

# 舰艇随船备件需求量的数学模型研究

敬 军

(中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉, 430064)

**摘 要** 针对舰艇的随船备件需求, 在现有的备件数量计算模型上, 分别建立了基于经济性和任务成功性的备件需求量数学计算模型, 并利用实例进行了计算演示。理论分析和实例计算表明了该模型的合理性和可行性, 对于新装备备件数量的确定具有指导作用。

**关键词** 舰艇; 备件; 数学模型

**中图分类号** TB114.3: U662.2      **文献标识码** A      **文章编号** 2096-5753(2021)01-0063-04

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.01.011

## Research of Mathematical Models for Demanded Quantity of Onboard Spare Parts for Ships

JING Jun

(China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

**Abstract** Aiming at the requirements of onboard spare parts for ships, mathematical models of demanded quantity of spare parts based on the economic analysis and the mission reliability analysis are established respectively depending on the current mathematical model of spare parts quantity in this paper, and a calculation is demonstrated by using examples. Theoretical analysis and numerical results illustrate the rationality and feasibility of the model, which plays a guiding role for determining the spare parts quantity of new equipment.

**Key words** ship; spare parts; mathematical model

## 0 引言

在舰艇的保障工作中, 备品备件供应是保障工作的主要内容之一, 它不仅直接影响到故障装备的及时修复, 也是保障工作中经费投入最大的工作, 有时达到寿命周期内所有使用与维修保障经费的一半左右。如果不能科学合理地确定备品备件的品种与数量, 将对装备的战备完好产生非常大的影响。舰艇出海时, 备件不足会影响任务的完成, 而备件数量过多, 不仅会增加部队保养的工作量和经费的浪费, 而且对于一些特殊的航行器, 例如本身

空间狭小的潜艇, 会带来严重的负面影响。因此, 舰艇备件量的精确确定对提高舰艇装备的战备完好率, 控制舰艇的使用和维修成本具有重要意义。

近年来, 许多学者在备件保障度模型、备件最优库层模型等诸多方面展开了较深入的研究<sup>[1-7]</sup>, 并给出了一系列的预测备件需求量的数学模型。这些模型在计算时都需要大量的经验数据进行支撑, 适用于成熟的装备。而对于新研的装备, 特别是跟已有装备存在较大差别的, 原有经验数据不能适用, 其初始备件数量的计算结果往往偏离实际需要。据统计, 有些新装备在部署部队初期, 为了解

决保障资源配套建设问题,同步确定了备品备件  
的品种与数量。但经过一段时间的使用过程后发  
现,尽管配发了大量的新装备器材,但使用的器  
材品种只占总品种的 10%,而且还缺少 10%的  
器材,在大量器材积压的情况下,并没有有效地  
解决好器材的保障问题。

本文在前人的工作基础上,分析现有的备件  
数量计算模型,针对舰艇随船备件需求,建立  
了基于经济性和任务成功性的备件需求量数学  
模型,给出了实例计算方法,对于装备备件数  
量的确定具有指导作用。

### 1 随船备件需求量计算模型

#### 1.1 典型备件模型

备件可用概率是指一旦需用该备件时能取  
得它的概率,也称为备件满足率。备件数量与  
可用概率之间的关系可按非工作储备模型计算。  
非工作储备系统,有时也称为旁联系统,即组  
成系统的  $n$  个单元只有 1 个单元工作,其余处  
于待命状态。一旦工作单元发生故障,通过故  
障监测装置及转换装置接到另一个旁待的单  
元,使系统继续工作。非工作储备模型的可靠  
性框图如图 1 所示。

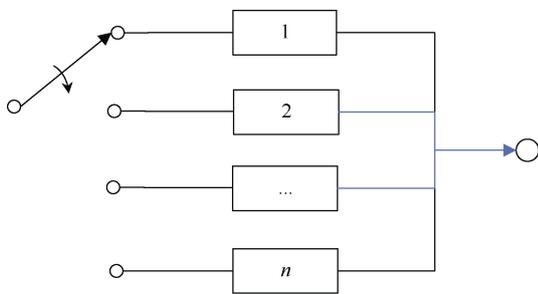


图 1 非工作储备模型的可靠性框图

Fig. 1 Reliability block diagram of non-working reserve model

当所有单元相同,而且寿命服从指数分布,  
故障监测和转换装置的可靠度为 1 时,系统任  
务成功的概率(系统可靠度)服从泊松过程。其  
数学模型为

$$R_S(t) = e^{-K\lambda t} \left[ 1 + K\lambda t + \frac{(K\lambda t)^2}{2!} + \frac{(K\lambda t)^3}{3!} + \dots + \frac{(K\lambda t)^n}{n!} \right] \quad (1)$$

式中:  $n$  为系统非工作储备单元数;  $\lambda$  为每个  
单元的故障(失效)率;  $K$  为系统中相同工作  
单元数量(单机基数)。

