

特种机械可靠性鉴定 试验设计与评估

吴大林 杨玉良 赵建新 张亚欧 董光玲◎编著

SPECIAL MACHINERY RELIABILITY
TEST DESIGN AND EVALUATION

特种机械可靠性鉴定试验 设计与评估

吴大林 赵建新 杨玉良 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书针对特种机械——火炮可靠性鉴定试验现状,结合近年来取得的科研成果,采用理论分析与工程试验相结合的研究方法,从工程应用的角度,详细介绍了火炮可靠性鉴定试验设计与评估的方法,主要内容包括可靠性鉴定试验的基本概念、分类、一般程序,可靠性鉴定试验影响因子分析、基于威布尔分布的可靠性鉴定试验方案设计、可靠性鉴定试验综合设计技术研究、可靠性鉴定试验设计技术、基于性能退化的台架和仿真可靠性试验技术以及基于信息融合的可靠性鉴定试验评估方法等。

本书可供从事火炮装备论证、设计和试验验证的工程技术人员使用,也可供从事其他武器装备可靠性试验领域研究的工程技术人员学习、使用和参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

特种机械可靠性鉴定试验设计与评估 / 吴大林等编
著. —北京:北京理工大学出版社, 2022.3
ISBN 978-7-5763-1159-4

I. ①特… II. ①吴… III. ①机械设计-可靠性设计-评估 IV. ①TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第045034号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本 / 710毫米×1000毫米 1/16

印 张 / 13

字 数 / 157千字

版 次 / 2022年3月第1版 2022年3月第1次印刷

定 价 / 68.00元

责任编辑 / 徐 宁

文案编辑 / 邓雪飞

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

可靠性是装备在规定的时间内和规定的条件下完成规定功能的能力，是新型火炮的重要性能指标之一。传统可靠性的分析对象是寿命信息，但是随着科技的进步，设计、制造技术以及使用材料的不断提高与改善，武器装备的可靠性越来越高，寿命越来越长，在相对短期内无法获取足够的失效数据，因此很难利用传统的可靠性理论对装备进行可靠性评估。一方面，装备在试验和使用过程中获得的性能退化数据、专家等信息中包含了准确、丰富且与寿命非常相关的信息，是可靠性分析的一个丰富信息源；另一方面，一些统计学习理论、信息融合理论的发展，也为装备部件和系统的可靠性分析提供了有效的方法和理论。

鉴于此，针对传统可靠性鉴定试验方法与实际工程应用不相适应的问题，本书在分析装备试验的小样本寿命信息、性能退化信息等多源可靠性

信息特点的基础上，深入研究了相关的可靠性评估技术和理论。

本书采用理论分析与工程试验相结合的研究方法，从工程应用的角度，详细介绍了特种机械——火炮可靠性鉴定试验设计与评估的方法，主要内容包括可靠性鉴定试验的基本概念、分类、一般程序，可靠性鉴定试验影响因子分析、基于威布尔分布的可靠性鉴定试验方案设计、可靠性鉴定试验综合设计技术研究、可靠性鉴定试验设计技术、基于性能退化的台架和仿真可靠性试验技术，以及基于信息融合的可靠性鉴定试验评估方法等。

本书由吴大林、杨玉良、赵建新、张亚欧和董光玲合作撰写。第1、5、6章由吴大林撰写，第2、3章由杨玉良撰写，第4章由赵建新撰写，第7章由张亚欧和董光玲撰写。全书由吴大林统稿。

本书是作者多年科研成果的积淀，感谢杨艳锋和化斌斌博士对本书的贡献，在编写中参考了许多专著和论文，他们的成果丰富了本书的内容，在此一并表示感谢。

限于作者学识水平，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2021年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.3 本书主要内容.....	9
第 2 章 火炮可靠性试验与评定	11
2.1 可靠性试验.....	11
2.1.1 可靠性试验的基本概念.....	11
2.1.2 可靠性试验分类及要素.....	14
2.1.3 可靠性试验计划和程序.....	17
2.1.4 可靠性试验结果评定.....	20
2.2 火炮可靠性试验.....	21

