

## 相控阵天线阵面两级备件优化配置模型\*

王永攀<sup>1,2</sup>, 杨江平<sup>1</sup>, 张宇<sup>3</sup>, 侯晓东<sup>1</sup>

- (1. 空军预警学院 陆基预警装备系, 湖北 武汉 430019;
2. 中国人民解放军 93502 部队, 内蒙古 呼和浩特 010051;
3. 湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:**针对相控阵天线阵面备件配置存在的冗余性强、批量送修、多级维修等现实问题,综合考虑备件费用、维修能力以及库存策略之间的关系,建立了基于定期补给的两级备件优化配置模型。给出了系统的故障件维修周转过程和维修备件的定期补给过程,在分析备件、库存、维修能力之间关系的基础上,结合成批到达的排队理论,建立了系统的供应可用度模型。以备件配置费用最小为目标、以系统供应可用度为约束条件,建立了系统的备件优化配置模型,并通过边际效益分析法对模型进行了求解。通过算例仿真与分析对模型进行了验证。结果表明:构建的备件配置能够较好地解决相控阵天线阵面的备件配置问题,具有一定的优越性。

**关键词:**相控阵天线;两级维修;备件; $K/N$ 系统;批量送修

**中图分类号:**TN95;N94 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)03-172-07

## Optimal configuration model of spare parts for phased array antenna under two-echelon maintenance supply

WANG Yongpan<sup>1,2</sup>, YANG Jiangping<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>3</sup>, HOU Xiaodong<sup>1</sup>

- (1. Land-based Early Warning Equipment Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China;
2. The PLA Unit 93502, Hohhot 010051, China;
3. College of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Three problems are normally found in the spare parts configuration of phased array antenna, namely, the strong redundancy, the batch delivery maintenance and the multi-echelon maintenance. Aiming at these problems, through analyzing the relations among spare parts cost, repair capacity and inventory strategies, an optimal configuration model was established based on the periodic review strategies. Firstly, the repair circulation process of fault component and the periodic supply process of maintenance spare parts were given, and then the system supply availability model was built by analyzing the relations among spare parts, inventories and repair capacity, and the batch arrival queuing theory was also used. Secondly, an optimal configuration model of spare parts was built, which takes minimum spare parts costs as the object and the system availability as the subject. Next, solution algorithm based on the margin analysis theory to the model was also given. Finally, simulations and analysis of an instance were conducted to verify the proposed model, and results show that the model can solve the spare parts allocation problems of phased array antenna well, and has a high superiority.

**Key words:** phased array antenna; two-echelon maintenance; spare parts;  $K/N$  systems; batch delivery maintenance

大型相控阵雷达(Large-scale Phased Array Radar, LPAR)在国家战略预警尤其是反导预警作战中作用重大,地位特殊。作为相控阵雷达的主要组成部分,天线阵面分系统的维修备件配置问题已成为部队和科研院所研究和关注的重点。当前,部队的普遍做法是采用国军标 GJB 4355《备件供应规划要求》中的单项备件配置方法<sup>[1]</sup>。然而,从当前部队的实际状况来看,该方法暴露出以

下问题:①不能兼顾备件配置费用、维修能力等限制条件与系统可用度的关系;②不能兼顾系统冗余设计对系统备件配置水平的影响;③不能较好地分配基层级和基地级备件的库存量。上述三个典型的问题已成为影响相控阵雷达军事和经济效益的重要因素,急需探求合理的解决方法。

由于天线阵面组件众多且采用冗余设计,因此,许多研究人员将天线阵面看作一个  $K/N$  系统

\* 收稿日期:2016-01-11

基金项目:军队科研资助项目(KJ2014023200B11145);博士研究生专项资助项目(2014JY546)

作者简介:王永攀(1987—),男,河北保定人,博士研究生,Email:wypaning@163.com;

