

敏感性数据分析与 可靠性评定

刘宝光 著

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

敏感性数据分析与可靠性评定/刘宝光著. —北京:国防工业出版社, 1995. 6

ISBN 7-118-01378-1

I. 敏… II. 刘… III. ①灵敏度-试验-数据分析②灵敏度-试验-数据-可靠性估计 IV. TP202-34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 12833 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 100041)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 153 千字

1995 年 6 月第 1 版 1995 年 6 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 9.60 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。、

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾铎

秘书长 刘瑄德

委员 尤子平 朱森元 朵英贤 刘仁
(按姓氏笔划为序)

何庆芝 何国伟 何新贵 宋家树

张汝果 范学虹 胡万忱 柯有安

侯迁 侯正明 莫悟生 崔尔杰

前 言

敏感性数据的获取和分析,是弹药类产品可靠性和安全性评定的基础一环,也是许多其他的工程和科学试验研究领域需要处理的问题。自本世纪 60 年代以来,可靠性工程的需求促进了这一类问题研究工作的进展。这些工作扎根在数理统计的概念和理论系统,并由其问题的特殊性和更多地使用数值方法等特点,形成数理统计的一个独立的应用分支。

作者是在十几年前就火工品和火炸药的感度试验研究方法问题,涉足这一领域的。十几年来,在这类问题的理论研究和工程规范化工作中,以及在教学和普及工作中,接触了有关工程领域的许多杰出的人士。他们的知识和热情支持了我的工作,使我受益匪浅。同时,也使我感觉到,需要将这一领域人们几十年来的工作和知识积累作一个总结,以便系统地明确地向有关领域的研究工作者和工程技术人员提供这些知识,以及用这些知识补充和完善有关专业高层次教育的某些教学环节。于是便撰写了本书。

本书至少在国内是第一本系统地论述敏感性数据的分析方法,及相关的可靠性评定方法的书。回忆起以前在工作中苦于翻阅群书而不得这一内容的资料,对本书的成书感到欣慰。本书通过临界刺激量概念的引入,将全书的叙述建立在连续型随机变量的统计的基础上。然后按方法展开讨论,分要求作分布模型假设的和可用于检验分布模型的这两大类,讲到了至今已建立的尚有使用价值的各种主要方法。叙述与论证力求严谨,方法的阐述力求明确、透彻,切近实用。因篇幅所限,有关的数表凡已列入国家标准或可见于几项主要的国家军用标准者,本书基本上未再编入。

本书的读者对象是本领域的研究工作者和有关领域的使用这

些方法的研究人员和工程技术人员,以及有关专业的高年级学生和研究生。在补充一些例题、习题和数表等具体资料后,也可以作为教科书使用。

作者作为一个应用数学工作者,由北京理工大学的丁傲教授和陈福梅教授引领进入了工程领域这一特定问题的研究。他们在各自领域的精深的学识,和对问题的明确界定和陈述,给作者以极大的帮助。在此谨表示衷心的感谢。我的同事和合作者,北京理工大学的吴祈宗、江南和贾富臣老师等,以他们出色的工作,为本书的形成作出了贡献,在此一并致谢。

感谢丁傲教授、何国伟教授、程侃教授和谢高弟教授对本书作了积极的推荐。感谢国防科技图书出版基金评审委员会对本书的支持。

本书虽酝酿很久,但最后成书仓促,加之作者水平所限,必定多有疏漏与不成熟之处。敬请诸位批评指正。

著 者

1994年5月

内 容 简 介

本书全面系统地阐述敏感性试验的升降法及其各种变形、兰利法和 OSTR 法、完全步进法和概率单位法,以及非解析拟合法等,用这些方法可以获得敏感性数据,并据以检验临界刺激量的分布模型,估计分布参数,以及作可靠性和安全性评定。这些方法适用于火工品、引信、火炸药的试验,多种材料强度试验,以及医药学的多种试验研究领域。本书对方法阐述明确,论证严谨,内容切近实用,可作为上述领域研究工作者和工程技术人员以及弹药可靠性工作者的参考书,或有关专业的高年级学生和研究生的参考书或教学用书。

ISBN 7-118-01378-1/O · 105

定价:9.60 元

目 录

第一章 引论	1
1.1 刺激与响应	1
1.2 临界刺激量与感度分布	3
1.3 敏感性试验与敏感性数据	5
1.4 不同领域的敏感性试验	7
1.5 作用可靠性评定问题	9
1.6 常用的感度分布模型	11
1.7 估值的一般方法	14
第二章 升降法	22
2.1 传统方法	22
2.2 升降法原理	31
2.3 升降法估计式的偏量修正	40
2.4 调整型升降法	54
2.5 升降法与可靠性评定	62
第三章 升降法(续)	68
3.1 Logistic 分布的升降法	68
3.2 小样本升降法	76
3.3 成组升降法	89
第四章 兰利法和 OSTR 法	95
4.1 兰利法	95
4.2 OSTR 法	113
第五章 完全步进法	124
5.1 步进试验	124
5.2 估计量与区间估计	126
5.3 偏度和峰度检验法	132
5.4 χ^2 检验法	136

