

# 基于任务次数的舰炮武器系统任务可靠度评估方法

程文鑫<sup>1</sup>, 王寄明<sup>2</sup>, 方子璇<sup>2</sup>

(1. 海装装备项目管理中心, 北京 100036; 2. 中国船舶工业系统工程研究院 武器系统研究所, 北京 100191)

**摘要:** 针对 GJB899A 中规定的可靠性鉴定方法无法应用于机械产品或系统级可靠性指标的验证问题, 基于舰炮武器系统特征的基础上简要分析了传统 LM 法、MML 法的应用特点, 从任务可靠度的定义出发, 简化系统典型任务剖面, 构建系统的模拟试验任务剖面, 利用 GB4087 中贝泽-普拉特近似方法给出系统试验方案, 并将该方法应用于工程上某舰炮武器系统任务可靠度评估, 在最小有效的试验资源消耗的原则下, 可以验证系统的任务可靠度水平; 最后给出了该方法的简要评价, 保证了系统可靠度参数一定的评估精度, 较好的适用于舰炮武器系统任务可靠度的验证。

**关键词:** 任务可靠性; 舰炮武器系统; 贝泽-普拉特近似

## Mission Reliability Evaluation Method for Naval Gun Weapon System Based on Mission Times

Cheng Wenxin<sup>1</sup>, Wang Jiming<sup>2</sup>, Fang Zixuan<sup>2</sup>

(1. Program management center of naval armament department, Beijing 100036, China;

2. System engineering research institute, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Because the reliability evaluation method specified in GJB899A cannot be applied to the verification of mechanical products or system level reliability, and based on the characteristics of naval gun weapon system, the application characteristics of the traditional LM and MML method is analyzed. The research starting from the definition of mission reliability, and the typical mission profile is simplified to build one simulation mission experiment profile using the approximate Beze Pratt method in GB4087. This method has been applied to the reliability assessment on one certain naval gun weapon system. Under the principle of minimum resource consumption and effective, the mission reliability of system can be verified. Finally, a brief evaluation of the method is given to ensure the accuracy of the system reliability parameters.

**Keywords:** task reliability; naval gun weapon system; Beze-Pratt approximation

## 0 引言

舰炮武器系统由机械系统(主要是舰炮发射单元)和电气系统(即搜跟与解算单元)共同构成, 结构复杂, 为鉴定其可靠性单独开展专项可靠性试验, 不仅需要消耗大量的弹药, 而且试验周期较长。任务可靠度是衡量舰炮武器系统任务成功概率的一个重要指标, 目前 GJB899A《可靠性鉴定和验收试验》提供的一系列可靠性鉴定试验方案, 其应用对象为对单机(或分机)设备, 且必须为电子产品(即其寿命分布服从指数分布), 不适用于复杂系统(或整机)的可靠性鉴定。目前工程上比较通用的系统可靠性鉴定方法是将单个设备的可靠性试验次数与故障次数向上(即系统)折合, 形成等效的系统试验次数与成败次数, 然后在系统层面利用试验次数及成败次数计算其任务可靠度, 即所谓的“金字塔式的综合评估方法”, 譬如 LM 法、MML 法等。这些方法虽然在工程上适用性良好, 但对于舰炮武器系统来说仍过于繁琐。另外, LM 法、MML 法的主要思路是将连续型模型转换为成败型模型, 是一种近似的

评估方法, 在精度方面略有缺陷。

本方法从任务可靠度的原始含义出发, 即考察系统在规定的时间内、规定的条件下完成规定任务的能力, 一方面充分利用系统、分系统的试验数据, 另一方面在数学手段上采取 GB4087 中的贝泽-普拉特近似方法, 以确保该方法的实用性与准确性。