杨江平(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,Email:yjp\_wh@163.com

来进行研究,并取得了一定的研究成果。如:文献[2]研究了多级冗余的  $K/N(G)$  系统(即系统是  $K/N$  冗余系统,子系统是  $1/m(F)$  冗余系统)的备件配置问题;文献[3]针对两级(系统级、部件级)均为  $K/N(G)$  结构的冗余系统备件配置问题进行了研究;文献[4]研究了考虑报废的系统级  $K/N$  冷备份冗余系统的备件配置问题。上述文献在一定程度上解决了当前存在的问题,但是仍存在一些局限性。如这些研究均认为系统存在单个部件故障后立即进行送修,即单件送修的情况;而在实际应用中,对于采用冗余设计的相控阵雷达天线阵面而言,批量送修的问题客观存在,需进一步开展研究。为此,部分学者开始研究批量送修的情况。所谓批量送修是指对系统进行维修时,系统中的故障件已达到一定数量,需成批地将故障件送至维修点进行维修。已有研究表明:对于批量送修的  $K/N$  系统而言,备件数目与系统的维修策略以及维修能力之间相互作用、相互影响<sup>[5]</sup>。为此,部分学者综合考虑三者之间的关系,从故障件维修的角度出发,通过求取系统的使用可用度,综合考虑系统备件配置费用的影响,构建了考虑批量送修的  $K/N$  系统备件配置模型<sup>[6-9]</sup>。这些研究虽然解决了批量送修的问题,但是带来了新的问题,主要表现在两方面:①由于批量送修条件下经典的  $(S-1, S)$  库存策略不再适用,因此,这些研究仅仅从维修的角度来研究  $K/N$  系统的备件配置问题;而从库存的角度出发来研究考虑批量送修的  $K/N$  系统的备件配置问题,更符合用户的客观需求。②仅仅考虑了单级维修条件下  $K/N$  系统的备件配置问题,而在实际应用中,多级维修条件下的备件问题更贴近实际。为此,仍需要进一步开展相应的研究。本文研究了基于定期补给库存策略的两级维修条件下天线阵面的备件优化配置问题。重点研究了车间可更换单元(Shop Replacement Unit, SRU)层级的备件配置问题。构建了系统的供应可用度模型,并以备件费用最小为优化目标、以供应可用度为约束条件,构建了天线阵面的备件优化配置模型,通过边际效益分析方法对模型进行了求解。

### 1 问题描述与假设

为了便于研究,将天线阵面看作一个由  $N$  个现场可更换单元(Line Replacement Unit, LRU)组成的  $K/N$  系统,以下  $K/N$  系统均指天线阵面。设  $K/N$  系统中每个 LRU 由  $M$  个  $SRU_i$  串联组成,当

任意一个  $SRU_i$  故障时,对应的 LRU 故障;系统正常工作时,要求系统中至少有  $K$  个 LRU 正常工作,  $K/N$  系统的具体结构如图 1 所示。

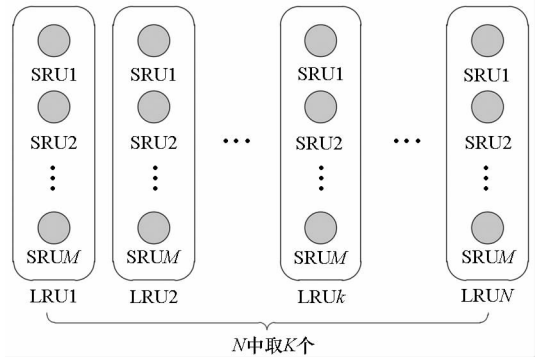


图1  $K/N$  系统结构图

Fig.1 Structure of  $K/N$  system

考虑到  $K/N$  系统的冗余性,在工程应用中一般对系统进行预防性维修。当系统运行到预防性维修阈值时,认为系统故障,需对系统进行停机维修。维修时,基层级负责更换系统中故障的 LRU,其中,LRU 备件通常由基层级维修点修复得到。由于 LRU 的故障是由  $SRU_i$  引起的,在定位故障后,通常进行  $SRU_i$  换件维修。如果有对应的  $SRU_i$  备件,则通过更换 LRU 中故障的  $SRU_i$  修复 LRU;如果没有备件,则发生一次备件短缺,需等待一段时间才能补充。在基层级更换下来的  $SRU_i$  故障件被成批地送到基地级进行维修,在进行定期补给时,如果基地级有  $SRU_i$  备件,则直接补给基层级库存,如果基地级没有  $SRU_i$  备件,则发生一次  $SRU_i$  备件短缺,需等待基地级维修点修复  $SRU_i$  备件。在基地级库存发生额外的  $SRU_i$  备件需求时,通过采购的方式进行补充。图 2 给出了故障  $SRU_i$  的维修周转过程。