2.2.1	火炮可靠性试验特点	21
2.2.2	火炮可靠性试验指标	22
2.3	可靠性鉴定试验	24
2.3.1	试验方案的设计	25
2.3.2	故障分类与判据	29
2.3.3	试验流程	30
第3章	火炮可靠性鉴定试验影响因子分析	37
3.1	试验剖面的影响	38
3.1.1	试验剖面概述	38
3.1.2	火炮可靠性鉴定试验剖面问题探讨	40
3.2	统计方案的影响	41
3.2.1	统计方案概述	41
3.2.2	火炮可靠性鉴定试验统计方案问题探讨	48
3.3	故障判别与统计的影响	48
3.3.1	故障判别与统计概述	48
3.3.2	火炮可靠性鉴定试验故障判别与统计问题探讨	51
3.4	试验过程中维修方案的影响	52
3.4.1	维修方案概述	52
3.4.2	火炮可靠性鉴定试验维修方案问题探讨	53
第4章	基于威布尔分布的可靠性鉴定试验方案设计	55
4.1	火力系统的故障分布规律	55
4.1.1	故障分布统计	55
4.1.2	AD拟合优度检验	57
4.1.3	火力系统最小二乘法威布尔分布参数估计	58
4.2	威布尔分布基本概念	59
4.3	典型装备的威布尔分布形状参数取值	61
4.4	威布尔分布火炮可修系统定时截尾试验设计	64

4.4.1	方案设计	65
4.4.2	计算方法	69
4.4.3	试验流程	70
4.5	威布尔分布统计试验方案表	71
4.6	基于威布尔分布的 E 型火炮火力系统可靠性鉴定试验 统计方案	75
第 5 章	可靠性鉴定试验综合设计技术研究	77
5.1	性能退化基本概念	78
5.1.1	退化失效的讨论	78
5.1.2	性能退化基本概念	80
5.1.3	装备性能退化建模方法	82
5.2	基于失效物理的性能退化建模技术	84
5.2.1	基于失效物理的性能退化模型	85
5.2.2	性能退化模型的参数估计	89
5.2.3	基于性能退化模型的寿命分布建模	93
5.3	可靠性鉴定试验综合设计方案	95
第 6 章	基于性能退化的台架和仿真可靠性试验技术	101
6.1	基于性能退化的炮闩系统可靠性鉴定台架试验设计	101
6.1.1	炮闩系统结构和故障分析	101
6.1.2	炮闩系统试验台	106
6.1.3	基于微观分析的磨损失效机理研究	112
6.2	基于性能退化的火力系统关重件可靠性鉴定仿真试验设计	121
6.2.1	火力系统虚拟样机模型	121
6.2.2	关重件有限元分析	138
6.2.3	关重件疲劳寿命计算	147
6.3	性能退化随机试验方案设计	156
6.3.1	蒙特卡洛抽样	156

6.3.2	随机参数及其分布规律	157
6.3.3	随机试验空间的生成	162
6.4	性能退化试验与数据处理	163
6.4.1	基于台架的挡弹板轴性能退化试验	163
6.4.2	基于仿真的抽筒子性能退化试验	166
第 7 章	基于信息融合的可靠性鉴定试验评估方法研究	169
7.1	火炮可靠性试验信息获取的基本策略	170
7.1.1	内外场试验相结合的数据获取策略	170
7.1.2	部件级与系统级试验相结合的数据获取策略	172
7.2	火炮可靠性鉴定试验的贝叶斯评估模型	174
7.2.1	贝叶斯理论基础	174
7.2.2	指数分布的贝叶斯评估模型	175
7.2.3	威布尔分布的贝叶斯评估模型	177
7.2.4	正态与对数正态分布的贝叶斯分析	179
7.3	基于贝叶斯理论的可靠性数据融合方法	184
7.3.1	标准幂先验构造方法	184
7.3.2	规则化幂先验构造方法	185
7.3.3	考虑信息交互影响的信息融合方法	186
7.4	火炮可靠性鉴定试验的综合评估方案	190
7.4.1	可靠性寿命数据及其经典统计分析	190
7.4.2	贝叶斯统计分析软件 OpenBUGS 的基本流程	192
7.4.3	基于 OpenBUGS 的可靠性综合评估	194
	参考文献	197

