

# 基于可靠性的鱼雷装备抽样检验方案研究

侯伟彦<sup>1</sup>, 黄波<sup>1</sup>, 叶俊杰<sup>2</sup>

(1. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266199;  
2. 中国人民解放军92767部队, 山东 青岛 266102)

**摘要** 研究了抽样检验的基本理论, 分析了鱼雷装备的可靠性指标构成和在抽样检验中量化指标的选取。运用概率论和数理统计方法, 提出了基于可靠性的抽样检验方案; 综合分析OC特性曲线, 通过使用超几何分布计算接收概率, 建立了特殊武器装备可靠性抽样检验的模型。通过具体算例, 方案可操作性得到了实际检验, 为装备试验、生产、维修中的装备验收工作提供了科学决策的理论依据。

**关键词** 鱼雷; 可靠性; 抽样检验; 装备验收

中图分类号 TJ63 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2021)05-0386-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.05.007

## Research on Sampling Inspection Scheme of Torpedo Equipment Based on Reliability

HOU Weiyan<sup>1</sup>, HUANG Bo<sup>1</sup>, YE Junjie<sup>2</sup>

(1. Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China;  
2. Unit 92767 of PLA, Qingdao 266102, China)

**Abstract** The basic theory of sampling inspection is studied, the reliability indexes of the torpedo and quantitative indexes in sampling inspection are analyzed. By applying probability theory and mathematical statistics, a scheme based on reliability and sampling inspection is proposed; by analyzing operating characteristic curve and using hypergeometric distribution, a special model of weapon equipment reliability sampling inspection is set up. The feasibility of the scheme is tested by actual calculation, this solution can provide theoretical foundation for equipment acceptance in testing, producing and repairing.

**Key words** torpedo; reliability; sampling inspection; equipment acceptance

## 0 引言

鱼雷装备是潜艇作战使用的主战武器, 武器装备的性能优劣直接关系到潜艇履行作战使命的成败, 在装备使用保障阶段, 其贮存、装载、实航的可靠性指标, 也成为作战和保障单位密切关注的重点。因此为了保证武器装备质量符合要求, 在装备生产部署阶段和调拨部队前, 军事代表室应当对鱼雷进行抽样检验。作为一类特殊的工业产品, 由于

鱼雷生产周期长、订货数量少、部件筹措难、单品价值高, 若采取全面检验<sup>[1]</sup>手段, 对将批中所有产品逐一检验, 这样的抽样方案理论上对工业部门和部队都不存在风险, 但事实上是无法实现的。因此, 在控制生产方风险(拒收质量合格的批)和使用方风险(接受不合理的批)的基础上, 采用抽样检验的方法, 能减少检查数量, 同时对鱼雷武器的可靠性进行验证, 可以有效地控制产品质量。

对于我国鱼雷产品, 其可靠性水平不高, 批产

数量小,属于典型的小子样产品。而在鱼雷湖海定型试验与验收试验<sup>[2]</sup>的结果检验中,多年以来一直采用基于大样本的经典统计理论的检验方法,这种方法需要较大的试验样本量和数据,在实际的鱼雷系统试验过程中需要进行大量的湖海试验,费用昂贵。因此,适合于小子样系统的抽样方案一直是鱼雷工程领域研究的重点<sup>[3]</sup>。

## 1 抽样检验的基本理论

### 1.1 生产者风险与用户风险

在对产品的总体质量情况一无所知的情况下,应采用完全随机的方法去抽样,这是采用简单随机抽样最为科学合理的方法<sup>[4]</sup>。抽样检验是在取得少数样本特性参数的基础上,利用概率统计理论,探求样本所代表的批量制品品质特性的一种经济而有效的办法。既然是抽检,生产者和用户无疑都要冒一定风险<sup>[5]</sup>。这是因为任何大批量生产的工业产品中都会或多或少地存在不良产品,或者说不合格产品,特别像武器装备受控于诸多因素及生产过程中的每一环节不可避免地会出现不合格品。

#### 1.1.1 生产者风险 ( $\alpha$ )

对生产者而言,原本合格的一批产品(低于或等于规定的废品率),由于所抽检的样本全部为不合格的产品(这种可能性是存在的),按事先规定的判断准则,就会判定该批产品为不合格批。殊不知该批产品中绝大多数是合格品。于是就导致生产者蒙受本不应承受的损失。统计学上将这种错把合格批产品判为不合格的失误,称为第1类错误,其发生的概率 $\alpha$ 称为生产者风险。

#### 1.1.2 用户风险率 ( $\beta$ )

对用户而言,也有可能将原本不合格的产品批(大于规定的不合格率),由于所抽样本全为合格品,按事先规定,该批产品都会判为合格批,而该批产品中绝大多数为不合格品,这样用户就会受到损失。具体到武器装备的命中概率,就会对作战平台效力产生致命影响。一般将不合格批判为合格批的错判为第2类错误,其发生的概率 $\beta$ 称为用户风险率。

