

# 导弹产品贮存中的备件问题研究

航天科工集团公司四部研究员 李久祥  
中国航天标准化研究所高级工程师 张云中  
中国航天标准化研究所研究员 任立明

**摘 要** 备件保障是保证导弹系统战备完好性和作战能力的重要因素, 谋求导弹产品维修备件需求与备件配置的平衡是一项长期未解决的难题。本文对导弹产品贮存中的备件问题作一全面分析, 为导弹产品筹划备件提供思路和方法。

**关键词** 贮存 备件 数学模型

## 1. 前言

备件保障是保证战备完好性和作战能力的重要因素, 谋求产品维修备件需求与备件配置的平衡是一项长期未解决的难题。在许多产品的备件保障中, 备件数量的确定, 普遍采用等比例备份的模式, 这种模式导致故障率高的产品缺少备件, 故障率低的产品积压备件, 备件需求量与实际配置失衡, 部分产品不能及时维修, 系统的战备完好性下降。

为了改进备件的筹划工作, 本文对产品贮存中的备件问题做一全面分析, 给有关产品筹划备件提供一些思路和方法。

## 2. 备件及其意义

备件系指为保证产品在贮存期内的使用和维修而向用户提供的易损件或常用更换件。

“易损件”系指在贮存过程易出现故障或失效的设备、零部件和元器件。例如失效率高的薄弱环节。

“常用更换件”系指在预防性维修或整修中虽未失效, 但仍需更换的设备、零部件和元器件。例如非金属件、紧固件、火工品等。

产品在其规定的贮存期内, 从验收交付到寿命结束, 大多要经历长期贮存、一次使用的过程。在长期贮存中, 由于经受各种环境应力的作用, 产品随时都有可能发生故障或失效。

为了延长单件产品的贮存寿命和服役型号的贮存期, 保证产品应有的战备完好性和作战能力, 提高产品的保障水平, 需要对预防性维修和修复性维修中必须更换的产品, 提供一定数量的备件。现已普遍认为: 备件是产品重要的保障要素之一, 没有备件, 产品便会瘫痪, 整个作战实力就会大幅下降。因此, 认真研究贮存中的备件问题非常必要, 解决有关备件问题意义重大。

## 3. 导弹产品贮存中的备件种类和数量

产品一般分为弹上武器系统和地面保障设备。弹上武器系统包括  $L$  个独立的分系统, 每个分系统包括  $m$  台设备, 每台设备包括  $n$  个元件。

备件的种类和数量是由产品在各项维修中的需要来确定的。备件的种类是根据产品的维修项目需求而定, 一般有设备、零部件、元器件。备件的数量是根据产品的贮存(含短时间工作)失效率、备件保障概率、保障任务时间和经费等约束条件

而定。

#### 1) 确定备件种类的原则

(1) 根据产品的自然寿命、技术寿命和经济寿命综合权衡。

(2) 固有贮存期长、贮存可靠性高的产品,在一定保障任务时间内不设备件,如弹体结构壳段、弹头壳体。

(3) 大型组合体、价值昂贵、更换困难的产品在一定时间内不设备件,如固体发动机。

(4) 电子和机械设备、零部件、元器件,应对其薄弱环节设置备件。

(5) 固有贮存期较短和不可修设备,应设置备件,如电池、火工品和灌封后的电子设备。

(6) 分解再装过程中的消耗品和必须更换件,贮存过程中易老化的部件等,应有备件、备品,如密封圈、减振垫、紧固件、润滑剂等。

#### 2) 确定备件数量的原则

(1) 备件的数量应根据订购产品的总数、维修任务需求、产品的生存能力和定期检测的抽样比例等因素综合考虑。

(2) 贮存失效率低的产品可少备或不备;贮存失效率高的产品可以多备或分批备。

(3) 不可维修的产品应多备,可维修的产品应少备。

(4) 分批抽检的产品应少备。

(5) 备件数量应满足获取(或保障)概率的要求。

(6) 预防性维修和修复性维修中的必须更换件可适当多备。

(7) 备件数量应保持产品维修备件需求与备件配置的平衡。做到需用时有备件,但库存数量不宜过多。对平时备件,可定期调整备件需求与保障数量的平衡。

### 4. 计算备件数量的几种方法

#### 1) 泊松分布模型

参考文献[1]、[2]、[3]、[4]、[5]、[6]、[7]中推荐了泊松分布模型。由于泊松分布理论假设的现实性,得到了各方面的应用。例如在电话服务、机器检修、质量检查、海洋作战等方面。