第 1 章

绪 论

1.1 背景及意义

可靠性是装备在规定的时间内和规定的条件下完成规定功能的能力，是新型火炮的重要性能指标之一。火炮可靠性鉴定试验是为了验证军方提出的可靠性指标是否达到设计要求，由军方用有代表性的火炮在设计定型阶段，在规定条件下所做的试验。因此，可靠性鉴定试验能够反映火炮可靠性的实际情况，提供验证可靠性的估计值，并作为新研火炮能否设计定型的重要依据。

近年来,大量新型火炮通过研制定型列装部队,大大提高了我军的火力打击能力。然而,尽管新型火炮在设计定型阶段都开展了可靠性鉴定试验,且可靠性指标也大都达到了设计要求,但是在装备列装部队后的实际使用过程中却暴露出大量可靠性问题,严重影响了装备作战效能的发挥。综合火炮可靠性鉴定试验的实际情况,发现主要存在以下问题。

(1) 可靠性鉴定试验属于典型的极小子样抽样试验,由于研制周期和经费的限制,投入试验的样本量非常有限,不能完全反映装备可靠性的统计特性。而且,设计定型阶段的装备,技术状态虽已固化,但仍处于可靠性增长过程。可靠性鉴定试验“结论”是对参与试验的“样本”可靠性状况做出“评价”,同时对后期生产的火炮装备的可靠性水平进行“预估”。但是,传统的方法解决小样本条件下可靠性增长评估问题较为困难,因此,提高“预估”的准确性是可靠性鉴定技术亟须解决的一个重要问题。

(2) 可靠性鉴定试验的主要依据是 GJB 899A—2009《可靠性鉴定和验收试验》,其可靠性鉴定试验统计方案的前提是假设装备的寿命服从指数分布,但是考虑到现代火炮装备是属于机、电、液、气耦合的典型复杂可修系统,其寿命数据分布不完全服从指数分布,因此,GJB 899A—2009的试验统计方案是否适合火炮的可靠性评估等问题有待深入验证。

(3) 对于火炮这类大型复杂系统,根据现阶段我国实际情况,可靠性鉴定试验只能与性能试验结合进行,而与性能试验结合进行的可靠性鉴定试验方法、风险分析、试验的组织实施、试验剖面及试验条件的设置、试验结果的处理分析与评估等一系列技术都有待研究解决。

(4) 定型试验具有多阶段性,试验信息源于变母体。武器装备鉴定试验中往往采用“试试看,看看试试”的策略,分阶段(演示样机、初样机、正样机)、分批次进行。在每次试验后,采取“设计—试验—改进设计—再试验”的方式,使被考核武器的性能参数不断改善。由于每次试验的工作环境、装备的功能、结构不断完善与改进,试验信息具有多种信息源,每次试验的可靠性试验数据和改进后的试验数据并非服从同一分布,

且信息源情况各异,即使总体的分布形式已知,但分布参数却是动态变化的。即,可靠性试验分析与评估呈现出“小子样、多阶段、变母体”的特点,需要运用变动统计学方法对试验数据进行分析。

另外,传统可靠性的分析对象是寿命信息,但是随着科技的进步,设计、制造技术以及使用材料的不断提高与改善,武器装备的可靠性越来越高,寿命越来越长,在相对短期内无法获取足够的失效数据,因此很难利用传统的可靠性理论对装备进行可靠性评估。一方面,装备在试验和使用过程中的性能退化数据、专家等信息中包含了准确、丰富且与寿命非常相关的信息,是可靠性分析的一个丰富信息源;另一方面,一些统计学习理论、信息融合理论的发展,也为装备部件和系统的可靠性分析提供了有效的方法和理论。鉴于此,针对传统可靠性分析方法与实际工程应用不相适应的问题,本书在分析装备的小样本寿命信息、性能退化信息等多源可靠性信息特点的基础上,深入研究了相关的可靠性评估技术和理论。