## 1 舰炮武器系统组成及任务概述

自 20 世纪以来, 舰炮武器作为海战中主要武器之一, 其性能在实战或训练中得到不断的完善和提高, 并已由舰炮武器发展为了舰炮武器系统。

舰炮武器系统的组成配置原则上是按舰艇的使命任务要求来确定的。无论是简单系统还是复杂系统, 它一般包括 3 个分系统: 一是火力分系统, 主要包括舰炮和弹药系统; 二是火控分系统, 主要包括跟踪传感器(光电和雷达)和火控设备两个子系统; 三是辅助分系统, 主要有舰艇导航系统(平台罗经、计程仪、气象仪、GPS 等信息)、捷联垂直参考装置、测速雷达、自检测试设备、训练仪、信息适配及接口设备等。

随着现代信息化和网络技术的高速发展, 现代化舰炮武器系统呈现出了机电液系统耦合、多专业技术综合、多

收稿日期: 2019-06-10; 修回日期: 2019-06-25。

作者简介: 程文鑫(1977-), 男, 安徽安庆人, 博士, 主要从事装备项目管理与可靠性维修性保障性方向的研究。

源信息融合等特点, 各类型的舰炮武器系统的使命任务也根据环境特点而各不相同。因此, 简单的按照舰船的任务剖面来刻画舰炮武器系统的典型任务, 已经不再适用于现代化舰炮武器系统; 而基于组成设备的试验信息评估舰炮武器系统的任务可靠度, 能否准确描述复杂系统的任务能力, 亦需进一步研究。

综上所述, 现代化舰炮武器系统的任务可靠度评估, 需要针对其组成设备及任务特点, 制定适用的试验任务剖面; 在此基础上, 从任务可靠度的原由是定义出发, 考察其任务完成的能力。

## 2 舰炮武器系统任务可靠度评估方法概述

根据上文的阐述, 舰炮武器系统是由机电液系统综合集成的功能系统。根据对现役系统的使用数据分析, 各组成部分的寿命分布不尽相同。其中以跟踪传感器、辅助测量设备等电子设备, 寿命分布以指数分布为主; 舰炮机械部分, 由于其承担任务为击发弹药, 考核目标一般选取平均无故障间隔发数, 其数学分布与二项分布的拟合度更高。因此, 如果按照基于寿命分布的综合评估, 就必须对舰炮武器系统的机械部分和电气部分分开量化考核, 且无法将机械部分的任务和电气部分的任务能力统一。

舰炮武器系统的任务可靠度评估, 一般是采用不同指数寿命型串联系统评估方法对电气部分进行综合评估, 后单独对二项分布的机械部分进行评估。然后分别考察评估结论对指标要求的满足能力如何。下面对两种方法分别做出阐述。

### 2.1 电气部分的任务可靠度评估

舰炮武器系统的电气部分是由 1 个不同指数寿命型单元串联组成, 一般对各个组成部分分别开展其寿命试验; 如果第  $i$  个设备的试验截至时间为  $t_i$ , 试验故障次数为  $r_i$ , 那么可以采用  $R$  的加权一算术平均近似置信下限的方法来获得电气部分的任务可靠度近似值。

在得到系统某次任务中各个设备的试验时间为  $t_0 = (t_1, t_2, \dots, t_n)$  时, 首先求出各设备的等效试验次数  $\eta_i = \frac{T_i}{t_i}$  ( $i=1, 2, \dots, l$ ), 然后根据下式计算系统电气部分的任务可靠度置信下限  $R_l(t_0)$ :

$$R_l(t_0) =$$

$$\begin{cases} (1-\gamma)^{\frac{1}{\eta}} & \sum_{i=1}^l r_i = 0 \\ \exp\left\{-\frac{r+1}{\eta} \left[1 - \frac{1}{9(r+1)} + \frac{U_\gamma}{3\sqrt{r+1}}\right]^3\right\} & \sum_{i=1}^l r_i > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$$\eta_{\min} = \min\{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_l\}$$

$$\eta = \min\left\{\frac{\sum_{i=1}^l r_i \eta_i}{\sum_{i=1}^l r_i}, \frac{\sum_{i=1}^l \eta_i}{l}\right\} \quad (\sum_{i=1}^l r_i \neq 0)$$