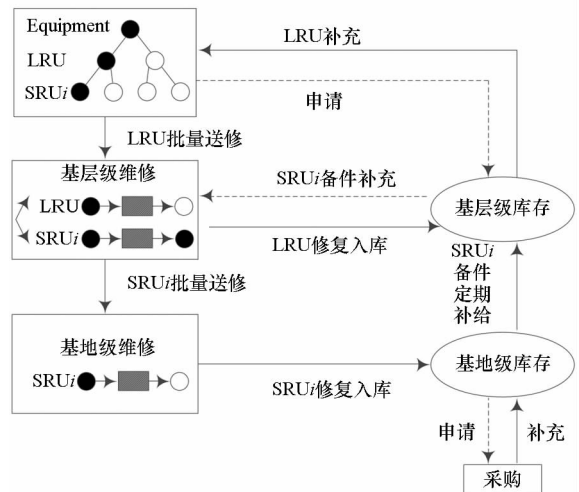


图2 故障件维修周转过程

Fig.2 Repair circulation process of fault component

图 3 给出了系统维修备件定期补给过程。

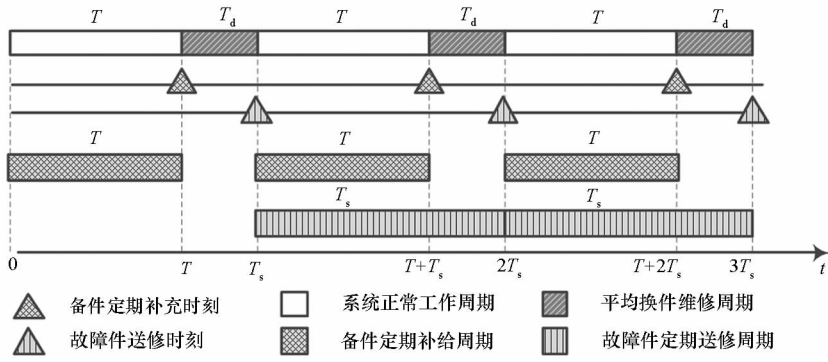


图 3 维修备件定期补给过程

Fig. 3 Periodic supply process of maintenance spare parts

图 3 中： $T$  表示系统正常工作的周期， $T_d$  为系统的平均换件维修周期， $T_s$  为系统中故障件的送修周期， $T_s = T + T_d$ ，其中，系统的备件定期补给周期与系统的正常工作周期保持一致。设从 0 时刻开始，经过时间  $T$ ，系统需停机进行维修，此时，备件已从基地级送至基层级进行补给；经过  $T_d$  时间，即在  $T_s$  时刻，系统完成修复，此时，将未修复的故障件送至基地级进行维修；再过时间  $T$ ，即在  $T + T_s$  时刻，将备件从基地级送至基层级进行补给；如此，反复执行，此过程即为备件的定期补给过程。

鉴于  $K/N$  系统的备件配置结果与系统维修策略及库存策略有很大的关系，为便于开展研究，需做出如下假设。

- 1) 系统中所有 LRU 服从参数为  $\lambda_{LRU}$  的指数分布，所有  $SRU_i$  服从参数为  $\lambda_{SRU_i}$  的指数分布；
- 2) 所有故障件均能得到修复，维修过程中不存在报废且修复如新，可作为备件使用；
- 3) 故障件采取两级维修体制，即基层级维修和基地级维修，基层级只负责对故障 LRU 进行  $SRU_i$  换件维修，基地级负责故障  $SRU_i$  的维修且维修能力有限；
- 4)  $SRU_i$  维修渠道不同，维修时均遵循排队原则，维修工作相互独立且同时进行，一个维修渠道只能同时修理一个故障件， $SRU_i$  的维修渠道总数小于  $SRU_i$  故障件的数目；
- 5) 基层级采取  $(T, S)$  定期补给库存策略，即以固定周期  $T$  对基层级库存进行定期补给，将基层级库存补充到  $S$ ；
- 6) 不考虑 LRU 中除  $SRU_i$  之外的组成部分对 LRU 故障造成的影响。

## 2 系统备件优化配置模型

令  $i > 0$  代表  $SRU$ ；令  $j = 0$  代表基地级， $j = 1$

代表基层级。如  $S_{ji} = S_{03}$  代表基地级  $SRU_3$  备件的库存量， $S_{ij} = S_{11}$  代表基层级  $SRU_1$  备件的库存量。结合故障件的维修周转过程可知， $SRU_i$  的备件库存由基层级库存  $S_{1i}$  和基地级库存  $S_{0i}$  两部分组成，为保证系统的正常运行，基地级必须有充足的备件来满足基层级的库存。设备件  $SRU_i$  的需求率为  $m_i$ ，则  $m_i$  的计算公式<sup>[10]</sup>为：

$$m_i = \lambda_{SRU_i} \cdot N \cdot U \cdot R \quad (1)$$

式中： $N$  为  $SRU_i$  总数； $U$  为产品利用率因子； $R$  为拆卸率因子，取  $U = 1, R = 1$ 。

系统的工作周期可分为两个阶段，包括系统正常运行时间  $T = ET$  和 LRU 换件维修时间  $T_d = ED$ 。根据  $K/N$  系统定义可知，当系统中故障件数目达到  $m_{max} = N - K + 1$  个时，整个系统会停止工作。则系统的平均工作时间可表示为：