如果把不工作的储备单元看作是备件,在工  
作单元有故障时都能通过换件予以排除,这样  
式(1)中的任务成功概率  $R_S(t)$  就是备件可用  
概率  $P(S)$ 。当系统中相同的单元有  $K$  个时,  
将式(1)中  $R_S(t)$  表为备件可用概率  $P(S)$ ,  
并用累积泊松概率形式表达,则有:

$$P(S) = \sum_{n=0}^S \frac{(K\lambda t)^n e^{-K\lambda t}}{n!} = \sum_{n=0}^S \left[ \frac{R(1 - \ln R)^n}{n!} \right], (n=0,1,2,\dots,S) \quad (2)$$

式中:  $P(S)$  为备件可用概率;  $S$  为备件需求  
数量;  $R$  为  $K$  个单元的可靠度(残存概率),  
 $R = e^{-K\lambda t}$ 。

为了便于计算,可将式(2)做成累计泊松  
率曲线,如图 2,其纵坐标值可看成备件可用  
概率,横坐标值为  $K\lambda t$ ,而以  $n$  标明的一组  
曲线,就是备件需求量。

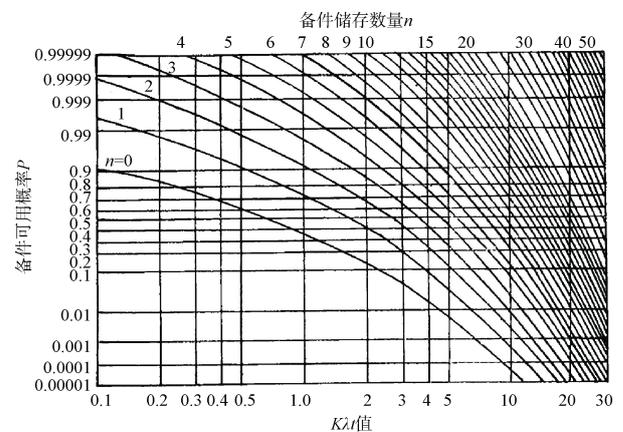


图 2 泊松概率曲线

Fig. 2 Poisson probability curve

式(2)称为泊松备件模型,是最常用的备件  
模型。从式(2)可以看出,只有给出了备件  
可用概率,才能反推计算出备件需求量。对  
于研制阶段的舰艇来讲,由于缺乏实际使用  
的经验数据,即使借鉴已有装备的使用数据,  
也会因为装备之间的差异带来较大的问题,  
因此很难给出一个合理的备件可用概率,不  
能得到适当的备件需求量。

下文将从舰艇经济性和任务成功性的角度分别出发, 建立备件可用概率的计算模型, 和式 (2) 联合, 即可确定备件需求量。

### 1.2 基于经济性原则的备件需求量计算模型

从经济性角度考虑, 舰艇出海时要求保证在建立和保存备件上的花费是最小的。假定购买和保存一个备件的花费为  $c_1$ , 缺乏备件时的损失费用为  $c_2$ , 备件需求分布函数为  $F(n)$ 。当储备  $M$  个备件时, 如果备件需求量  $n \leq M$ , 即备件供应是充分的, 则成本为  $(M-n)c_1$ ; 如果备件需求量  $n > M$ ,

$$\begin{aligned} Q(S+1) &= c_1 \sum_{n=0}^{S+1} F(n)(S+1-n) + c_2 \sum_{n=S+2}^{\infty} F(n)(n-S-1) = \\ & c_1 \sum_{n=0}^{S+1} F(n)(S-n) + c_2 \sum_{n=S+2}^{\infty} F(n)(n-S) + c_1 \sum_{n=0}^{S+1} F(n) - c_2 \sum_{n=S+2}^{\infty} F(n) = \\ & c_1 \sum_{n=0}^S F(n)(S-n) - c_1 F(S+1) + c_2 \sum_{n=S+1}^{\infty} F(n)(n-S) - c_2 F(S+1) + \\ & c_1 \sum_{n=0}^{S+1} F(n) - c_2 (1 - \sum_{n=0}^{S+1} F(n)) = Q(S) - c_2 + (c_1 + c_2)P(S) \end{aligned}$$

同理计算  $Q(S-1)$ , 可以得到:

$$Q(S-1) = Q(S) + c_2 - (c_1 + c_2)P(S-1)$$

当备件处于最佳数量  $S_0$  时, 总费用  $Q(S_0)$  最小, 有:

$$\left. \begin{aligned} Q(S_0+1) > Q(S_0) \\ Q(S_0-1) > Q(S_0) \end{aligned} \right\} \Rightarrow P(S_0) > \frac{c_2}{c_1 + c_2} > P(S_0-1)$$

即从经济性角度出发, 具有最佳备件数量时的备件可用概率为  $\frac{c_2}{c_1 + c_2}$ , 代入式 (2) 即可求得备件需求量  $S$ 。

### 1.3 基于任务成功性的备件需求量计算模型

舰艇出海时, 对于备件需求量的首要要求是能保证任务的成功性。因此对于一些不重要的、不涉及执行任务的设备可以按照经济性原则来确定备件数量, 但对于关重件设备或涉及任务的设备, 必须从保证任务成功的角度来确定备件数量。

