

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.10.001

## 基于舰艇编队任务可靠性的备件优化配置

王睿<sup>1</sup>, 李华<sup>1</sup>, 李庆民<sup>1</sup>, 彭英武<sup>1</sup>, 魏华<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学兵器工程系, 武汉 430033; 2. 中国人民解放军 91635 部队, 北京 100000)

**摘要:** 为提高舰艇编队任务持续能力、降低保障机构备件采购费用, 在分析舰艇编队任务的基础上, 建立了随舰备件方案下的舰艇编队任务可靠性评估模型, 以最低备件采购费用为优化指标, 任务可靠性为约束条件, 运用边际分析方法给出了备件优化模型的求解方法。并以舰艇编队执行巡航任务为实例, 给出了任务想定下的随舰备件优化配置方案。优化结果表明: 该方案符合实际情况, 可以为装备保障人员制定保障方案提供辅助决策。

**关键词:** 舰艇编队; 任务可靠性; 备件; 优化

**中图分类号:** TJ761.1 **文献标志码:** A

## Optimization of Spare Parts Based on Warship Formation Mission Reliability

Wang Rui<sup>1</sup>, Li Hua<sup>1</sup>, Li Qingmin<sup>1</sup>, Peng Yingwu<sup>1</sup>, Wei Hua<sup>2</sup>

(1. Dept. of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. No. 91635 Unit of PLA, Beijing 100000, China)

**Abstract:** To improve warship formation sustainability and reduce stock cost for spare parts, warship formation mission reliability evaluation model with the spare parts concept is established after analyzing warship formation mission. The stock cost for spare parts is taken as the optimization object and warship formation mission reliability is used as the restriction. Based on margin analysis method, the computation method for spare parts optimization is provided. Finally, a warship formation cruising mission is taken for example and spare parts optimization concept on board is given based on the method. The optimization results are coincident with the military practice case by analyzing. That can help materiel support commander make decision.

**Keywords:** warship formation; mission reliability; spare parts; optimization

### 0 引言

舰艇编队是执行海上作战任务的主要战斗力编成形式, 由于长期远离基地在海上执行任务, 使得编队主要依靠自身携带的保障资源实施自我维修保养。备件作为维修保养资源的重要组成部分, 是影响编队任务持续能力和维修保养能力的关键因素。然而备件的购置费用通常比较昂贵, 占据装备部队年度装备保障费用 30% 左右。如何在满足舰艇编队任务可靠性的基础上合理配置备件, 进而降低备件采购费用, 提高舰艇编队任务成功能力, 是装备保障指挥官迫切需要解决的问题。文献[1-2]基于仿真方法建立备件方案条件下的舰船可用度评估模型, 通过仿真实验在满足舰船可用度的前提下对备件方案进行调整, 达到备件优化配置的目的; 文献[3-6]将备件库存仿真模型与启发式优化算法相结合对备件进行优化; 文献[7]建立了同型号部件的随舰备件数量计算模型。笔者针对舰艇编队的任务实际情况, 建立了随舰备件方案下的舰艇编队任务可靠性评估模型, 运用边际效应方法给出了模型的求解方法。

### 1 舰艇编队任务分析

舰艇编队是典型的复杂武器装备系统, 在编队指挥部门的统一指挥和协调下, 由各舰艇单元及舰上的装备系统共同参与、协调完成编队任务。编队任务可分解为多个舰艇单元任务, 舰艇单元任务由多型装备系统提供功能支持, 同型装备系统之间主要是  $k/N$  关系, 即有  $N$  个工作部件, 任务期间至少要有  $k$  个部件正常, 装备系统主要由外场更换单元 (line replaceable unit, LRU) 构成, LRU 的故障将导致装备系统停机, 舰艇编队任务的层次结构如图 1。

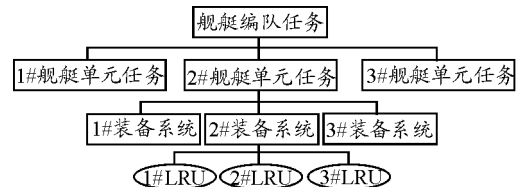


图 1 舰艇编队任务层次结构

### 2 舰艇编队任务可靠性评估模型

#### 2.1 模型假设

1) 假设装备系统各 LRU 的寿命服从指数分布

收稿日期: 2011-06-04; 修回日期: 2011-07-13

基金项目: 总装预研基金项目 (513040303)

作者简介: 王睿(1982—), 男, 吉林人, 博士, 工程师, 从事装备综合保障、复杂系统建模与仿真研究。

且失效过程相互独立;