泊松分布模型以规定时间 $t_i$ 内的期望失效数 $m=n_i \lambda t_i$ 为基础, $S$ 个备件的获取概率为 $P$ 的计算式:

$$P = \sum_{j=0}^S \left[ \frac{(n_i \lambda t_i)^j e^{-n_i \lambda t_i}}{j!} \right] \quad (1)$$

式中 $n_i$ ——第 $i$ 种产品的装配数;

$\lambda$ ——第 $i$ 种产品的贮存失效率;

$t_i$ ——第 $i$ 种产品的贮存期(或保障任务时间);

$S$ ——产品中第 $i$ 种产品的备件需求数;

$P$ ——获取备件的概率。

#### 2) 近似正态分布模型

在参考文献[2]、[3]、[4]、[5]、[6]、[7]、[8]、[9]中推荐了近似正态分布模型。

该模型以期望失效数为基础,利用泊松分布数学期望与方差相等的特点,给出满足获取备件概率为 $P$ 的备件上限的计算式:

$$n_{Bi} = n_i \lambda t_i + k_p \sqrt{n_i \lambda t_i} \quad (2)$$

式中 $n_i$ ——第 $i$ 种产品的装配数;

$\lambda$ ——第 $i$ 种产品的贮存失效率;

$t_i$ ——第 $i$ 种产品的贮存期(或保障任务时间);

$P$ ——获取备件的概率;

$k_p$ ——概率 $P$ 的正态分布分位点;

$n_{Bi}$ ——产品中第 $i$ 种产品需求的备件上限。

#### 3) 威布尔分布模型

(1) 在参考文献[5]、[7]中推荐了如下获取 $S$ 个备件概率为 $P$ 的备件计算式:

$$S = \left\lceil \frac{U_p k}{2} + \sqrt{\left( \frac{U_p k}{2} \right)^2 + \frac{t}{E}} \right\rceil^2 \quad (3)$$

式中 $U_p$ ——概率 $P$ 的正态分布分位点;

$E$ ——平均寿命,当位置参数 $\gamma=0$ 时,

$$E = \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right);$$

$\beta$ ——形状参数;

$\eta$ ——尺度参数;

$k$ ——变异系数,对指数分布 $k=1$ ,对威布尔

$$\text{分布 } k = \sqrt{\frac{\Gamma(1+2/\beta)}{\Gamma(1+1/\beta)^2} - 1}。$$

(2) 在参考文献[4]中推荐了如下获取 $S$ 个备件概率为 $P$ 的计算式:

设产品寿命分布为3个参数的威布尔分布,有分布函数 $F(t) = 1 - \exp \left\{ - \left[ (t - t_0) / \alpha \right]^\beta \right\}$ ,  $t \geq t_0$ ,  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  ( $\beta$ ——形状参数,  $t_0$ ——位置参数,  $\alpha$ ——尺度参数)。

$$S = \left\lceil L(1-\mu) \frac{T}{m} + U_p \sqrt{L(1-\mu) \frac{T}{m} \left\{ \mu + (1-\mu) \frac{\sigma^2}{m} \right\}} \right\rceil \quad (4)$$

式中  $T$ ——产品贮存任务时间 (贮存期);

$L$ —— $MN$  ( $M$ —共有产品数,  $N$ —机用装配数);

$m$ ——与  $F(t)$  所对应的均值,  $m = \alpha \Gamma(1+1/\beta)$

$+t_0$ ;

$\sigma^2$ ——与  $F(t)$  所对应的方差,  $\sigma^2 = \alpha^2 [\Gamma(1+2/\beta) - (\Gamma(1+1/\beta))^2]$ ;

$U_p$ ——概率  $P$  的正态分布分位点;

$\mu$ ——产品修复率;