$$ET = \sum_{m=0}^{N-K+1} \frac{1}{(N-m)\lambda_{LRU}} \quad (2)$$

设有  $c_r$  个 LRU 换件维修人员，换件维修率为  $\mu_r$ ，则可得到 LRU 换件维修的时间为：

$$ED = \frac{m_{max}}{c_r \mu_r} \quad (3)$$

在  $T$  时间段内，系统正常运行，会出现故障的 LRU，因此，也会出现  $SRU_i$  故障。由于  $SRU_i$  的故障是随机发生的，因此， $SRU_i$  备件的需求服从泊松过程。可求得系统对  $SRU_i$  备件的平均需求为  $m_i T$  时， $T$  时间内发生  $x_i$  次需求的概率为：

$$p(x_i | m_i T) = (m_i T)^{x_i} \cdot \frac{e^{-m_i T}}{x_i!} \quad (4)$$

$SRU_i$  故障后，被成批地送至基地级维修点进行维修。设  $m_{mi}$  为系统中有  $m_{max}$  个 LRU 故障时对应的  $SRU_i$  的数目，为了保障备件的充足，其值应满足：

$$m_{mi} = m_{max} \frac{\lambda_{SRU_i}}{\lambda_{LRU}} \quad (5)$$

设 SRU<sub>i</sub> 的维修渠道为  $c_i$  个,则故障件的维修过程可以看作一个到达率为  $\Lambda$ 、维修率为  $\mu_i$ 、具有  $m_{mi}$  个顾客和  $c_i$  个服务台的  $M^{mmi}/M/c_i$  排队系统。根据维修备件的定期补给过程可知,故障件到达基地级的周期  $T_s = T + T_d$ 。其中,在  $T_d$  时间段内,系统处于停机维修状态,在此期间没有新的

故障 LRU 产生。因此,可以得到故障件的到达率为:

$$\Lambda = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{T + T_d} \quad (6)$$

进一步可画出  $M^{mmi}/M/c_i$  排队系统的状态流程图如图 4 所示。

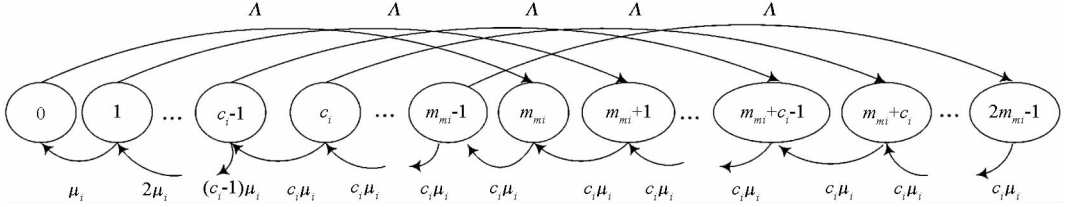


图4 状态流程图  
Fig. 4 State flow chart

根据状态流图,可列出平衡条件下的 K 氏代数方程。

$$\begin{cases} p_{y_i}(\rho_i + y_i) = p_{y_i+1}(y_i + 1) & 0 < y_i \leq c \\ p_{y_i}(\rho_i + c_i) = p_{y_i+1}c_i & c_i < y_i \leq m_{mi} \\ p_{y_i}c_i = p_{y_i-m_{mi}}\rho_i + p_{y_i+1}c & m_i < y_i \leq 2m_{mi} - 1 \end{cases} \quad (7)$$

设存在比例系数  $\rho_i = \Lambda/\mu_i$ ,则系统中恰有  $y_i$  个 SRU<sub>i</sub> 的稳态概率,其可表示为:

$$p_i(y_i) = \begin{cases} p_{i0} & y_i = 0 \\ p_{i0}\alpha_i(y_i) & 0 < y_i \leq c_i \\ p_{i0}\alpha_i(c_i)\beta_i(y_i) & c_i < y_i \leq m_i \\ p_{i0}\alpha_i(c_i)\beta_i(m_i) - \gamma_i(y_i) & m_i < y_i \leq 2m_i - 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\alpha_i(y_i)$ , $\beta_i(y_i)$ , $\gamma_i(y_i)$ 分别为在修或待修部件数  $y_i$  的函数。其表达式为:

$$\begin{cases} \alpha_i(y_i) = \frac{\prod_{j=0}^{y_i-1} (\rho_i + j)}{y_i!} \\ \beta_i(y_i) = \left(\frac{\rho_i + c_i}{c_i}\right)^{y_i-c_i} \\ \gamma_i(y_i) = \sum_{j=0}^{y_i-m_{mi}-1} \frac{p(j)\rho_i}{c_i} \end{cases} \quad (9)$$