5.5 变换正态性和变换 Logistic 检验	139
第六章 概率单位分析	141
6.1 原理	141
6.2 概率图作业法	143
6.3 回归系数及 χ^2 值的计算	146
6.4 区间估计与可靠性评定	155
6.5 一组大型感度数据	161
第七章 敏感性数据的非解析拟合	164
7.1 解析拟合的局限性	164
7.2 数学模型	167
7.3 模型的求解	174
7.4 讨论	176
参考文献	178

第一章 引 论

本书讨论敏感性试验的数据分析方法,以及以此为基础的可靠性评定方法。敏感性试验存在于许多工程研究领域;在药理学、精神物理学、生物学和医学等学科的某些试验研究领域,也有这一类试验。不同领域的试验,其物理内容和术语互不相同,但属于同一概念。这一概念体现在关于刺激与响应、临界刺激量和敏感性数据等节次的讨论中。本书在叙述中虽然多采用弹药类产品,特别是火炸药和火工品研究中的术语和例子,但所论述的理论和方法,适用于所有领域的敏感性试验。关于可靠性评定方法的部分,虽然可靠性主要是一个工程概念,但本书所讲的评定方法,作为敏感性数据分析的延伸,对于非工程领域的敏感性试验,也是有意义的。

就数学内容而言,本书是讲对一种特殊的统计模型,所发展的专门的数理统计方法,和概率论与数理统计的某些一般理论概念在这里的应用;进而讲这种专门的统计所支持的可靠性评定方法。大学教材中的概率论与数理统计的概念、理论和方法,本书中则作为已知的基础知识引用。

1.1 刺激与响应

刺激与响应是敏感性试验的两个要素。一般的敏感性试验,是从总体中抽取若干个体作为样品,以单个或一组个体作为一个单元,对之施加一定作用,观察作用的效果,而这种观察只区分预定现象出现与否两种对立的状态。以火工品的情形为例。设有一种

电爆装置,靠通电引爆。这种装置的一种性能试验,称作感度试验,要对一件件样品,按规定条件通电,观察其是否引起了爆炸(用火工品的术语,观察是否发火)。在本书中,刺激作为一般术语,用以表示所施加的作用;而把出现了预定现象称作响应,其对立状态称作不响应。

对刺激应赋予某种度量,以便给它一种量值表征,从数量上区分其强弱。刺激的量值称作刺激量。对刺激的度量不要求跟刺激的物理本质相一致,但必须跟刺激的强弱有单调性关系:刺激量越大,刺激越强。例如上述电爆装置试验中的电刺激,从起爆机理考虑,也许其本质是能量,而常用的度量却是电流强度或电压。本书还规定,未施加作用对应于 0 刺激量,且刺激量只取非负值。这样一来,在火工品的火焰感度和激光感度试验中,人们习惯用的火焰和激光光源到试验样品的距离 d ,就不能作为刺激量。应当取一个很大的正数 D ,使距离为 D 时等于未施加作用,而用 $x=D-d$ 作为刺激量。

在本书中假设刺激量是可以连续取值的变量。

一项具体的敏感性试验,按照它对响应和对刺激量的规定,可能 0 刺激量对应于不响应,也可能是相反,0 刺激量对应于响应。例如火工品的安全性试验,常常将样品接受刺激而不发生变化作为期待出现的预定现象,以此为响应。这属于后一种情况。为叙述确定起见,我们总是对 0 刺激量对应于不响应的情形叙述。对于相反的情形,不难通过将响应频率变换为不响应频率,来运用书中的概念和方法。

对于刺激与响应的关系,在明确规定响应判据和刺激度量的基础上,经验支持可作如下三条假设⁽¹⁾。即对一个确定的单元:

- (1) 刺激量 x 足够大,一定出现响应,太小,则一定不响应;
- (2) 如果在刺激量 $x=x_0$ 时出现响应,那么在 $x>x_0$ 时也一定响应,反之,如果在 $x=x_1$ 时不响应,则在 $x<x_1$ 时一定也不响应;
- (3) 对于确定的刺激量 x ,或者出现响应,或者为不响应,二者必居其一。