- 2) 备件在贮存过程中不失效;
- 3) 备件在任务期间不可修, 备件更换时间忽略不计;
- 4) 一项 LRU 的故障将导致装备系统的停机;
- 5) 各舰艇之间不存在横向保障。

### 2.2 舰艇编队任务成功概率计算

舰艇编队在任务时间  $T$  内的任务成功概率  $P_0$  与舰艇单元的任务成功概率  $P_j$  相关, 舰艇单元任务之间具有一定的逻辑关系, 如与、或等, 以满足舰艇编队任务要求, 舰艇编队的任务成功概率计算公式如式 (1) 所示, 其中  $\rho$  为可靠性逻辑关系函数。

$$P_0 = \rho(P_j | j=1,2,\dots,J) \quad (1)$$

舰艇单元  $j$  的任务成功概率  $P_j$  与该舰艇内部的装备系统的任务成功概率  $P_{mj}$  相关, 装备系统  $m$  之间功能互补, 具有一定的可靠性逻辑关系如串联、并联等, 以满足舰艇单元任务要求, 舰艇单元任务成功概率计算公式如式 (2), 其中  $f$  为可靠性逻辑关系函数。

$$P_j = f(P_{mj} | m=1,2,\dots,M) \quad (2)$$

由于假设一项 LRU 的故障将导致装备系统停机, 装备系统最多产生一个 LRU 备件需求, 因此装备系统的停机数量等于其所辖的 LRU 故障数量。装备系统的任务成功概率  $P_{mj}$  可近似等于装备系统的备件短缺数满足任务要求的概率, 计算公式如式 (3) 所示, 其中  $BO_{mj}$  为装备系统  $m$  在舰艇单元  $j$  携带的备件  $S_j$  条件下的备件短缺数, 等于其安装的所有 LRU 备件短缺数之和。

$$P_{mj}(S_j) = P(X \geq T | S_j) \approx (BO_{mj} \leq N_{mj} - K_{mj} | S_j) = \sum_{i=0}^{N_{mj}-K_{mj}} P(BO_{mj} = i | S_j) \quad (3)$$

其中,  $S_j = (S_{1j}, S_{2j}, S_{3j}, \dots, S_{ij})$ 。

### 2.3 备件短缺数的计算

舰艇单元  $j$  的装备系统  $m$  的 LRU <sub>$i$</sub>  年平均需求量  $DR_{ijm}$  与装备系统  $m$  的配置数量  $N_{mj}$ 、每台装备 LRU <sub>$i$</sub>  的安装数量  $QPS_{im}$  以及 LRU <sub>$i$</sub>  的平均故障间隔时间  $MTBF_i$  相关。 $MTBF$  通常以小时作为计算单位。装备系统之间的可靠性工作关系为冷储备, 即只有  $K_{mj}$  个装备工作, 其余  $N_{mj}-K_{mj}$  个装备系统作为备份系统不工作。 $DR_{ijm}$  的计算公式如式 (4)。

$$DR_{ijm} = \frac{365 \times 24}{MTBF_i} \cdot QPS_{im} \cdot K_{mj} \quad (4)$$

舰艇单元  $j$  的外场更换件 LRU <sub>$i$</sub>  的年平均需求量

$DR_{ij}$  等于其所配置所有系统 LRU <sub>$i$</sub>  年平均需求率  $DR_{ijm}$  之和:

$$DR_{ij} = \sum_{m=1}^M DR_{ijm} \quad (5)$$

舰艇单元  $j$  的装备系统  $m$  对 LRU <sub>$i$</sub>  备件短缺数占该舰艇单元 LRU <sub>$i$</sub>  备件短缺数的比例为:

$$f_{im} = \frac{DR_{ijm}}{DR_{ij}} \quad (6)$$

由于 LRU 的寿命服从指数分布且失效过程相互独立, 舰艇单元  $j$  的外场更换件 LRU <sub>$i$</sub>  在任务时间  $T$  内的备件需求量服从期望为  $DR_{ij} \cdot T$  的泊松分布:

$$p_r(x) = \frac{(DR_{ij} \cdot T)^x \cdot e^{-DR_{ij} \cdot T}}{x!} \quad (7)$$

在任务时间  $T$  内, 舰艇单元  $j$  的外场更换件 LRU <sub>$i$</sub>  的备件期望短缺数  $EBO_{ij}(s_{ij})$  的计算公式为:

$$EBO(s) = \sum_{x=s+1}^{\infty} (x-s) \cdot p_r(x) \quad (8)$$

舰艇单元  $j$  的外场更换件 LRU <sub>$i$</sub>  的备件短缺数方差  $VBO(s)$  的计算公式为:

$$VBO(s) = E[B^2(s|x)] - [EBO(s)]^2 \quad (9)$$

$$E[B^2(s|x)] = \sum_{x=s+1}^{\infty} (x-s)^2 p_r(x) \quad (10)$$

根据文献[8], 若已知随机变量  $Y$  条件下随机变量  $X$  的条件概率分布, 则可通过该文献的计算方法得到随机变量  $X$  的期望和方差:

$$E(X) = E[E(X|Y)] \quad (11)$$

$$VAR(X) = VAR[E(X|Y)] + E[VAR(X|Y)] \quad (12)$$

由于部件 LRU 之间的失效过程相互独立, 则舰艇单元  $j$  的 LRU <sub>$i$</sub>  的备件短缺数是由该舰艇单元的装备系统  $m$  的 LRU <sub>$i$</sub>  导致的概率服从参数为  $f_{im}$  的二项分布:

$$P[BO_{imj}(s_{ij}) = k | BO_{mj}(s_{ij}) = n] = \binom{n}{k} f_{im}^k (1-f_{im})^{n-k} \quad (13)$$

根据式 (11), 可推算得到舰艇单元  $j$  的装备系统  $m$  的 LRU <sub>$i$</sub>  备件期望短缺数  $EBO_{imj}(s_{ij})$ :

$$EBO_{imj}(s_{ij}) = E\{E[BO_{imj}(s_{ij}) | BO_{mj}(s_{ij})]\} = E[f_{im} \cdot BO_{mj}(s_{ij})] = f_{im} E[BO_{mj}(s_{ij})] \quad (14)$$

根据式 (12), 可推算得到舰艇单元  $j$  的装备系统  $m$  的 LRU <sub>$i$</sub>  备件短缺数方差  $VBO_{imj}(s_{ij})$ :

$$VBO_{imj}(s_{ij}) = VAR\{E[BO_{imj}(s_{ij}) | BO_{mj}(s_{ij})]\} + E[VAR[BO_{imj}(s_{ij}) | BO_{mj}(s_{ij})]] = VAR[f_{im} BO_{mj}(s_{ij})] + E[f_{im} (1-f_{im}) BO_{mj}(s_{ij})] = f_{im}^2 VAR[BO_{mj}(s_{ij})] + f_{im} (1-f_{im}) E[BO_{mj}(s_{ij})] \quad (15)$$

舰艇单元  $j$  的装备系统  $m$  的备件短缺数等于其

所安装的所有 LRU 的部件短缺数之和, 舰艇单元  $j$  的装备系统  $m$  的备件短缺数的期望和方差分别如式 (16) 和式 (17):

$$EBO_{mj}(S_j) = \sum_{i=1}^l EBO_{imj}(s_{ij}) \quad (16)$$

$$VBO_{mj}(S_j) = \sum_{i=1}^l VBO_{imj}(s_{ij}) \quad (17)$$

其中,  $S_j = (S_{1j}, S_{2j}, S_{3j}, \dots, S_{lj})$

从文献[9]可知, 可以根据舰艇单元  $j$  的装备系统  $m$  的备件期望短缺数  $EBO_{mj}(s_j)$  和备件短缺数方差  $VBO_{mj}(s_j)$  之比  $VMR$  对舰艇单元  $j$  的装备系统  $m$  的备件短缺数的分布  $p(BO_{mj}(s_j) = x)$  进行近似估计。当  $VMR < 1$  时,  $BO_{jm}(s_j)$  服从二项分布:

$$p(BO_{mj}(s_j) = x) = C_n^x (1-q)^x q^{n-x} \quad (18)$$

分布参数  $n$  和  $q$  可通过分布的期望  $EBO_{mj}(s_j)$  和方差  $VBO_{mj}(s_j)$  计算得出:

$$q = \frac{VBO_{mj}(S_j)}{EBO_{mj}(S_j)} \quad n = EBO_{mj}(S_j)/(1-q) \quad (19)$$

当  $VMR = 1$  时,  $BO_{mj}(s_j)$  服从泊松分布:

$$p(BO_{mj}(s_j) = x) = \frac{EBO_{mj}(S_j)^x \cdot e^{-EBO_{mj}(S_j)}}{x!} \quad (20)$$

当  $VMR > 1$  时,  $BO_{mj}(s_j)$  服从负二项分布:

$$p(BO_{mj}(s_j) = x) = \binom{a+x-1}{x} b^x (1-b)^a \quad (x=0,1,2,\dots) \quad (21)$$