$[(x)]$ ——表示不小于  $x$  的最小整数。

#### 4) 二项分布模型

在参考文献 [5] 中推荐了二项分布模型。它提供了获得  $S$  个备件概率为  $P$  的计算式:

$$P = \sum_{i=n}^{n+S} \frac{(n+S)!}{(n+S-i)!} R_Y(T)^i [1-R_Y(T)]^{n+S-i} \quad (5)$$

式中  $n$ ——在产品上的装配数;

$S$ ——所需备件数;

$T$ ——保障任务时间 (或贮存期);

$R_Y(T)$ ——贮存期内的使用可靠性下限 (贮存可靠性与工作可靠性的乘积);

$P$ ——获取备件的概率。

将  $S=0, 1, 2, \dots$  逐个代入 (5) 式, 直到某一值得使得右端的和式等于或开始大于规定的概率  $P$ , 该值即为所求的备件数。

#### 5) 指数分布模型

在参考文献 [10] 中推荐备件计算模型, 该模型给出满足相关条件的备件上限。

$$n_{Bi} = \min \left\{ r \mid \frac{1}{2L_i \lambda_{ii}} \chi^2_{1-R_0, (2r+2)} \geq t_0, r=0, 1, 2, \dots \right\} \quad (6)$$

式中:

$L_i$ ——第  $i$  种产品装配数;

$\lambda_{ii}$ ——第  $i$  种产品的贮存失效率上限;

$R_0$ ——规定的贮存可靠度 (指标值);

$t_0$ ——规定的贮存期 (指标值);

$\chi^2_{1-R_0, (2r+2)}$ ——自由度为  $(2r+2)$  的  $\chi^2$  分布下侧分位点;

$n_{Bi}$ ——第  $i$  种产品的备件上限。

#### 5. 几种计算方法间的关系

通过概率统计理论的分析, 几种概率分布间存

在如图 1 所示的关系:

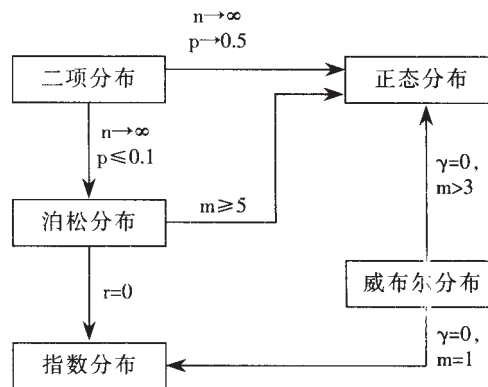


图 1 几种概率分布间的关系

#### 6. 影响确定备件数量的有关因素

在产品的贮存使用中, 完全做到“备件需求与配置的平衡”并非易事。这是因为: 一个准确的备件数量涉及到许多基本条件的正确运用, 如果基本条件选用不当, 则计算结果会千差万别。例如:

##### (1) 计算的数学模型是否合理

从现有参考文献得知, 计算备件数学模型的选择, 应遵循如下原则:

- 理论上具有合理性、普遍性和代表性;
- 计算要求条件少, 操作便捷;
- 计算结果与其它模型相近。

##### (2) 计算用的失效率数据是否准确

在各种备件计算的数学模型中, 几乎都无一例外地需要已知产品的失效率数据, 否则, 就无法计算。即如有了失效率数据, 也仍然涉及到数据的性质及准确度问题。

这里应明确指出的是, 计算产品平时贮存中的备件数量时, 应采用贮存失效率。这类数据应从产品的贮存过程 (含定期检测) 中得到。同时, 计算失效率时应剔除一切虚假数据, 尤其在计算战时损伤备件时, 所用失效率数据更要认真分析论证。

##### (3) 计算用的任务时间是否可行

在计算中都要用到“任务时间”这一参数。在一些产品上, “任务时间”分别使用了保险期、观察期、计划时效期、贮存期、保障期和保证期等, 各种称呼极不规范。贮存期是产品的正式战术技术指标, 其工程含义已有明确的标准定义, 保障期是

从保障性的范围提出的,其工程含义与贮存期相近,其它称呼都是从使用角度提出来的,但都没有标准化、规范化的解释。

不同的产品有不同的贮存期指标,设置备件的目的为保障产品在贮存期内的维修。在计划初始备件时,常以产品的贮存期作为任务时间;在计划后续备件时,常以延寿时间作为任务时间。