### 1.1.3 两类风险的一般法则

通常情况下, $\alpha=5\%$ 和 $\beta=10\%$ 是抽样检验中最常用的法则。在此前提下,用一套兼顾各种因素,切实可行的抽检方案,实现让好的产品最大限度(95%)合格通过,让不好的产品尽可能(90%)不被通过的原则。

## 1.2 可靠性抽样检验特性曲线

抽样方案基于概率论和数理统计理论,一个好的抽样方案,应体现在不合格率变幅不大时,接受概率有迅速的反映,即当产品的批质量好时,能以高概率接受,当产品的批质量变坏时,其接受概率迅速变小,当批质量坏到一定程度时,以低概率接受。

通过分析抽样方案的特性曲线,可以看出方案的判断能力。方案的特性曲线就是OC(Operating Characteristic Curve)曲线<sup>[6]</sup>,表示的是接受概率 $L(P)$ 与不合格率 $P$ 之间的依存关系。设 $d$ 是大小为 $n$ 的样本中不合格品数, $c$ 为合格判定数,则随机事件“ $d \leq c$ ”的概率为接收概率,即为 $L(P)$ 。OC曲线将一个抽样方案与产品的质量联系起来,表示使用既定的抽样方案,把一定质量水平的一批产品预期判为接受的百分比。

理想的OC曲线<sup>[7]</sup>应当满足 $P \leq P_0$ 时, $L(P)=1$ ;  $P \geq P_0$ 时, $L(P)=0$ ,即按此种抽样方案来检查,可以使任一批产品,凡是次品率在某规定的 $P_0$ 以下时,都被接受;凡是超过这个规定的次品率,都不予接受,如下图。实际上这样的OC曲线只有在100%检验且试验是没有误差时才能得到,而实际上并不存在,因为100%检验也难免存在错检或漏检。

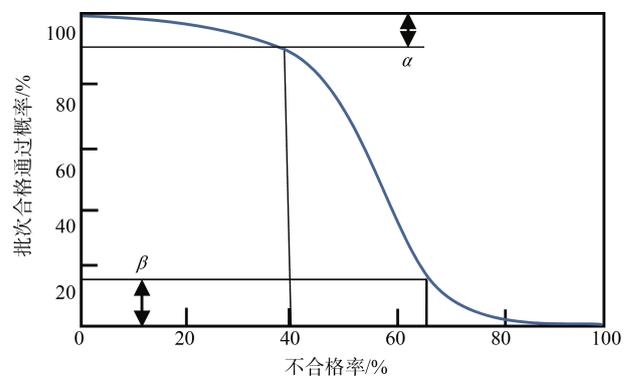


图1 OC曲线

Fig.1 Operating characteristic curve

## 2 抽样检验方案的确定

### 2.1 抽样检验的定量指标

#### 2.1.1 量化指标

武器装备以最终实射命中目标为合格指标,这一指标是一个综合指标,由相应的国标和军标进行量化,按照 GJB531A—1996《鱼雷通用规范》,鱼雷可靠性指标主要包含:

平均故障间隔贮存时间 (MTBF<sub>S</sub>),是指在规定的贮存条件下,鱼雷从开始贮存到发生故障,2次故障间隔时间的平均值。

装载可靠度 (R<sub>C</sub>),是指鱼雷在规定的装载时间和装载条件下,保证规定功能的概率。

实航工作可靠度 (R<sub>W</sub>),是指鱼雷在规定的实航条件和实航次数内,完成规定功能的概率。

#### 2.1.2 指标关系

$$1.75 \leq MTBF_{S0} / MTBF_{S1} \leq 2 \quad (1)$$

式中: MTBF<sub>S0</sub> 为期望的时间合同指标; MTBF<sub>S1</sub> 为可接受的时间下限。

$$1.75 \leq \frac{1 - R_{c1}}{1 - R_{c0}} \leq 2 \quad (2)$$

式中: R<sub>c0</sub> 为期望的装载合同指标; R<sub>c1</sub> 为可接受的装载可靠性下限。

$$1.75 \leq \frac{1 - R_{w1}}{1 - R_{w0}} \leq 2 \quad (3)$$

式中: R<sub>w0</sub> 为期望的实航合同指标; R<sub>w1</sub> 为可接受的实航可靠性下限。

#### 2.1.3 指标水平

$$MTBF_S \geq 3a; R_C(90d) \geq 0.8; R_W \geq 0.75$$

鱼雷可靠性指标验证考核的判定风险一般为:  $\alpha=0.2$  和  $\beta=0.2$ ;

鱼雷可靠性指标验证考核的置信水平一般为:  $C=0.8$ <sup>[8]</sup>;