$$r = \eta \sum_{i=1}^l \frac{r_i}{\eta_i}$$

$U_\gamma$  为下侧概率的标准正态分布分位数, 可查正态分位数表获 (GB4080.1)。

上面的方法可以用于在已知系统内电气部分的试验信息时, 对电气部分进行综合评估, 得到其任务可靠度的近似值。对于舰炮武器系统的机械部分, 考核指标往往以平均无故障间隔发数出现, 其寿命分布为二项分布 (即发射成功或发射失败)。假设某舰炮机械部分共发射弹药  $n$  发, 发射结果只有成功或失败, 以  $s$  表示在  $n$  发弹药中成功发射的次数, 那么随机变量  $s$  的概率分布就构成了二项分布。如果该舰炮机械部分的任务可靠度为  $R$ , 那么其单侧置信下限可以通过下式给出:

$$R_l = \sum_{i=s}^n \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-i} = \alpha \quad (2)$$

在评定过程中, 一般射击发数  $n$  和成功发生次数  $s$  可以直接观测得到, 那么可以利用 Matlab 软件包中的 `fzero` 或 `fsolve` 直接求解公式 (2), 也可以查询二项分布函数表近似计算。

综上所述, 一般舰炮武器系统的任务可靠度可以分解为电气部分的任务可靠度及机械部分的任务可靠度, 并可利用公式 (1) 和公式 (2) 分别给出, 并且计算的精度可以得到保证。但是用户更加关心的是, 如何用统一量化的指标描述整个舰炮武器系统的完成任务的能力? 从数学角度分析, 可将舰炮武器系统电气部分视作单元, 利用不同分布的单元串联系统任务可靠度评估方法对系统的任务可靠度进行评定。但这种方法仍然是对系统的任务可靠度进行综合评估, 无法利用全系统试验的结果直接考核。

## 3 基于模拟任务试验剖面的贝泽—普拉特近似

目前国内对于复杂大系统的任务可靠度评估, 主要采用金字塔式试验方法, 即将下一级各功能单元的试验信息向上折合, 再将折合的信息与上一级的试验信息进行综合, 以对各级系统的可靠性进行评定。按此, 可通过少数系统级的试验对复杂系统的可靠性做出高置信度的评定。<sup>[1]</sup>

一般而言, 舰炮武器系统的典型任务剖面需结合作战系统或全舰任务规划制定, 但由于全舰任务周期较长, 若直接用于舰炮武器系统试验方案的制定, 将导致可靠性鉴定试验的周期过长。因此, 在采用本方法之前, 需要明确系统的模拟任务试验剖面。所谓模拟任务试验剖面, 是指在系统的典型任务剖面基础上, 结合系统任务特征, 按照一定的原则来拟定。主要原则可如下:

1) 模拟任务试验剖面的工作应力应能正确反映系统在典型任务剖面的工作流程;

2) 模拟任务试验剖面应尽量压缩典型任务剖面中系统低应力或超低应力的工作时间。

在明确模拟任务试验剖面的基础上, 采用 GB4087 中计算成败型试验可靠性置信下限的贝泽—普拉特近似方法, 确定成败型任务试验的可靠度统计试验方案。计算过程如下:

记失败次数为  $r$ , 试验次数为  $n$ 。

当失败次数  $r = 0, n-1, n$  时, 分别按  $\sqrt[n]{\alpha}, 1 - \sqrt[n]{1-\alpha}$  和 0 计算  $\hat{R}_L$ , 当失败次数  $r = 1, 2, 3$  时按对数伽玛近似计算, 其他场合用贝泽—普拉特近似计算。由此,  $R$  的置信度为  $1 - \alpha$  的置信下限可表示为:

$$R_L = \begin{cases} \sqrt[n]{\alpha}, & \text{当 } r = 0 \text{ 时} \\ \exp\left(-\frac{\chi_{1-\alpha}^2(2Z)}{2\eta}\right), & \text{当 } r = 1, 2, 3 \text{ 时} \\ h^{-1}(u_\alpha), & \text{当 } 4 \leq r \leq n-2 \text{ 时} \\ 1 - \sqrt[n]{1-\alpha}, & \text{当 } r = n-1 \text{ 时} \\ 0, & \text{当 } r = n \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$Z = \frac{\ln\left(\frac{n+1}{n-r}\right)}{\ln\left(\frac{\eta+1}{\eta}\right)}, \eta = \frac{3-c}{2(c-1) - 0.355(c-1)^3}, \quad (4)$$

$$c = \frac{\ln\left(\frac{n+1}{n-r}\right)}{\ln\left(\frac{n+2}{n-r+1}\right)}$$