因此,本书针对火炮可靠性鉴定试验中存在的问题,采用理论分析与工程试验相结合的研究方法,开展火炮可靠性鉴定试验设计与评估方法研究,在分析装备的小样本寿命信息、性能退化信息等多源可靠性信息特点的基础上,明确新型火炮的可靠性水平,提高可靠性鉴定试验的效率,研究成果对于提高火炮可靠性鉴定试验评估的准确性、充分发挥新型火炮的作战效能具有十分重要的意义。

1.2 国内外研究现状

1. 可靠性试验

可靠性试验是对装备的可靠性进行调查、分析和评价的一种手段,是指为分析、评价装备可靠性而进行的各种试验的总称。可靠性鉴定试验属于可靠性试验的范畴,是武器装备定型试验的重要组成部分,进行可靠性

鉴定试验可以验证可靠性是否达到武器装备的研制总要求和研制合同中规定的指标要求,是由订购方用有代表性的装备在规定条件下所做的试验。

国外对可靠性进行系统的研究是从20世纪50年代开始的。美国1952年成立了电子设备可靠性咨询组(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment, AGREE),在1957年发表了《电子设备可靠性》的研究报告,阐述了可靠性的有关理论、方法及试验等方面的研究,该报告标志着电子装备可靠性的发展已趋于成熟。随着可靠性工程研究的进展,可靠性试验研究也有了发展,特别是在可靠性鉴定和验收试验方面进展较快,1963年5月15日颁布了可靠性试验标准MIL-STD-781《可修复的电子设备可靠性试验等级和接收/拒收准则》,并经过不断修改完善,1986年10月17日颁布了MIL-STD-781D《工程研制、鉴定和生产的可靠性试验》,1987年7月颁发了与MIL-STD-781D配套使用的军用手册MIL-HDBK-781,其名称为《工程研制、鉴定和生产的可靠性试验方法、方案和环境》,后期又将二者合并成为MIL-HDBK-781A,该标准详细规定了综合环境应力、试验剖面的确定、统计试验方案等用于开展可靠性试验的内容。

1977年,美国某机械系统可靠性试验团队对非电子类装备的可靠性试验方法进行了深入的研究,根据针对国防系统和机械工业领域的调查研究,最终得出美军标MIL-STD-781对于非电子类装备的可靠性试验不适用的结论。此后,美国罗姆航空研究中心也对非电子类装备进行了可靠性应用状况的调查及研究,得出了一致的结论。近年来,国内外很多学者逐渐开始重视机械装备的可靠性试验研究。2007年,我国学者喻天翔等指出机械装备的可靠性试验应有自己的特色,不适合直接套用当前的可靠性标准、规范。

可靠性试验从实施方法的角度主要分为定时截尾试验、定数截尾试验、序贯试验,其中关于定时与定数截尾的试验方案应用最广泛。国内外众多学者对此做了很多研究,比如国内的李根成分别基于定时截尾和定数

截尾详细论述了试验方案设计的程序,以及使用不同的试验方案进行鉴定试验时对试验结果影响的差异;郭奎和任占勇就 GJB 899-1990 中定时截尾试验方案下的 MTBF (Mean Time Between Failures, 平均故障间隔时间) 区间估计的计算方法进行了深入的分析;李海波和张正平等通过对定时试验方案和序贯试验方案两类统计试验方案的分析,指出每种方案的优点和缺点,并给出选取方案的依据。关于定时截尾和定数截尾的可靠性试验研究大部分是以电子装备为研究对象,成果已比较成熟。