由于系统中所有稳态概率之和为 1,令  $p(j)$  表示提取系数  $p_{i0}$  后  $p_i(y_i)$  的值,则可以得到系统的稳态概率为:

$$p_{i0} = \frac{1}{\xi} \quad (10)$$

$$\text{令 } \xi = 1 + \sum_{y_i=1}^{c_i} \alpha_i(y_i) + \sum_{y_i=c_i+1}^{m_{mi}} \alpha_i(c_i)\beta_i(y_i) +$$

$$\sum_{y_i=m_{mi}+1}^{2m_{mi}-1} \left[ \alpha_i(c_i)\beta_i(m_i) - \sum_{j=0}^{y_i-m_{mi}-1} \frac{p(j)\rho_i}{c_i} \right].$$

进一步可得到各稳态概率  $p_i(y_i)$  的值。

为有效开展备件配置研究,必须掌握在补给周期时间  $t(0 \leq t \leq T)$  内 SRU<sub>i</sub> 备件的短缺情况。设备件短缺数为  $n_i$ ,下面分不缺备件( $n_i = 0$ )和备件短缺( $n_i > 0$ )两种情况进行讨论<sup>[11]</sup>。

当  $n_i = 0$  时,需满足条件:系统对 SRU<sub>i</sub> 备件的需求数  $x_i \leq S_{li}$ ,且基地级在修或待修 SRU<sub>i</sub> 的件数小于或等于  $S_{0i}$ 。进而得到  $T$  时刻系统不缺 SRU<sub>i</sub> 备件的概率为:

$$\begin{aligned} Pr_i(BO_i = 0) &= P(S_{li} | m_i T) \cdot Pr_i(DI \leq S_{0i}) \\ &= \sum_{x_i=0}^{S_{li}} p(x_i | m_i T) \cdot \sum_{y_i=0}^{S_{0i}} p_i(y_i) \end{aligned} \quad (11)$$

当  $n_i > 0$  时,需满足条件:系统对 SRU<sub>i</sub> 备件的需求数  $x_i = S_{li} + n_i$ ,且基地级在修或待修 SRU<sub>i</sub> 的件数小于或等于  $S_{0i}$ 。进一步得到  $T$  时刻系统 SRU<sub>i</sub> 备件短缺数  $n_i(n_i \geq 1)$  的概率为:

$$\begin{aligned} Pr_i(BO_i = n_i) &= p(S_{li} + n_i | m_i T) \cdot Pr_i(DI \leq S_{0i}) \\ &= p(S_{li} + n_i | m_i T) \cdot \sum_{y_i=0}^{S_{0i}} p_i(y_i) \end{aligned} \quad (12)$$

对于 SRU<sub>i</sub> 而言,每个 LRU 中有 1 个安装位置,则  $N$  个 LRU 中有  $N$  个安装位置。设  $N$  个 LRU 中 SRU<sub>i</sub> 备件短缺总数为  $n_i$ ,若随机选取的 1 个 LRU 中 SRU<sub>i</sub> 的备件短缺数为 0,则其余  $(N-1)$  个安装位置中必定存在  $n_i$  个备件短缺数。根据超几何分布的知识可知,随机选取的任意 1 个 LRU 中 SRU<sub>i</sub> 备件短缺数为 0 的概率为:

$$p_i(n_i) = \frac{C_{N-1}^{n_i}}{C_N^{n_i}} = \frac{N-n_i}{N} \quad (13)$$

则  $N$  个 LRU 中未因 SRU $i$  备件短缺而故障的概率为:

$$p_i = \sum_{n_i=0}^{n_{i\max}} Pr_i(BO_i = n_i)p_i(n_i) \quad (14)$$

式中:  $n_{i\max}$  为 SRU $i$  备件短缺数的最大值, 满足  $n_{i\max} = m_{i0}$

从而可求得任意一个 LRU 正常工作的概率为:

$$p_0 = \prod_{i=1}^M p_i \quad (15)$$

根据  $K/N$  系统的定义, 进一步求得系统的供应可用度为:

$$A_s = \sum_{k=K}^N C_N^k p_0^k (1-p_0)^{N-k} \quad (16)$$

至此, 可以以备件配置费用最小为优化目标, 以系统供应可用度为约束条件构建系统的备件优化配置模型。

$$\begin{cases} \min & C \sum_{i=1}^M C_i (S_{0i} + S_{1i}) \\ \text{s. t.} & A_s \geq A_{s0} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $C_i$  为第 SRU $i$  备件的单价;  $S_{0i}$  为基地级 SRU $i$  备件的数目;  $S_{1i}$  为基层级 SRU $i$  备件的数目;  $A_{s0}$  为系统使用可接受的供应可用度最小值。