在某型鱼雷可靠性检验时,为保证装备质量,选取指标为:命中目标概率不低于 85%,置信度  $1-\beta=90\%$ 。

### 2.2 抽样检验标准的选取

抽样检验标准<sup>[9]</sup>按检验的目的,可分为监督检验方案和验收检验方案;按单位产品的质量特征可分为计数方案和计量方案;按抽取样本的次数分为

一次、二次、多次与序贯式抽样方案;按抽样方案是否调整分为调整型抽样方案和非调整型抽样方案;按是否组成批,可分为孤立批抽样方案和连续批抽样方案<sup>[10]</sup>。

监督检验是除生产方、用户外,受委托的第三方机构或政府部门为督促产品的生产者或经销者切实履行自己在产品质量方面应负的社会责任,保护消费者利益,以一定行政法规为后盾而实施的检查;而验收检验的目的是把关,通过检查判断一批产品是否合乎质量标准的要求,合乎要求的就予以接收,不合乎要求的就拒收或另作处理。在进行武器装备综合性能检验时,各方主要关心的是其性能是否满足要求,因此应当选用验收检验标准。

计数检验<sup>[11]</sup>是指在抽样的样本中,记录每一个体中的缺陷数目的检查方法,通常它是通过计取个数取得数据的,因此数据必然是整数;计量检验则与计数检验相对应,指在抽样的样本中,对每一个个体测量其某个定量特性的检查方法,通常它是连续计取的数据,不一定是整数。如果观察值服从正态分布,计量抽样检查比计数抽样检查有某些优点,即所需的样本量较少,并能提供有关产品质量的更多信息;而计数抽样方案不受分布形状假定的限制,使用较简便,易为理解和接受。进行武器装备质量检验时,因并不知道样本的观测值的分布,因此采用计数检验的方法,以某一批次武器装备为样本单元,通过确定样本中命中目标概率低于 85% 不合格的样本的数量,判定其是否合格。

### 2.3 抽样检验方案的选取

#### 2.3.1 以可靠度 R 为指标的抽检特性函数

在批量为 N 的产品批中随机抽取 n 个样品进行试验,当  $N/n \leq 10$  时,采用超几何分布<sup>[12]</sup>计算抽样特性函数:

$$L(R) = \sum_{r=0}^c \frac{\binom{N(R)}{r} \binom{NR}{n-r}}{\binom{N}{n}} \quad (4)$$

其中: R 为产品批的可靠度(可靠概率); c 为合格判定数。

当  $N/n \geq 10$  时,采用二项分布<sup>[13]</sup>计算抽样特性函数:

$$L(R) = \sum_{r=0}^c \binom{n}{r} (1-R)^r R^{n-r} \quad (5)$$

2.3.2 可接受的可靠度  $R_0$

给定第 1 类风险率  $\alpha$ , 当  $N/n \leq 10$  时, 则有

$$L(R_0) = \sum_{r=0}^c \frac{\binom{N(1-R_0)}{r} \binom{NR_0}{n-r}}{\binom{N}{n}} = 1 - \alpha \quad (6)$$

当  $N/n \geq 10$  时, 则有

$$L(R_0) = \sum_{r=0}^c \binom{n}{r} (1-R_0)^r R_0^{n-r} = 1 - \alpha \quad (7)$$

当产品可靠度  $R \geq R_0$  时, 则判断这批产品是合格的, 以高概率 ( $\geq 1 - \alpha$ ) 接收, 该产品的可靠度评定值为  $R_0$ 。

2.3.3 极限可靠度  $R_1$

给定第 2 类风险率  $\beta$ , 当  $N/n \leq 10$  时, 则有

$$L(R_1) = \sum_{r=0}^c \frac{\binom{N(1-R_1)}{r} \binom{NR_1}{n-r}}{\binom{N}{n}} = \beta \quad (8)$$

当  $N/n \geq 10$  时, 则有

$$L(R_1) = \sum_{r=0}^c \binom{n}{r} (1-R_1)^r R_1^{n-r} = \beta \quad (9)$$

当产品可靠度  $R \leq R_1$  时, 则判断这批产品是不合格的, 应以低概率 ( $\leq \beta$ ) 接收。

2.3.4 选取方案

当可靠性的验收试验时, 若试验对象是原件 (材料), 则试验样品数量可以很多, 但对于鱼雷这种系统类小样本, 则无法实现较大数量下的实际试验, 结合装备工作实际, 在综合考量鱼雷生产批量 (一般小于 100 枚) 和试验数据的准确度后, 在具体实施鱼雷小样本抽样检验时, 必须使用超几何分布计算接收概率<sup>[14]</sup>。