分布参数  $a$  和  $b$  可通过分布的期望  $EBO_{mj}(s_j)$  和方差  $VBO_{mj}(s_j)$  计算得出:

$$a = \frac{EBO_{mj}(S_j)^2}{VBO_{mj}(S_j) - EBO_{mj}(S_j)} \quad b = \frac{VBO_{mj}(S_j) - EBO_{mj}(S_j)}{VBO_{mj}(S_j) \cdot EBO_{mj}(S_j)} \quad (22)$$

将舰艇单元  $j$  的装备系统  $m$  的备件短缺数  $BO_{mj}(s_j)$  的概率分布代入式 (1)~式 (3), 便可计算得到舰艇编队的任务成功概率  $P_0$ 。

### 3 备件优化模型及优化算法

基于舰艇编队任务成功性的备件库存优化模型可表述为: 在满足舰艇编队任务成功概率达到  $P_m$  的前提下, 使得舰艇编队的备件费用最低。令  $s_{i,j}$  为第  $j$  个保障站点的第  $i$  项备件的库存量,  $C_i$  为备件  $LRU_i$  的费用, 备件库存优化模型如下:

$$\begin{cases} \min & \sum_j \sum_i C_i s_{i,j} \\ s.t. & P_0 \geq P_m \end{cases} \quad (23)$$

笔者利用边际效应方法对备件库存优化模型进行求解。优化算法的步骤如下:

Step 1: 初始化, 将各舰艇单元各项 LRU 的备件库存置为 0;

Step 2: 分别对各舰艇单元  $j$  的  $LRU_i$  的备件库存  $S_{ij}$  增加 1 个备件, 计算增加 1 件  $S_{ij}$  所产生的舰艇编队任务成功概率的增量与该备件的单价之比  $\Delta_{ij}(s_{i,j})$ :

$$\Delta_{ij}(s_{i,j}) = [P_0(s_{i,j}+1) - P_0(s_{i,j})] / C_i \quad (24)$$

Step 3: 寻找  $\Delta_{ij}(s_{i,j})$  最大的舰艇单元的备件  $s_{ij}$  增加 1 件备件, 其它库存保持不变;

Step 4: 计算当前备件库存方案下的舰艇编队任务成功概率, 若达到规定值  $P_m$ , 迭代结束, 保存备件库存方案, 否则返回 Step 2, 继续进行迭代计算。

### 4 应用实例

舰艇编队由 2 艘驱逐舰  $J_1$  和  $J_2$ 、一艘护卫舰  $J_3$  构成, 每艘舰船均配有 3 型雷达系统 ( $M_1, M_2, M_3$ ), 每型雷达系统配置有 3 类 LRU 部件 ( $LRU_1, LRU_2, LRU_3$ ), 由于任务需要, 舰艇单元任务之间为串联关系, 不同型雷达系统之间为串联关系, 舰艇编队的装备结构关系如图 1。每艘舰船的每型雷达系统的配置数量  $N_{mJi}$ 、任务要求  $K_{mJi}$  和雷达系统安装的  $LRU_i$  部件数量  $QPS_{im}$  如表 1。LRU 部件的可靠性信息如表 2。

表 1 舰艇编队装备系统配置参数

配置参数	雷达系统 $M_1$	雷达系统 $M_2$	雷达系统 $M_3$
$K_{mJ1} / N_{mJ1}$	2/3	2/3	1/2
$K_{mJ2} / N_{mJ2}$	2/3	2/2	2/3
$K_{mJ3} / N_{mJ3}$	1/2	2/3	1/2
$QPS_{1m}$	2	3	2
$QPS_{2m}$	1	2	3
$QPS_{3m}$	2	2	2

表 2 LRU 部件可靠性和费用信息参数

备件	MTBF/ (1/h)	$C_i$ /万元
$LRU_1$	13 100	15
$LRU_2$	19 200	20
$LRU_3$	25 100	30

舰艇执行巡逻任务, 任务时间  $T$  为 30 d, 上级要求舰艇编队完成任务成功的概率达到 0.99。运用边际效应算法对备件优化模型进行求解, 经过 28 轮迭代优化计算, 得到舰艇编队各级备件优化配置如表 3。此时, 舰艇编队的任务成功概率达到 0.992 8, 备件采购费用为 550 万元。基于边际效应的备件迭代优化过程如图 2。

表 3 任务目标为 0.99 时舰艇编队各级备件优化配置

保障机构	$LRU_1$	$LRU_2$	$LRU_3$
舰艇单元 $J_1$	4	2	2
舰艇单元 $J_2$	5	4	3
舰艇单元 $J_3$	3	2	2