而  $h^{-1}(u_\alpha)$  为函数  $h(y)$  的反函数在正态分布分位点  $u_\alpha$  处的值, 这里  $h(y)$  为:

$$h(y) = \frac{d}{|r+0.5-n(1-y)|} \left\{ \frac{2}{1+\frac{1}{6n}} \times \left[ (r+0.5)\ln\frac{r+0.5}{n(1-y)} + (n-r-0.5)\ln\frac{n-r+0.5}{ny} \right]^{1/2} \right\} \quad (5)$$

其中:

$$d = r + 0.5 + \frac{1}{6} - \left(n + \frac{1}{3}\right)(1-y) + 0.02 \left( \frac{y}{r+1} - \frac{1-y}{n-r} + \frac{R-0.5}{n+1} \right) \quad (6)$$

不过, 在具体计算时,  $\hat{R}_L = h^{-1}(u_\alpha)$  需要借助数值方法求解, 上述近似计算的精确度较高, 绝对误差小于  $10^{-4}$ 。

根据上述公式, 根据给定的置信度  $1 - \alpha$  以及统计得到的试验次数  $n$  与失败次数  $r$ , 可以求出置信下限  $\hat{R}_L$ , 比较  $\hat{R}_L$  是否满足指标规定的  $R$  即可。

开展系统可靠性鉴定, 通常希望在有限的试验次数下能得到结论, 即结果可以“提前收敛”。因此, 按照序贯统计试验的思路, 可以按照  $\hat{R}_L \geq R$  反推有限试验次数  $n$  内的失败次数  $r$  是否大于某个值  $r^*$ , 判断系统任务可靠度是否达到最低可接受值的指标要求, 进一步减少试验消耗。

按照上文分析过程, 可给出几组自变量空间  $\{\theta, R\}$  下的应变变量空间  $\{L, L_{\text{拒}}\}$  的函数关系, 如表 5 所示。

根据上表分析可知, 在用于评估相同可靠度的序贯方案中, 置信度较高的方案所需试验次数较多; 在置信度一定的条件下, 可靠度较高的序贯评估方案所需试验次数较多, 且随着可靠度数值的增长, 所需试验次数的增长速度会变得越来越快, 这意味着基于贝泽—普拉特近似的序贯方案在评估较高可靠度的系统时, 指标的敏感程度较高, 从而保证了对于高可靠度系统评估的精度。

表 1 基于贝泽—普拉特近似的序贯方案表

方案号	$\theta$	$R$	$L/L_{\text{拒}}$
1	0.7	0.7	4/0.6/1,10/2,14/3
2	0.7	0.75	5/0.7/1,12/2,17/3
3	0.7	0.80	6/0.9/1,15/2,21/3
4	0.7	0.85	8/0.12/1,20/2,28/3
5	0.7	0.90	12/0.18/1,30/2,42/3
6	0.7	0.91	13/0.20/1,34/2,47/3
7	0.7	0.92	15/0.23/1,38/2,52/3
8	0.7	0.93	17/0.26/1,43/2,60/3
9	0.7	0.94	20/0.31/1,51/2,70/3
10	0.7	0.95	24/0.37/1,61/2,84/3
11	0.8	0.7	5/0.8/1,12/2,16/3
12	0.8	0.75	6/0.9/1,14/2,19/3
13	0.8	0.80	8/0.11/1,18/2,24/3
14	0.8	0.85	10/0.15/1,24/2,32/3
15	0.8	0.90	16/0.23/1,36/2,49/3
16	80	0.91	18/0.26/1,40/2,54/3
17	80	0.92	20/0.29/1,45/2,61/3
18	80	0.93	23/0.33/1,52/2,70/3
19	80	0.94	27/0.39/1,60/2,81/3
20	80	0.95	32/0.46/1,73/2,98/3