正是来自经验的这三条假设,支持形成临界刺激量概念,进而使敏感性试验的研究进入了连续型随机变量的统计领域。

1.2 临界刺激量与感度分布

对一个确定的单元,将使其响应的刺激量和不响应刺激量分别归入两个组。那么,上述三条假设保证了两个组的构成有下列特点:(1)不空——两组皆非空集;(2)不乱——响应刺激量组的任意点大于不响应组的每一点;(3)不漏——每个刺激量 x 或属于响应组,或属于不响应组。因此,这是一种狄特金分割⁽²⁾。正是实数集的连续性质,保证了存在唯一的临界值 x_c ,作为响应组和不响应组的分界点。如果 x_c 本身属于响应组,则不响应组无最大点;如属于不响应组,则响应组无最小点。这个临界值 x_c 称作临界刺激量。在直观上,为如图 1-1 所示的形象:直线被分作两段,左部为不响应组,右部为响应组;两组各占一段,紧相邻接又不相交又; x_c 是两段的

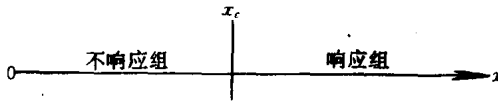


图 1-1 临界刺激量

分界点。据此,当刺激量 $x > x_c$ 时,为响应刺激量;任意 $x < x_c$,为不响应刺激量。至于刺激量 $x = x_c$,可能是响应刺激量,也可能是不响应刺激量。临界刺激量概念中不含对此二中择一情况的确切结论。

注意,对应于一定的刺激形式和响应判据,临界刺激量是一个产品单元所固有的数值,是一种特性值。它不同于表示所施加作用的刺激量。

如上所述,对于一种可以度量的刺激和明确规定的响应判据,每个产品单元都存在一个特性值 x_c 。当施加的刺激量大于 x_c 时,对该单元的作用效果一定为响应;刺激量小于 x_c 时,一定为不响

应。如果一个单元所接受的刺激恰好等于它的临界刺激量,效果可能为响应,也可能为不响应。对于那些在刺激量等于 x_c 时出现响应的单元, x_c 是它们各自的最小响应刺激量。对这种单元不存在最大不响应刺激量。对于那些在刺激量等于其 x_c 值时不响应的产品单元, x_c 是它们各自的最大不响应刺激量,它们没有最小响应刺激量。

显然,作为一个产品单元的固有特性的临界刺激量,是单元对于刺激的敏感性的最恰当表示。一批产品所含各个单元的临界刺激量的集合,构成数理统计学中的总体,就是这批产品敏感性的最全面的表征。

一个临界刺激量总体,对于临界刺激量可能取值的某给定的范围,比如区间 (a, b) ,有一个百分率与之对应。这个百分率等于区间所含个体数在总体中所占的比例。这一“区间—百分率”对应关系,也就是总体的分布。它描述了总体所对应的产品批中,各单元临界刺激量的分布规律性。在火工品和火炸药领域,常使用感度这个词。这个词的最确切的含义,应当是临界刺激量总体的分布。因此,我们使用感度分布这个术语,称呼这一分布。

感度分布是临界刺激量作为随机变量所对应的概率分布。试想我们从整批中随意抽取一个产品单元,它的临界刺激量将具有怎样的数值呢?显然,它的取值在尚未抽取单元之前是不确定的;但它又是有统计规律性的:它取值在区间 (a, b) 内的概率,等于总体中含于 (a, b) 区间内的个体所占的百分率。也就是说它服从感度分布的规律。因此,临界刺激量是一个随机变量,感度分布就是它的概率分布。

我们总是用某个连续型随机变量,作为一批产品的临界刺激量这一随机变量的模型,将这连续型随机变量的分布同感度分布不加区别。对于一个实在的总体说来,这个连续型随机变量的概率分布,是感度分布的一个近似。

使用临界刺激量和感度分布的概念后,敏感性试验中考察的各种特征量就都有了确切的概率论意义。以火工品感度试验的情

形为例。我们将临界刺激量随机变量记作 X_c ，将感度分布的分布函数取作

$$F(x) = P(X_c \leq x) \quad (1-1)$$

即变量取值不大于 x 的概率。那么刺激量 x 所对应的发火概率 p ，根据临界刺激量概念，有

$$P(X_c < x) \leq p \leq P(X_c \leq x) \quad (1-2)$$

因为随机变量 X_c 为连续型的，所以由(1-1)式和(1-2)式有

$$p = F(x) \quad (1-3)$$

因此，火工品感度特性中常用的 50% 发火点 $x_{0.50}$ 就是感度分布的中位数，亦即 $F(x_{0.50}) = 0.5$ 。在对称分布的情形，这一特性值同分布的均值相重合。特定刺激量 x_0 对应的发火概率，就是分布函数在 x_0 点的值 $F(x_0)$ 。而感度曲线的准确形式，应是感度分布的分布函数曲线。

1.3 敏感性试验与敏感性数据

使用临界刺激量和感度分布两个概念，现在可以对敏感性试验赋予确切的统计学意义。它就是对临界刺激量这类随机变量，通过观察或取样试验，获得数据，并据以对感度分布作出推断的过程。