由 1.2 节中有关 OC 曲线分析可得, 要制定一个抽检方案, 可归结为在给定  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $R_0$ 、 $R_1$  下, 求解满足下列方程组的  $n$ 、 $c$ :

$$\begin{cases} L(R_0) = 1 - \alpha \\ L(R_1) = \beta \end{cases} \quad (10)$$

由某型鱼雷生产批量  $N$  为 80 枚, 计算结果如表 1 所示。

表 1 不同抽样方案下的超几何分布计算不同批量时的接收概率

Table 1 Receiving probabilities of different batches calculated by hypergeometric distributions

抽样方案	置信度 $1 - \beta$	批量 $N$	不合格数 $c$	样品数量 $n$	命中目标概率 $R_1$
1	90%	80	0	13	0.850 3
2	90%	80	1	17	0.865 3
3	90%	80	2	>20	0.850 0
4	80%	80	0	10	0.859 9
5	80%	80	1	18	0.853 6
6	80%	80	2	>20	0.850 0

由表 1 可得: 方案 1 和方案 4, 均能满足较少的试验结果下的可靠性抽样检验。方案 4 置信度较低, 虽然较方案 1 试验数量略少, 经济效益略高, 从实际兵力运用方面, 应当选择方案 1: 抽取样品 13 枚进行检验, 可满足置信度 90%、命中目标概率 85% 的装备质量可靠性要求。

3 结束语

合格的武器装备是军队遂行作战任务的物质基础, 而交接验收工作是武器装备由工业部门向作战部队流转的关键环节, 使武器装备在部队产生作战效力成为可能。现代武器装备电子化程度高, 敏感元器件增多, 科学的组织装备抽样检验, 一方面节约了部队的人力、物力、财力, 实现战备物资的高效流通; 另一方面切实减少装备在执行战备任务前的动用频率, 可以有效防止因过度操作导致的装备耗损。

鱼雷小子样抽样检验理论, 是运筹学中最优试验设计分析技术在武器装备领域的具体应用, 在现场试验量较少的情况下, 通过对各种信息进行分析研判, 实现武器交验的辅助决策。上述理论对于试验结果解释的合理性及其使用时的易操作性, 使得在得到同样的置信度条件下, 所需的样本数目大为减少, 从而有效地缩短试验周期, 大大降低试验消耗, 提高试验效率, 其巨大的军事和经济效益, 使

之应用前景更加广泛。

本文以某型鱼雷可靠性抽样检验为基本案例,构建了基于小样本可靠性抽样检测的方案模板,采用了不同抽样方案下的超几何分布计算不同批量时的接收概率,保证了数据的可靠性和方法的简洁性,可实际应用于新装备接装入库、大中修装备返场前实施的装备质量检验工作。

#### 参考文献

- [1] 吴启光, 黄帅, 李国英. (对数)逻辑斯谛克分布下可靠性抽样检验[J]. 数理统计与管理, 2008, 27(6): 1016-1026.
- [2] 宋保维, 邵成, 毛昭勇, 等. 小子样鱼雷湖海试验环境因子折算方法研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(5): 565-567.
- [3] 毛昭勇, 宋保维, 胡海豹. 基于序贯检验后加权检验的鱼雷抽样检验分析[J]. 机械强度, 2009, 31(2): 231-235.
- [4] 邓恩强, 项萍, 李宁. 产品质量抽样检验结果准确性影响因素分析[J]. 现代测量与实验室管理, 2015, 23(2): 46-47.
- [5] 庄常陵. 一次计数抽样检验的风险分析[J]. 绍兴文理学院学报, 2002, 22(2): 10-12.
- [6] 程万影, 徐毅, 郝雪颖. 用 OC 曲线对抽样方案的评价[J]. 国防技术基础, 2008(5): 26-29.
- [7] 刘鸿雁, 胡悦, 张雨晨. 战术导弹批检试验抽样方案设计[J]. 军事运筹与系统工程, 2019, 33(2): 66-70.
- [8] 国防科学技术工业委员会. GJB531A-1996 鱼雷通用规范[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1996: 5-6.
- [9] 丁亚明. 质量监督抽样检验标准的应用和理解[J]. 中国标准导报, 2007, 121(11): 32-33.
- [10] 王瑞臣, 徐文焱, 李建林. 导弹可靠性抽检方案[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(3): 121-124.
- [11] 张晓春, 叶艾, 郑海蛟. 几种数理统计方法应用比较[J]. 电子质量, 2013, 309(10): 42-45.
- [12] 韦金芬, 宋保维, 毛昭勇. 基于复杂系统小子样可靠性综合检验方法[J]. 机械强度, 2012, 34(2): 219-222.
- [13] 范晓冬, 孙蕾. 计数抽样检验方案批接收概率的计算方法[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2005, 26(2): 102-104.
- [14] 赵永刚, 米晓莉. 基于可靠性和命中精度的导弹批抽检方法[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(8): 29-31.

(责任编辑: 肖楚楚)