注: 1、各变量含义:  $\theta$ : 置信度;  $R$ : 任务可靠度;  $L$ : 试验次数;  $L_{\text{拒}}$ : 最大失败次数。

2、若  $\theta$  与  $R$  未在上表中, 则可利用 Matlab 等工具逼近求解。

#### 4 应用案例

现对某型舰炮武器系统评估其任务可靠度。首先明确其指标要求, 在该系统研制要求中, 规定该系统在 3 个任务 ( $Q_1, Q_2, Q_3$ ) 在置信度  $\theta$  取 80% 时, 其指标要求 (任务可靠度的置信下限分别为  $R_1, R_2, R_3$ ) 为:

$$Q_1: R_1 \geq 0.70$$

$$Q_2: R_2 \geq 0.91$$

$$Q_3: R_3 \geq 0.92$$

3 个任务指标为 0.70、0.91、0.92, 指标两两之间离散度不同, 根据基于任务次数的复杂系统任务可靠度评估方法得到基于贝泽—普拉特近似的序贯方案, 并对方案的可行度进行评定。系统 3 个任务的任务可靠度最低可接受值、置信度已给定, 现需要给出该系统鉴定试验方案。按照上述方法, 首先根据典型任务剖面给出更为合适的模拟任务试验剖面。针对 3 个系统任务, 由设计师与用户拟定确定了 3 个模拟任务试验剖面:

表 2 某系统的模拟试验任务剖面

任务名称	任务流程描述	系统连续工作时间/h
$Q_1$	由设计师拟定, 与用户沟通后确定	一般小于典型任务周期
$Q_2$	由设计师拟定, 与用户沟通后确定	一般小于典型任务周期
$Q_3$	由设计师拟定, 与用户沟通后确定	一般小于典型任务周期

系统需要按照模拟试验任务剖面进行试验, 接收判据中试验次数和可接受的失败次数, 可根据上述方法计算得出。得到的基于任务次数序贯检验法接收判据如下:

表 3 基于任务次数序贯检验法接收判据

任务名称	试验次数/可接受的失败次数			
$Q_1$	5/0	8/1	12/2	16/3
$Q_2$	18/0	26/1	40/2	54/3
$Q_3$	20/0	29/1	45/2	61/3

根据表 3 可知, 当考核  $Q_1: R_1 \geq 0.70$  时, 按照模拟试验任务剖面进行 5 次试验中失败次数为 0 次, 或进行 8 次试验失败中次数不超过 1 次, 或进行 12 次试验中失败次数不超过 2 次, 或进行 16 次试验失败中次数不超过 3 次, 则可停止试验, 接受  $Q_1: R_1 \geq 0.70$ , 认为系统可靠度在置信度为 0.8 的情形下达到了研制要求; 当考核  $Q_2: R_2 \geq 0.91$  时, 按照模拟任务试验剖面进行 18 次试验失败中次数为 0 次, 或进行 26 次试验中失败次数不超过 1 次, 或进行 40 次试验中失败次数不超过 2 次, 或进行 54 次试验中失败次数不超过 3 次, 则可停止试验, 接受  $Q_2: R_2 \geq 0.91$ , 判定系统可靠度在置信度为 0.8 的情形下达到研制要求; 当考核  $Q_3: R_3 \geq 0.92$  时, 按照模拟任务试验剖面进行 20 次试验中失败次数为 0 次, 或进行 29 次试验中失败次数不超过 1 次, 或进行 45 次试验中失败次数不超过 2 次, 或进行 61 次试验中失败次数不超过 3 次, 则可停止试验, 接受  $Q_3: R_3 \geq 0.92$ , 判定系统任务可靠度在置信度为 0.8 的情形下达到研制要求。

随后, 根据 3 个任务的模拟试验任务剖面开展了系统试验, 得到 3 个任务的试验结果以及满足研制要求情况如表 4 所示。

表 4 模拟任务试验结果

任务名称	试验结果试验次数/ 试验失败次数	接收判据试验次数/ 可接受的失败次数	是否满足 研制要求
$Q_1$	7/0	5/0	满足
$Q_2$	20/0	18/0	满足
$Q_3$	22/0	20/0	满足