#### (4) 计算用的获取备件的概率是否恰当

在计算中都要设定“获取备件的概率”。这一概率的大小,直接影响到备件的数量。一般取值在0.5~0.9范围内,要求概率越大,则备件数量越多。对于不同的产品,可有不同的概率要求。贮存失效率低的一般产品,可以要求低一些的获取概率,贮存失效率高的关键产品,可以要求高一些的获取概率。

#### (5) 产品的特点是否清楚

从维修性方面分析,产品分为不可维修产品和可维修产品两大类,其备件也分为不可修备件和可修备件两大类。在不可修产品类内,在经费约束条件下,贮存失效率高的可分批筹划备件,贮存失效率低的可一次配齐备件。在可维修产品类内,由于维修后的产品可继续当作备件使用,因此备件的数量要比不可维修产品的备件明显地少,尤其是可多次维修的备件可重复多次使用,如印制板等。

从产品在贮存期内的定期检测方案分析,产品数量不多的情况下,一般采用全数定期检测,所需备件数量也是从产品总的数量考虑。如果产品批量较大,总的数量较多,则定期检测就要采取按百分比抽检的方案,其所需备件数量要比全数检测的备件数量少,并且第一次检测维修后的产品又可当作第二次、第三次抽检时的备件使用。

#### (6) 备件也有贮存失效问题

在一些计算备件的数学模型中,没有考虑备件也有贮存失效问题,从而导致实际应用备件时,剩余状态完好的备件数量达不到要求的获取概率。于是,就必须在计算备件无失效的基础上,增加备件有失效的附加备件数。为此,可用数学模型或按比例计算得到附加备件数。例如,计算中的产品平均失效数为 $m_0=n\lambda$ ,计算后的备件数为 $n_{b0}$ ,然后再计算 $n_{b0}$ 在贮存任务时间内的平均失效数 $m_1=n_{b0}\lambda$ ,针对 $m_1$ 计算附加备件数 $n_{b1}$ ,这里有三种方法:

a) 件 $n_{b0}$ 失效多少补多少,按平均失效数增补;

b) 比例增补;

c) 数学模型计算。

#### (7) 战损备件的计算问题

战损备件的计算比较困难,涉及的有关因素与平时初始备件计算不大相同。首先是失效机理的不同,平时备件数量的计算是基于产品的贮存失效机理与失效模式,而战损备件计算是基于战场实际损伤情况,如射弹损伤、破片损伤、燃烧损伤与核爆炸综合损伤等,此外,还包括产品在战场的随机故障、耗损故障、意外事故或人为差错造成的损伤。在战时,受战斗损伤的机件和部位也带有很大的偶然性,平时常出故障的部位,战时可能未受损伤,而平时几乎不出故障的部位,如油管、导管、电缆、结构件等,由于占据的面积较大,战时却容易受到损伤,战时需要更换的概率比平时高出一个数量级。其次是战争的规模不同,小打、中打或是大打,所需的备件数量也不同,战争中使用的武器越先进,造成对方损伤的程度也越大。这些情况,致使器材备件不仅在数量上与平时有很大不同,而且品种、规格也有较大差别。有些资料推荐战损备件是平时备件的1.6~2.2倍,这种估计的依据值得研究。

战损备件的计算,至今尚未见到适用的数学模型,主要是参考已有战例的统计数字和推演未来战场损伤的结果。

战损备件问题涉及到战场损伤评估与战损修复两部分内容。战场损伤评估是评估产品损伤的程度,它是实施战损修复的基础与前提。只有高效、快速、准确地对产品战损情况进行评估,才能确保战损修复的顺利进行。评估以产品的基本功能为依据,不同的产品有不同的基本功能,也有不同的战损模式,针对每种战损模式及发生的概率,具体分析战损对基本功能的影响、能否修复、修复的时间、人力和资源、要完成修复工作和修复后的使用前景等作出评估,然后才是实施修复。一般情况下,可参考如下原则:

a) 不伤及基本功能的,则不必修理,只做例行的功能检查,即可继续使用;

b) 如果不修理,仍可执行其部分功能的,则推迟修理,但使用会受到一定的限制,也要进行功能检查;

c) 如果现有保障条件无法修好,或短时间内

无法修理好，则不予修理，退出使用；

d) 如果现有保障条件能够在规定的时间内修理好，则进行修理；

e) 如果修理条件和时间允许按标准修理，则实施标准修理。

在确定修理之前，要根据产品的战损特点，确定必须修理的具体部位，估计修复所需时间（包括管理时间和等待时间）、工具、设备、器材、备件、专业技术人员的种类、数量、技术水平及修理措施等。