为了知道一批产品的感度分布，或者某几个敏感性特性值，只有通过敏感性试验。

敏感性试验问题是临界刺激量的统计问题。然而，临界刺激量在试验方面的特殊性，却使这类连续型随机变量的统计在方法上同通常的统计试验和推断有很大的不同，形成数理统计学的一个专门的分支。在文献中有 *One Shot Statistics* 的称谓。在我国火工品和火炸药界，称作感度试验用数理统计方法^[1,3]。

数据形式的不同，是观察和试验不同的集中表现，是推断方法不同的本源。

通常的统计抽样试验过程，都是通过对样品的观察测量，得到

由每个样品的特性值构成的一组样本数据。这组样本数据作为随机变量的一组观察值,构成推断总体的分布的依据。在敏感性试验的情形,作为个体的临界刺激量值却是无法测定的。一个产品单元,只能作一次刺激-响应试验;施加一定的刺激量 x_0 ,如果出现响应,得到 $x_c \leq x_0$;若为不响应,得到 $x_c \geq x_0$ 。这时该单元或者已不复存在(如发生了爆炸),或者其敏感性即其临界刺激量值已经变化,总之已不能再得到关于 x_c 的更多信息。于是,对应于通常统计数据的观察值,这里所能得到的仅仅是一个上界或下界,而且这个上界或下界值是由试验者所设定的。而正是这些同样品单元逐个对应的试验用刺激量,以及与之配合的“ \leq ”或“ \geq ”关系,构成了敏感性试验的数据。这就是敏感性数据。在火工品火炸药领域称作感度数据。

为适应数据统计分析的需要,敏感性数据常整理成如下形式:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_k \\ N_1 & N_2 & \cdots & N_k \\ n_1 & n_2 & \cdots & n_k \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

其中 k 为试验所用到的刺激量的个数;对于 $i=1, 2, \dots, k$, x_i 表示试验用刺激量, N_i 表示用 x_i 所作刺激-响应试验的次数,即试验单元数, n_i 表示响应数。敏感性试验的试验量为

$$N = \sum_{i=1}^k N_i \quad (1-5)$$

如果记

$$f_i = n_i / N_i, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (1-6)$$

即用刺激量 x_i 所获得的响应频率,或记

$$m_i = N_i - n_i, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (1-7)$$

为不响应数,那么用 N_i 、 n_i 、 f_i 和 m_i 中任意两个同 x_i 都可以给出式(1-4)的等价形式。

通常的样本数据,有属性数据(计数数据)和计量数据之分。敏感性试验的取样,取出的是有计量数据形式的一组值

$$x_{c1}, x_{c2}, \dots, x_{cN} \quad (1-8)$$

得到的却只是如(1-4)式的敏感性数据。其中,对于每个刺激量 x_i ,对应的 (N_i, n_i) 具有属性数据的形式。而弹药类产品用固定的刺激量作响应试验所得的属性数据,是 $k=1$ 情形的感度数据。

敏感性数据的特点蕴涵了敏感性试验研究的基本问题。第一,因为试验用刺激量 x_i 的设定中的人为因素,使得有相同试验量的敏感性数据所携带的关于感度分布的信息量会很不相同。比如,如果 x_i 选取不当,会使数据中所产生的 f_i 值有多个0或多个1,这当然就减少了它所能提供的关于感度分布的知识。因此,设计怎样的试验程序,使每次刺激-响应试验所用刺激量的确定,多一些客观性,少一些人為因素,以改善数据质量,亦即使数据包含关于感度分布更多的信息,此为问题一。第二,如何运用数理统计学的原理,建立起适用于敏感性数据的统计分析方法,以求对感度分布模型作出推断,或者在一定的模型假设下给出分布参数的估计。除此之外,本书还考虑第三个问题:怎样将敏感性数据分析的结果,同可靠性评定工作的要求相联系,建立起利用各种敏感性数据评定可靠性的方法。

1.4 不同领域的敏感性试验

在上述对敏感性试验的一般讨论中,已较多联系到了火工品和火炸药领域的感度试验。的确,这是敏感性试验研究所在的一个主要领域,其研究深入,应用广泛。许多方法是从这一领域发展起来的,许多术语也是源自这一领域。

在生物学和医学界,在药物效力或生物体抗药性的试验研究中,药物作用是一种刺激,剂量的概念可恰当地取作刺激的度量。单个生物体作为样品单元,依试验需要,将致死或致毒规定作响应。这样一来,节1.1的三条假设成立。因此可以肯定,对确定的药剂,各个生物体存在其固有的临界致死剂量,也就是一种临界刺激量。群体的临界致死剂量的各种特性,比如50%致死剂量,也就是某种敏感性特性值。不仅如此,对单个生物体的试验,也同对火