(上接第 237 页)

## 7 结论

高速公路智能管控系统与外部数据接入模块的设计实施, 从宏观上来指导高速公路数据共享系统规划和建设, 使高速公路智能管控系统建立在数据共享机制的基础之上, 充分利用各种数据资源, 探索与挖掘数据之间的关联信息, 使其能够更好地为智能高速的指挥控制和建设服务。

并通过京港澳高速驻信段的实施应用, 使外部数据接入设计不是简单地停留在概念设计阶段, 而是以京港澳高速公路驻信段智能管理科技示范工程为依托, 在其之上充分验证数据共享建设的可行性, 使其未来能够推广到京港澳高速全段, 乃至全国高速公路, 形成国家高速公路数据共享机制建设标准。它的建设对于未来中国高速公路智慧化发展有着非常重要的示范作用。

### 参考文献:

[1] Klein LA. Sensor and data fusion: a tool for information assessment and decision making [M]. Second Edition, SPIE Press, 2012, 512.

针对 3 个系统任务, 即  $Q_1, Q_2, Q_3$  开展的模拟任务试验次数分别为 20 次、20 次和 22 次, 均未出现任务失败的情况, 且试验次数达到了试验接受判据的规定的试验次数要求, 因此, 在置信度为 0.8 条件下, 系统的任务可靠度满足研制要求。

## 5 结束语

本方法在结合系统任务特点的基础上, 充分参考 GB4087 对于小样本成型型的可靠度评估思路, 具备以下优点:

1) 独特性: 本方法需要事先规定系统模拟任务试验剖面, 基于系统的真实任务执行过程, 按照“压缩低应力, 突出高应力”的构建思路, 对舰船总体的典型任务剖面进行解析, 并对舰炮武器系统的典型任务进行重构, 形成舰炮武器系统的模拟任务试验剖面, 具有针对性和独特性;

2) 科学性: 在计算试验方案时, 按照 GB/T 4087—2009《数据的统计处理和解释, 二项分布可靠度单侧置信下限》的要求进行近似计算, 对失败次数超过 1 时的情形, 按对数伽玛近似式计算, 其他场合用贝泽—普拉特近似计算。且该计算方式不局限于系统的寿命分布形式 (只要概率函数为任务可靠度), 具有普适性和科学性。

后续研究重点:

该方法为近似计算方法, 且需要事先针对任务剖面进行重新拟定。如何充分利用系统任务过程中, 各单机的工作信息, 精确的折算为系统任务信息, 是未来对于系统可靠度评估工作研究的重点与热点内容。

### 参考文献:

[1] 刘春和, 等. 武器装备可靠性评定方法 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.

[2] 交通运输部. “十三五”公路养护管理发展纲要 [R]. 2016.

[3] 王 炜, 过秀成. 交通工程学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.

[4] 王笑京. 公路网运行监测与服务暂行技术要求 [M]. 北京: 人民交通出版社出版, 2012.

[5] 刘犇堃. 国外高速公路信息化发展现状简析及其启示 [J]. 中国管理信息化, 2018, 21 (15): 134—136.

[6] 张纪升, 李 斌, 王笑京, 等. 智慧高速公路架构与发展路径设计 [J]. 公路交通科技. 2018 (1): 88—94

[7] 刘犇堃, 冀金科, 张广浩, 等. 京港澳高速驻信段智能管控需求分析 [J]. 中国交通信息化, 2018 (22): 77—78.

[8] 张 勇, 缪和匠. 视频事件检测和图像筛选技术在永武高速公路视频监控系统的运用 [J]. 交通节能与环保, 2011 (2): 52—56.

[9] 彭家一. 高速公路应急管理系统的研究与应用 [D]. 西安: 长安大学, 2016.

[10] 张文溥. 道路交通检测技术与应用 [M]. 人民交通出版社, 2010.

[11] 姜桂艳. 道路交通状态判别技术与应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.