分析建立的优化模型可知, 模型的求解是一个大规模、非线性的非确定多项式 (Non-deterministic Polynomial, NP) 问题。在模型求解方法方面, 相对于遗传算法、粒子群优化算法等其他优化算法而言, 边际效应分析法操作简便、计算准确度高, 已成为国外一些先进的备件模型, 如瑞典的 OPUS10、美国的 VMETRIC 的核心算法<sup>[12]</sup>。可见, 边际效应分析法已在实践中得到了检验, 是一种成熟的备件配置优化算法。为此, 本节将利用边际效应分析法对模型进行求解。

先求解备件满足率的边际效益值, 为此, 定义边际效益算子为:

$$\Delta S_{ji} = [A_s(S_{ji} + 1) - A_s(S_{ji})] / C_i \quad (18)$$

下面介绍具体算法。

**Step 1:** 确定系统控制变量, 即  $S_{ji}$ 。令  $S = \{S_{01}, S_{02}, \dots, S_{0M}, S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1M}\} = \{0, 0, \dots, 0\}$ , 记  $S$  中第  $h$  ( $1 \leq h \leq 2M$ ) 个元素为  $S_h = S_{ji}$ 。

**Step 2:** 计算每一轮迭代过程中控制变量的最大边际效益值  $\Delta S_{h\max} = \max \{ \Delta S_1, \Delta S_2, \dots, \Delta S_{2M} \}$ , 如果  $\Delta S_{h\max} = \Delta S_h$ , 则  $S_h = S_h + 1$ 。

**Step 3:** 计算对应控制变量下的系统供应可用度的值  $A_s$ , 如果  $A_s < A_{s0}$ , 转到 Step 2; 否则, 算

法结束, 对应的控制变量  $S$  即为最终配置方案。

### 3 算例分析

某型 LPAR 天线阵面由 1440 个 T/R 组件 (LRU) 组成, 每个 T/R 组件主要由收发开关 (SRU1)、控制电路和保护电路 (SRU2)、功放 (SRU3)、移相器和限幅器 (SRU4) 等组成。整个天线阵面采用冗余设计, 可以看作一个 1220/1440 的  $K/N$  系统。天线阵面采用基层级和基地级两级维修体制, 并设有基层级库存和基地级库存, 其中, 基地级以固定时间  $T$  为周期定期补给基层级库存。

相控阵雷达故障诊断和维修设备的不断发展, 大大缩短了 LRU 换件维修的时间。因此, 只需在基地级和基层级配备足够多的 SRU $i$  备件即可满足系统的备件需求, 同时, 也可以大大减少备件的配置费用。已知: T/R 组件的寿命服从参数为  $\lambda = 0.0005$  的指数分布, 单个 LRU 的费用为 3 万元, LRU 换件维修人员  $c_r = 14$  人, 换件维修率  $\mu_r = 2$ , 各 SRU $i$  备件的具体参数见表 1。

表 1 SRU $i$  备件参数

Tab. 1 Spare parts parameters of SRU $i$

参数	SRU1	SRU2	SRU3	SRU4
$\lambda_i$	$0.5 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
$C_i$ /万元	1	0.6	0.5	0.8
$c_i$	3	6	8	5
$\mu_i$	0.2	0.4	0.4	0.3

为满足天线阵面分系统供应可用度最低要求  $A_{s0} = 0.95$ , 试根据提供的参数, 合理地对抗线阵面基层级和基地级的 SRU $i$  初始备件进行配置, 以使得备件总费用最小。

根据建立的维修资源优化配置模型, 代入相关数据, 运用模型求解算法对模型进行求解, 得到表 2 所示的优化结果。

表 2 SRU $i$  备件配置结果

Tab. 2 Configuration results of SRU $i$  spare parts

	库存	备件数目	供应可用度	备件费用/万元
基层级	$S_{11}$	18	0.957 2	196.6
	$S_{12}$	33		
	$S_{13}$	41		
	$S_{14}$	25		
基地级	$S_{01}$	22	0.957 2	196.6
	$S_{02}$	66		
	$S_{03}$	43		
	$S_{04}$	44		