战损评估是一个决策过程，即全面地了解和掌握情况，运用知识和经验进行科学的分析，最后做出是否必须修理和进行何种修理的决策。

战损修复以恢复产品主要的功能为目的，要求简单、快速、有效。一般的修复方法包括切换、剪除、拆换、替代、重构、原件修复和制配等几种。

7. 计算应用的比较

1) 应用评价（见表 1）

表 1 各类计算模型的应用评价

| 计算模型   | 应用评价                                                                                                    |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 近似正态分布 | (1) 要求已知条件少；<br>(2) 理论上有代表性；<br>(3) 操作简便。                                                               |
| 泊松分布   | (1) 要求已知条件少；<br>(2) 理论上有代表性；<br>(3) 操作不方便，尤其当 $S$ 较大时，须繁杂计算，才能得到近似范围；<br>(4) 只能对整数计算，准确结果须对近似范围插值后才能得到。 |
| 二项分布   | (1) 要求已知条件多；<br>(2) 操作不便。                                                                               |
| 威布尔分布  | (1) 要求已知条件多，且不易获得准确的有关参数，并最终影响计算结果的准确性；<br>(2) 操作不方便。                                                   |
| 指数分布   | (1) 要求已知条件较少；<br>(2) 缺少备件获取概率；<br>(3) 操作不便，尤其当 $r$ 较大时，需多次试算并最后插值。                                      |

2) 计算例

例 1: 已知某产品上共安装闸流管 20 只，闸流管失效率为  $10^{-4}$  次/h，任务时间  $t=10000h$ 。求在保障概率  $P=0.9$  的条件下，需要多少备件？

解: a) 利用泊松分布模型式 (1) 计算，将已知条件代入 (1) 式， $n\lambda=20$ ， $P=0.9$ ，经 26 次迭代运算后，得到  $S=26$ ，即需要备 26 支闸流管。

b) 利用近似正态分布模型式 (2) 计算，将已知条件代入 (2) 式， $n\lambda=20$ ， $k_p=1.28$ ，得到  $n_B=25.72$ ，即需要备 25.72 支闸流管。

两种分布模型计算结果取整后，皆为 26 只。

例 2: 已知某产品上共安装印制板 20 块，其失效率为  $10^{-5}$  次/h，任务时间  $t=4320h$ 。求在保障概率  $P=0.95$  的条件下，需要多少备件？

解: a) 利用泊松分布模型式 (1) 计算，将已知条件代入 (1) 式， $n\lambda=0.864$ ， $P=0.95$ ，经 2 次运算后，得到  $P=0.9428$ ，即  $S=2$  时，不满足  $P=$

0.95 的要求。经 3 次迭代运算后，得到  $P=0.9882$ ，即  $S=3$  时，大于  $P=0.95$  的要求。因此，需在 2~3 间插值，求出满足  $P=0.95$  对应的  $S=2.2033$ ，即需要备 2.2033 块印制板。

b) 利用近似正态分布模型式 (2) 计算，将已知条件代入 (2) 式， $n\lambda=0.864$ ， $k_p=1.65$ ，得到  $n_B=2.397$ ，即需要备 2.397 块印制板。

两种分布模型计算结果取整后，皆为 3 块。

例 3: 已知某一机电件寿命为威布尔分布，尺度参数  $\eta=10^3h$ ，形状参数  $\beta=2$ ，任务时间  $t=10000h$ 。求在保障概率  $P=0.9$  的条件下，需要多少备件？