由于备件采购和配置是间断进行的, 在采购间隔期内, 必须保证每次任务的成功, 因此备件数量应该满足间隔期内成功执行  $k_1$  次任务的需要。一般来讲, 对于舰艇, 备件采购间隔期可以按照 1 年确定, 而执行任务次数  $k_1$  如果不易确定, 可以间

即备件供应不足, 则损失费用为  $(n-M)c_2$ 。

对于  $M$  个备件, 建立备件期望费用方程为

$$Q(M) = c_1 \sum_{n=0}^M F(n)(M-n) + c_2 \sum_{n=M+1}^{\infty} F(n)(n-M) \quad (3)$$

式中, 假定备件需求分布函数  $F(n)$  满足泊松分布, 则  $F(n)$  和备件可用概率  $P(S)$  满足下式关系

$$P(S) = \sum_{n=0}^S F(n) \quad (4)$$

根据式 (3) 计算  $Q(S+1)$ , 有以下推导:

隔期最大可能值代替。

而备件可用概率可以用任务可靠度  $R_m$  来替代。任务可靠度在研制阶段, 通过可靠性建模、预计和分配, 就已经分解到设备层面了, 其分配、预计方法详见相关文献<sup>[8]</sup>, 本文不加以冗述。

假定要求某舰艇执行一项使命任务的成功度不低于  $R_{m0}$ , 该任务在备件采购或配置间隔期内执行  $k_1$  次, 则备件数量  $n$  应满足下式:

$$\begin{aligned} R_{m0} \leq e^{-Kk_1\lambda t} \left[ 1 + Kk_1\lambda t + \frac{(Kk_1\lambda t)^2}{2!} + \frac{(Kk_1\lambda t)^3}{3!} + \dots + \frac{(Kk_1\lambda t)^n}{n!} \right] \quad (5) \end{aligned}$$

## 2 实例分析

已知某舰艇出海时间为 30 d, 执行某项任务时要求可靠度不低于 0.80, 该任务共有 7 个设备以串联关系参与, 其中 A 设备的平均故障间隔时间 (MTBF) 是 150 h, 任务工作时间为 20 h, 备件成本为 500 元, 损失费用为 10 000 元, 试计算船上 A 设备的备件数量。

解: 首先从经济性原则出发。  $c_1 = 500$ ,  $c_2 = 10 000$ , 则具有最佳备件数量  $S$  时的可用概率是

$\frac{10000}{10000+500} \approx 0.9524$ ,  $\lambda = \frac{1}{150}$ ,  $t = 20$ , 代入式(2), 可以求出最佳备件数量  $S = 1$ 。即考虑经济性原则时, 船上 A 设备的备件数量为 1 件。

其次从任务成功性原则出发。一般来讲, 不同设备由于其技术复杂度不同而具有不同的任务可靠度, 在本例中假定各设备具有相同的任务可靠度, 则 A 设备的可用概率为  $\sqrt[3]{0.80} \approx 0.9686$ 。假定备件采购或配置间隔期为 1 年, 出海时间为 1 个月, 则间隔期内最大可能出海次数为 12 次。同样有  $\lambda = \frac{1}{150}$ ,  $t = 20$ , 代入式(5)求得备件数量  $S = 4$ 。即考虑任务成功性时, 船上 A 设备的备件数量为 4 件。

### 3 结束语

1) 对于新研装备, 由于缺乏大量使用数据, 只能采用相似装备的经验数据, 如果新研装备中存在较多新研设备或部件, 则传统的备件需求量模型不再适用, 应用本文的随船备件需求量模型则可以相对准确、合理地确定备件数量。

2) 一般来讲, 从经济性原则出发确定的可用概率比任务成功性得到的要低, 因此基于任务成功

性的备件数量通常比经济角度的备件数量多。因此对于空间比较狭小的新研装备, 及不涉及任务的设备可以从经济性原则出发确定备件数量, 在保证任务成功性的同时尽可能缩减备件数量。

### 参考文献

- [1] 鲍敬源, 王航宇, 刘忠. 装备维修中备件需求率的预计方法[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(2): 101-103.
- [2] 刘秀峰, 金家善, 郁军. 维修保障资源优化技术研究[J]. 海军工程大学学报, 2002, 14(6): 96-99.
- [3] 郑智敏, 李积源. 舰艇装备随行备件量需求规律分析[J]. 海军工程大学学报, 2001, 13(2): 104-107.
- [4] 于静, 吴进煌. 导弹武器装备备件数量计算方法研究[J]. 战术导弹技术, 2003(2): 56-60.
- [5] 王佩高, 金家善. 随舰备件动态管理及备件数量计算模型[J]. 海军工程大学学报, 2005, 17(3): 103-106.
- [6] 单志伟, 刘福胜. 备品备件需求确定方法探讨[J]. 装甲兵工程学院学报, 2005, 19(3): 1-4.
- [7] 李金国, 丁红兵. 备件需求量计算模型分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2000(3): 11-14.
- [8] 徐宗昌. 保障性工程[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2005.

(责任编辑: 张曼莉)