分析表2,基层级备件配置结果为  $S_{13} > S_{12} > S_{14} > S_{11}$ ,这与SRU故障率的大小  $\lambda_{SRU3} > \lambda_{SRU2} > \lambda_{SRU4} > \lambda_{SRU1}$  是相符的,表明基层级备件的配置水平与SRU $i$ 的故障率是正相关的。基地级备件的配置结果则表现出  $S_{02} > S_{04} > S_{03} > S_{01}$ ,表明基地级备件配置水平受SRU $i$ 故障率  $\lambda_i$ 、基地级维修渠道数  $c_i$  以及维修率  $\mu_i$  等因素的多重影响。纵向来看,基地级的备件配置水平高于基层级,表明在现有基地级维修条件下,基地级备件数目需高于基层级备件数目才能满足系统的备件供应可用度要求。总的来说,本节提出的备件配置方法能够反映备件需求的基本规律,符合实际情况。

为了验证模型的有效性,下面通过比较分析的方法进行进一步的说明。

### 3.1 算例一

为了突出配置SRU备件的优越性,与利用单项备件配置方法配置LRU的情况进行了比较。利用单项备件配置方法对天线阵面的LRU备件进行配置,当  $n\lambda T > 5$  时,备件需求量可利用正态分布近似计算,其计算公式<sup>[1]</sup>为:

$$S = N\lambda T + u_p \sqrt{N\lambda T} \quad (19)$$

式中:  $u_p$  为正态分布分位数,当要求保障概率为0.95时,  $u_p = 1.65$ 。

根据上述计算方法,需配置LRU备件约267个,其备件费用为801万元。

综合比较可知:配置SRU备件比配置LRU备件可节约备件费用约604.4万元,降低约75.46%的经费。可见,配置SRU备件可以大大减少备件的配置费用,从而取得很好的经济和军事效益。

### 3.2 算例二

为了验证模型的有效性,保持其他各项参数不变,将维修能力增加一倍,即  $c_i = [6, 12, 16, 10]$ 。经过仿真,可得到维修能力增加后,各项备件的配置结果,见表3。

综合比较表2和表3可知:维修能力的提高,提高了基地级SRU $i$ 备件修复的效率,缩短了维修时间,从而打乱了原有SRU $i$ 备件配置之间的平衡关系,维修备件开始重新进行配置,备件总数大大减少,使得备件费用也相应降低近19.4%。然而,由于采用定期补给的方式,为保证基层级备件的需求,因此,出现基层级备件配置数目增加的情况,这与实际情况是相符合的。

图5给出了维修能力增加前后备件配置费用与系统可用度曲线的对比图。

表3 增加维修能力后的SRU $i$ 备件配置结果

Tab.3 Configuration results of SRU $i$  spare parts after increasing repair capacity

	库存	备件数目	供应可用度	备件费用/万元
基层级	$S_{11}$	18		
	$S_{12}$	43		
	$S_{13}$	67		
	$S_{14}$	27		
基地级	$S_{01}$	22	0.958 0	158.5
	$S_{02}$	16		
	$S_{03}$	16		
	$S_{04}$	25		

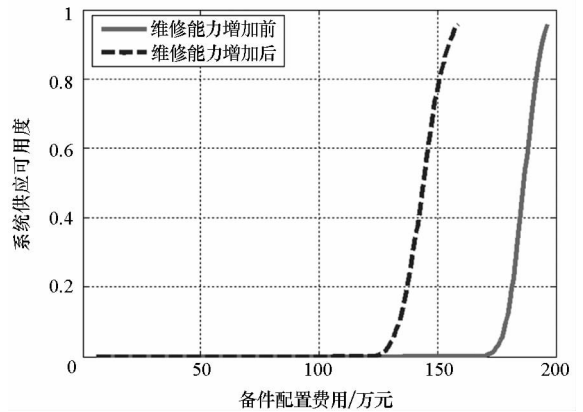


图5 维修能力增加前后备件配置对比图

Fig.5 Comparison chart of spare parts configuration before and after increase of repair capacity

从图5中可以看出:维修能力提高一倍后,花费很少的备件配置费用,系统供应可用度就可以达到  $A_0$  的最低要求;而当备件严重不足时,通过提高维修能力也可以得到较高的系统供应可用度。然而,在降低备件配置数目和备件配置费用的同时,增加系统的维修能力意味着维修费用也相应地增加。同时,从部队的角度来讲,编制体制也需相应变化,因此,一般不会通过增加维修能力的方式来降低备件配置水平。

## 4 结论

相控阵天线阵面的备件配置问题一直是部队亟待解决的难题。为此,本文从装备实际情况出发,综合考虑装备的冗余性、两级维修的特点以及维修能力的实际情况,提出了一种基于定期补给的相控阵天线阵面备件优化配置方法。构建了系统的供应可用度模型,以备件费用最小为目标对模型进行了优化,并运用边际效益分析法对模型进行了求解。算例仿真与分析结果表明:该方法