序贯试验最早是在 20 世纪 40 年代,为了检查美国军火在生产阶段的质量由 A. Wald 提出的,随后逐渐被引入到其他很多领域,使得序贯试验方法逐渐发展起来。后来,很多学者针对序贯试验进行了深入的研究。1968 年, Darling 和 Robbins 针对序贯试验方法应用于不确定分布类型的装备有一些局限性的情况,深入研究了非参数的序贯试验方法;1976 年, Huffman 利用 Lorden 提出的新序贯试验方法对于一般的指数型分布推导出使得平均样本量最小时的序贯试验方法;20 世纪 90 年代,陈家鼎针对所有参数实现最小时情况的序贯试验方法进行了深入研究,并提出了一种渐近最优的序贯试验分析方法;近几年,陈家鼎和房钟祥针对任意序贯试验情况下,如何构造指数分布的均值的置信限进行了研究;为节省试验时间及试验成本,一些学者提出了时间序贯方法和分组序贯方法;为了避免抽样量过大或者试验时间过长,从而导致不必要的浪费,陈家鼎提出了截尾的序贯检验思想。随着序贯试验技术逐渐成熟,序贯试验方法被广泛应用于工程实际中。

随着 Bayes 理论的发展,国内外很多学者开展了 Bayes 可靠性试验技术研究,取得了很多有重要价值的成果,并在电子装备、武器装备等领域得到了广泛的推广。

2. 火炮可靠性鉴定试验

我国对可靠性工程的研究,基本上是从 20 世纪 70 年代开始的,20 世纪 80 年代末期,可靠性研究工作得到加强,相继成立了一批研究机构,

形成了一批军用标准，以 GJB 450《装备可靠性工作通用要求》为标志，可靠性工作进入一个新的阶段，针对 GJB 450 中规定的可靠性鉴定试验如何做、指标如何考核等一系列技术问题，我国先后颁布了一些关于可靠性鉴定试验的国军标，例如 GJB 16—1984《地面炮瞄雷达可靠性试验方法》、GJB 349.16—1988《常规兵器定型试验方法 航空机关炮》、GJB 59—1989《装甲车辆试验规程》（包括可靠性鉴定试验内容）和 GJB 899—1990《可靠性鉴定和验收试验》。其中，GJB 899—1990《可靠性鉴定和验收试验》经过使用发展，被 GJB 899A—2009《可靠性鉴定和验收试验》替代，该标准详细规定了装备进行可靠性鉴定和验收试验的要求，并提供了有关的统计试验方案（指数分布）、参数估计和确定综合环境条件的方法及可靠性验证试验的实施程序。上述标准是近年来火炮装备设计定型中可靠性鉴定试验的基础。

但是，GJB 899A—2009 的相关规定主要适合装备的实验室试验即内场试验，对于火炮装备而言，由于其使用环境对装备可靠性有很大影响，同样的火炮装备在不同严酷程度的环境条件下使用，可能会表现出不同的可靠性量值，因此需要在装备使用的真实环境中或模拟的真实环境中验证，即火炮需要在外场验证。在外场条件下，虽然可靠性鉴定试验方案等内容可以参考 GJB 899A—2009 进行设计，但是火炮系统综合性、使用环境的综合性、外场试验应力的设置和试验成本等问题，特别是以寿命指数分布为基础的 GJB 899A—2009 试验统计方案是否适合火炮的可靠性评估等问题还有待深入研究。

3. 可靠性试验信息融合评估

信息融合技术的最大优势在于它能合理协调多源数据，充分综合有用信息，提高在多变环境中正确决策的能力。信息融合结合不同源信息，目的是根据不同的信息来源，对数据进行综合和集成，其过程是用数学方法和技术工具得到“高品质”的有用信息。

试验融合评估是通过合适的方法把靶场试验的多源信息结合起来，对

试验样本量的充分性和试验设计点的合理性进行综合评价,确保靶场试验综合设计方案对装备性能评估的费效比最优。目前,专门针对试验融合评估的相关文献很少,大多是针对数据融合评估开展相关主题研究。