解: a) 利用威布尔分布模型式 (3) 计算，将已知条件代入 (3) 式，平均寿命  $E=\eta\Gamma(1+1/\beta)=10^3\Gamma(1+0.5)=886h$ ， $k=0.5227$ ， $U_p=1.28$ ，解出  $S=13.76$ ，取整后  $S=14$ ，即需要 14 个备件。

(下转第 37 页)

节约了成本,提高了生产效率。使用情况表明,某组件质量稳定、可靠,为航天型号产品的批生产质量和进度提供了有力的保障。

### 十一、巩固措施

为进一步巩固成果,控制并稳定某组件一次焊接合格率,小组针对各项对策制订了相应的巩固措施:

1. 将铁芯内部的焊料装填量写入《某组件工艺规程》,由检验员负责在现场检验。
2. 塑料管妥善保管,每次使用后将管内残留的焊料清洗干净,用吹风机吹干。将此措施纳入《某组件工艺规程》并在生产中执行。

### 十二、活动体会与今后打算

#### 1. 体会

活动前后,QC小组在质量意识、问题意识和团队精神等方面都有所提高。

#### 2. 今后打算

将解决某组件真空钎焊的焊缝有裂纹问题作为下一步的活动内容,使一次焊接合格率进一步提高。

(上接第 13 页)

b) 利用近似正态分布模型式 (2) 计算,将已知条件  $n=1$ ,  $\lambda=1/E=1/886$ ,  $t=10000h$ ,  $k_p=1.28$  代入 (2) 式,得到  $n_B=15.586$ 。当形状参数  $\beta=3.2$  时,  $n_B=14$ 。

### 8. 结论

综上所述,近似正态分布计算模型要求条件少,操作简捷,不需要迭代、插值,一次计算即可完成,计算结果与其它分布模型十分接近,便于工程应用。这一模型已纳入航天产品计算备件的标准。为了确保计算结果的准确性,建议由采购产品的总量  $N$ 、每单元装配数  $n$ 、贮存失效率  $\lambda$  和贮存任务时间  $t$  共同计算失效数,以使平均失效数大于 5,并减少“取整”所造成的误差。备件种类与数量的最终确定,可参照类似型号现场供应保障评价加以综合权衡。

### 参考文献

- [1] [苏联] B.A 鲁茨基著. 无线电电子设备的可靠性与有效性的计算. 国防工业出版社, 1966.
- [2] 李久祥, 刘春和. 导弹贮存可靠性设计应用技术. 北京: 海潮出版社, 2001 年 9 月.
- [3] 高明坤. 导弹与检测设备备份数的确定方法. 系统工程与电子技术, 1993 年第 3 期.
- [4] 李金国, 丁红兵. 备件需求量计算模型分析. 电子产品可靠性与环境试验, 2000 年第 3 期 (广州) .

- [5] 肖名珠. 备品备件数量确定方法的研究. 中国电子学会可靠性分会第十二届学术年会论文集, 2004 年 10 月重庆.
- [6] 马绍民. 综合保障工程 [M]. 国防工业出版社, 1995 年.
- [7] 杨秉喜, 张义芳, 熊勇. 备件需求量计算模型及其在地面雷达中的应用. 电子产品可靠性与环境试验, 2000 年第 6 期.
- [8] [日] 盐见 弘著. 可靠性工程. 科学出版社, 1982.
- [9] 李久祥, 陈元亨. QJ1549-88 固体战略导弹贮存期评定规范.
- [10] 李俊才, 靳长权.  $\times\times$  平台系统贮存延寿贮存期评定方法. 航天工业总公司第十六研究所 1994 年 11 月.
- [11] 市田嵩. 机器信赖度的测定. 信赖度及品质管理研委资料, 电气通信学会, 1968.
- [12] M.zelen, statistical Theory of Reliability, Univ. of Wisconsin Press, 1963.
- [13] R.A.Evans, A Generalized Limit Theorem for Rel, IEEE R-18 No.2, 1969.
- [14] 刘华安. 型号导弹备件平时管理与决策支持系统. 第二炮兵工程学院学报, 1997 年 5 月.
- [15] 杨秉喜等. GJB4355-2002 备件供应规划要求.
- [16] 朱华邦, 李媛媛, 李正贵. 浅谈装备的战场损伤评估与修复. 湖北航天科技, 2005 年第 6 期.