样本容量 n, m 的两样本 Smirnov 检验统计量的 分位数	333
参考文献		336

第1章 引 言

可靠性是评价产品质量好坏的一个重要指标，这个结论是从惨痛的教训中得到的。美国是开展可靠性研究最早的国家，其原因是在朝鲜战争中发现武器装备的电子产品大量失效，不但影响作战使用且维修费用超过了采购费用的10倍。1950年，美国国防部组建了研究电子设备可靠性的专门机构。该机构于1957年发表了研究报告，从而使可靠性工作逐渐开展起来。20世纪60年代，美国阿波罗计划成功实施的关键之一就是采用了可靠性技术。到70年代，先进的工业国家已将可靠性技术应用于很多民用产品，从制造厂到整个社会，产品的可靠性受到极大重视。武器装备的可靠性尤其重要，这是由于武器装备可能用于摧毁影响作战全局的敌方重要目标，一旦攻击失败，不仅不能打击敌人，而且还会毁伤自己，造成的直接、间接损失是十分巨大、难以估计的。这就要求武器装备具有很高的可靠性水平。

武器装备的下列特点给实现高可靠性带来了困难：

1) 武器装备复杂。武器装备随着性能要求的提高而越来越复杂，由成千上万个元器件组成，其中任意一个元器件失效都能导致整个武器装备失效。以某武器系统由1万个元器件组成为例，每个元器件的可靠度为0.9999，这已称得上万无一失，而全系统的可靠度只有0.3679。这就对元器件的可靠性提出了非常高的要求。

2) 使用条件恶劣。武器装备要在各种气候条件和环境条件下使用，采用各种运输工具运输，特别是在使用条件下要承受很大的冲击载荷和气动力。这就要求其结构有足够的强度，所有设备要经得起“折腾”，而且所有参数变化应在允许范围内。

3) 战斗环境复杂。武器装备本身必然是敌方首选的袭击目标,这种袭击可能是巡航导弹、弹道导弹,也可能是航空兵;可能是携带巨大威力炸药的硬摧毁,也可能是进行电子干扰的软毁伤。为了提高战斗环境下的生存能力,对其可靠性提出了更高的要求。

由此可见,武器装备的可靠性是一个相当重要又涉及很广的问题,必须引起高度重视,并狠抓落实。

那么,作为使用方怎样来抓可靠性工作的落实呢?根据多年的实践来看,首先要抓好两条,一是根据作战需求切实、全面地提出可靠性指标要求,二是要切实抓好对可靠性指标的评定。第一条比较容易理解,如果没有根据作战需求,切实、全面地提出指标要求,研制出来的产品是不可能符合作战需求的。关于第二条,如果使用方不在可靠性指标评估上“较真”,研制方是很难认真对待的。因为要提高产品的可靠性并给出评定值,需要开展很多工作,增加很多投入。而武器装备通过验收后交付部队,通常经过长期贮存后才使用,这时即使出现问题,研制方的责任也相对较小,这就要求使用方必须在可靠性评定上“较真”,才能得到满足可靠性指标要求的产品。因此,可靠性评定是使用方在可靠性工作中必须抓紧的一环,有着十分重要的意义。可靠性评定的意义如下:

1) 通过评定,检验产品是否达到了可靠性指标要求,为通过或拒绝产品定型、接收或拒绝批产品提供依据。

2) 通过评定,指明产品的薄弱环节及其严重程度,为采取改进措施提供方向。

3) 通过评定,明确产品的可靠性水平,为制定作战计划提供依据。

4) 通过评定,明确产品上各个部件的可靠性水平,为制定维修计划、备件配备及维修力量的配置提供依据。

5) 促进可靠性设计的正常开展,包括进行可靠性指标的分配、预计,针对环境因素进行设计,选用推荐的元器件、原材料及工艺措施等。

6) 促进可靠性试验和试验信息收集工作正常有序地进行。

7) 促进可靠性管理有效进行。

从以上几点可以看出,可靠性评定不仅是可靠性专业人员的事情,也是全体参加新型号论证、跟踪、定型、鉴定人员及负责装备保障和制定火力计划人员应该关心的事情。

多年来在军地两方面的共同努力下,在理论研究与型号评定的实践中,武器装备的可靠性评定均取得了长足的进步。虽然在理论研究中有些问题还没有完全解决,在型号评定中也出现过一些争论,但总的来说成绩很大,取得了不少成果。本书汇集了其中主要的可靠性评定方法,供有关管理人员和科研人员参考。

第2章 可靠性概念及指标

2.1 可靠性的基本概念

2.1.1 可靠性的定义

可靠性是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。

在将这个定义应用到具体产品时,要特别注意这3个规定和1个能力。

2.1.1.1 规定的时间

规定的时间是可靠性定义中的核心,因为不谈时间就无可靠性而言,而规定时间的长短又随着产品对象不同和使用目的不同而各异。例如,对发射卫星的运载火箭的要求是在几十秒或几分钟内可靠;对一般的电视机则要求在几千小时到几万小时内可靠。一般来说,产品的可靠性是随着产品使用时间的延长而逐渐降低的。因此,一定的可靠性是对一定时间而言的。

2.1.1.2 规定的条件

规定的条件一般是指使用条件、维护条件、环境条件和操作技术。对导弹来讲,由于其长期贮存、机动作战、定期检测及可维修的特点,还特别规定了贮存环境条件、运输条件、检测周期及维修条件、保障条件等。

这些条件对产品的可靠性都会有直接的影响,在不同的条件下,同一产品的可靠性也不一样。例如,实验室条件与现场使用条件就不一样,其可靠性有时可能相近,有时可能会相差几倍到几十倍。