20世纪60年代,国际上就已有有人将 Bayes 方法用于可靠性统计分析。Bayes 可靠性评估技术的优势在于能充分利用大量的先验可靠性信息,然后结合少量样本数据进行可靠性评估,从而达到节约试验经费、缩短装备研制周期的目的。Bayes 方法的这一特点引起了人们的强烈兴趣,许多学者在此领域开展了相关研究工作并取得了大量的研究成果。到了20世纪80年代,已有这方面的专著,系统详尽地总结了这一方向的工作。近年来,学者们更注重与可靠性工程实践相结合,在现场试验数据较少的情况下,利用 Bayes 方法综合各种先验信息和小样本试验数据,以期得出更加合理和可信的评估结果。Pate-Cornell、Coolen、Lichtenstein 和 Newman 等对工程中存在的专家经验知识的收集、整理和合理利用问题进行了相关研究。Erto, Selby 和 Shoukri, Elperin 和 Gertsbakh, Arturo 等利用工程中常见的先验信息类型,分别对不同寿命分布类型的可靠性评估问题进行了分析。国内,周源泉在 Bayes 基础理论研究方面也做了大量工作。在应用方面, Bayes 方法在不同领域,如航空、武器、机械工业领域等都得到广泛关注。北京理工大学的周桃庚在光电系统 Bayes 可靠性评估方面做了大量工作;西北工业大学的宋保维重点研究了鱼雷系统的 Bayes 可靠性评估。

Bayes 方法是一类最常见同时也是研究最深入和应用最广泛的多源可靠性信息融合方法。除此之外,其他相关可靠性信息融合方法也逐渐得到人们的重视。Savchuk 和 Martz 利用最大熵方法和最大后验风险方法融合多种信息源的先验信息,得到了融合后的先验分布。Dubois 和 Prade 等在可能性理论框架下研究了主观可靠性信息的建模、融合问题。Smets 将证据理论引入可靠性评估工作中,对以分位数形式表述的专家意见进行融合,最终得出可信的可靠性评估结果。

国内,山东大学的张洪才等重点研究了基于信息融合技术的不精确可

可靠性数据的综合利用问题。国防科技大学的张士峰、张湘平等将相关融合理论应用于武器系统的精度评估和可靠性评估工作，并对同一系统在不同环境、不同条件下的可靠性信息融合、多源变母体可靠性信息的融合问题等提出了行之有效的解决途径；刘琦对基于专家信息和样条函数法的先验分布融合方法进行了研究；冯静对小子样复杂系统的可靠性信息融合方法做了较为全面的研究，重点对多源验前信息的加权融合方法、基于环境因子的可靠性信息融合方法、可靠性增长信息融合方法、退化失效信息融合方法进行了深入研究；王华伟在其博士论文中重点研究了液体火箭发动机可靠性增长信息融合方法，主要包括同一阶段同源信息的融合、同一阶段多源信息的融合和可靠性增长信息的融合；张金槐对多种验前信息源下的融合验后分布确定方法进行了研究，并在专著《Bayes 方法》中具体阐述了融合全过程试验信息的方法，包括先验分布的确定和 Bayes 统计推断等，为采用 Bayes 方法研究可靠性增长数据的融合奠定了理论基础。

另外，在多源试验数据的融合算法研究方面，由于在靶场试验的多源数据融合评估中，验前信息的样本数量一般远大于现场试验的样本量，引起了人们对先验信息“淹没”现场试验信息，使现场试验信息不起作用的担忧。因此，在多源试验数据的融合算法设计中，首要的研究内容是确定不同验前数据的信息权值，避免这种“淹没”现象的发生。

针对多源试验数据的信息权值确定问题，国内许多学者进行了研究，一些文献提出了限制仿真样本量的方法，尽管这种方法能够避免数据“淹没”问题，但是却带来了如何选取仿真样本的问题，并且削弱了仿真试验能够产生大量先验信息的优势。还有一些文献将验前分布设计为混合验前分布，并在融合权重中考虑仿真的可信性，这种方法在验前分布不适当时可能会得到错误的验后权重和验后估计。闫志强在其博士论文中提出了一种改进的混合验后融合方法，使用有验前样本量约束的现场样本边缘分布替代无信息验前下的现场样本边缘分布，从而避免验后权重和验后估计的错误。