能够解决两级维修条件下考虑批量送修的大型冗余系统的维修备件配置问题,并且对于同一配置条件,相对于单独配置 LRU 的策略而言,该方法可以将维修备件的配置费用降低约 75.46%。此外,该方法能够结合装备与部队的实际情况对备件进行合理地配置,具有一定的应用价值。

## 参考文献 (References)

- [1] 国防科学技术工业委员会. 备件供应规划要求: GJB 4355—2002[S]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
Commission of Science and Technology Industry for National Defense. Spares provisioning requirements: GJB 4355—2002[S]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] Yanagi S, Sasaki M, Umazume K. Optimal inventory problem of a repairable  $k$ -out-of- $N$ :  $G$  system[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1981, R-30(5): 478-480.
- [3] 卢雷, 杨江平.  $k/N(G)$  系统初始备件配置方法[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 773-779.  
LU Lei, YANG Jiangping. Initial spare allocation method for  $k/N(G)$  structure system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(3): 773-779. (in Chinese)
- [4] 薛陶, 冯蕴雯, 秦强. 考虑报废的  $K/N$  冷备份冗余系统可修复备件优化[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2014, 42(1): 41-46.  
XUE Tao, FENG Yunwen, QIN Qiang. Optimization of repairable spare parts for  $K/N$  cold-standby redundant system considering scraps[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(1): 41-46. (in Chinese)
- [5] De Smidt-Destombes K S, Van Der Heijden M C, Van Herten A. On the interaction between maintenance, spare part inventories and repair capacity for a  $k$ -out-of- $N$  system with wear-out [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(1): 182-200.
- [6] 张涛, 郭波, 武小悦, 等.  $k$  阶段变化条件下  $k/N$ :  $G$  系统的备件保障度模型[J]. 兵工学报, 2006, 27(3): 485-488.  
ZHANG Tao, GUO Bo, WU Xiaoyue, et al. Spare availability model for  $k$ -out-of- $N$  system with different  $k$  in different phases[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(3): 485-488. (in Chinese)
- [7] De Smidt-Destombes K S, Van Der Heijden M C, Van Herten A. Joint optimization of spare part inventory, maintenance frequency and repair capacity for  $k$ -out-of- $N$  systems [J]. International Journal of Production Economics, 2009, 118(1): 260-268.
- [8] 阮旻智, 李庆民, 彭英武, 等. 任意结构系统的备件满足率模型及优化方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1799-1803.  
RUAN Minzhi, LI Qingmin, PENG Yingwu, et al. Model of spare part fill rate for systems of various structures and optimization method [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(8): 1799-1803. (in Chinese)
- [9] 贾治宇, 王立超, 王乃超, 等. 基于停机时间的复杂系统维修资源配置模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2211-2216.  
JIA Zhiyu, WANG Lichao, WANG Naichao, et al. Maintenance resources configuration model for complex system based on down time[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(10): 2211-2216. (in Chinese)
- [10] 王乃超, 康锐. 备件需求产生、传播及解析算法研究[J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1163-1167.  
WANG Naichao, KANG Rui. Research on spare demand generation, transfer and analytical algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(5): 1163-1167. (in Chinese)
- [11] Sherbrooke C C. Optimal inventory modeling of systems—multi-echelon techniques[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [12] 阮旻智, 李庆民, 李承, 等. 改进的分层边际算法优化备件的初始配置方案[J]. 兵工学报, 2012, 33(10): 1251-1257.  
RUAN Minzhi, LI Qingmin, LI Cheng, et al. Improved-layered-marginal algorithm to optimize initial spare part configuration project [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(10): 1251-1257. (in Chinese)

(上接第 171 页)

- [11] 张晓峰, 胡庆波, 吕征宇. 基于 BUCK 变换器的无刷直流电机转矩脉动抑制方法[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 72-76.  
ZHANG Xiaofeng, HU Qingbo, LYU Zhengyu. Torque ripple reduction in brushless DC motor drives using a BUCK converter[J]. IEEE Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(9): 72-76. (in Chinese)
- [12] Fang J C, Zhou X X, Liu G. Precise accelerated torque control for small inductance brushless DC motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1400-1412.
- [13] Lin Y K, Lai Y S. Pulse width modulation technique for BLDCM drives to reduce commutation torque ripple without calculation of commutation time[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2011, 47(4): 1786-1793.
- [14] Lu H F, Zhang L, Qu W L. A new torque control method for torque ripple minimization of BLDC motors with un-ideal back EMF[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 950-958.
- [15] Fang J C, Li H T, Han B C. Torque ripple reduction in BLDC torque motor with nonideal back EMF [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4630-4637.