

6-2-2020

Optimal Configuration Method of Block Spare Parts for k/N Systems Considering Cannibalization

Yongpan Wang

1. Unit 93502 of PLA, Hohhot 010051, China; ;2. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China;

Chunhe Chang

2. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China;

Jiangping Yang

2. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimal Configuration Method of Block Spare Parts for k/N Systems Considering Cannibalization

Abstract

Abstract: *Aiming at the configuration problem of block spare parts in k/N systems, an optimal configuration method of block spare parts considering cannibalization and on-condition maintenance was proposed. A spare parts fill rate model for k/N systems was established on the basis of two parameters named cannibalization rate and SRU replacement rate, and the constraint conditions of both the parameters were given respectively. An optimal configuration model was built, which chose the minimum spare costs as the object and the spare fill rate as the subject, and a model solution algorithm based on the margin analysis theory was given. Simulations and analysis were conducted by taking the spare parts configuration problem of one large-scale phased array antenna as an instance, and the optimal results were achieved through the simulation methods of quantitative and comparative analysis. The results show that the presented model is of high validity and feasibility, and can provide theoretical support for the deeply research on the block spare parts configuration problems for k/N systems.*

Keywords

k/N systems, block spare parts, spare parts configuration, cannibalization, spare parts fill rate

Recommended Citation

Wang Yongpan, Chang Chunhe, Yang Jiangping. Optimal Configuration Method of Block Spare Parts for k/N Systems Considering Cannibalization[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(3): 654-661.

考虑串件拼修的 k/N 系统批量备件配置方法王永攀^{1,2}, 常春贺², 杨江平²

(1. 93502部队, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 空军预警学院, 湖北 武汉 430019)

摘要: 针对 k/N 系统批量备件的配置问题, 提出一种视情维修条件下考虑串件拼修的备件优化配置方法。建立了基于串拼修复率和 SRU 更换率的系统级备件满足率模型, 给出了串拼修复率和 SRU 更换率的约束条件。以备件配置费用最小为目标, 以系统备件满足率为约束条件建立了系统备件的优化配置模型, 设计了一种基于边际效益分析法的模型求解算法。以某型大型相控阵天线阵面备件配置为例, 利用定量和比较的仿真分析方法对提出的模型进行了验证, 得到了备件的优化配置结果。结果表明: 提出的模型真实有效、可行性强, 为进一步研究 k/N 系统批量备件的配置问题提供了理论支持。

关键词: k/N 系统; 批量备件; 串件拼修; 备件配置; 备件满足率

中图分类号: N94/N95 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 03-0654-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201703025

Optimal Configuration Method of Block Spare Parts for k/N Systems Considering CannibalizationWang Yongpan^{1,2}, Chang Chunhe², Yang Jiangping²

(1. Unit 93502 of PLA, Hohhot 010051, China; 2. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Aiming at the configuration problem of block spare parts in k/N systems, an optimal configuration method of block spare parts considering cannibalization and on-condition maintenance was proposed. A spare parts fill rate model for k/N systems was established on the basis of two parameters named cannibalization rate and SRU replacement rate, and the constraint conditions of both the parameters were given respectively. An optimal configuration model was built, which chose the minimum spare costs as the object and the spare fill rate as the subject, and a model solution algorithm based on the margin analysis theory was given. Simulations and analysis were conducted by taking the spare parts configuration problem of one large-scale phased array antenna as an instance, and the optimal results were achieved through the simulation methods of quantitative and comparative analysis. The results show that the presented model is of high validity and feasibility, and can provide theoretical support for the deeply research on the block spare parts configuration problems for k/N systems.

Keywords: k/N systems; block spare parts; spare parts configuration; cannibalization; spare parts fill rate

引言

近年来, k/N 系统凭借其高可用度和高可靠性

等优势已经在相控阵雷达、舰船、飞机等大型复杂系统中得到广泛的应用^[1-2]。因此, 如何对 k/N 系统的备件进行配置成为系统使用方重点关注和亟待解决的问题。结合 k/N 系统的特点及系统维修实际, 从故障件维修的角度来看, 当前 k/N 系统的备件配置主要有以下 3 方面的问题急需研究: (1) 故障件单件送修条件下的备件配置问题; (2) 故障件



收稿日期: 2015-05-29 修回日期: 2015-09-06;
基金项目: 军内科研项目(KJ2014023200B11145),
博士研究生专项课题(2014JY546);
作者简介: 王永攀(1987-), 男, 河北保定, 博士,
研究方向为预警装备管理与保障; 常春贺(1982-),
男, 河南上蔡, 博士, 研究方向为雷达装备管理与
维修保障技术。

<http://www.china-simulation.com>

批量送修条件下的备件配置问题; (3) 故障件串件拼修条件下的备件配置问题。针对上述问题, 部分专家学者展开了深入的研究。

文献[3-5]考虑了系统部件故障后立即进行更换与送修的情况, 并从备件短缺概率的角度建立了 k/N 系统的备件优化配置模型, 解决了单件送修方式下系统备件配置的问题; 文献[6-7]考虑了故障件批量送修的情况, 分别从备件满足率的角度和故障停机率的角度研究了 k/N 系统备件的优化配置模型, 在一定程度上解决了批量送修条件下备件的配置问题。但是, 上述文献只研究了前两个问题, 并未考虑串件拼修情况下 k/N 系统备件的配置问题。所谓串件拼修是指通过故障件拆卸, 将发生短缺的备件项目统一集中在尽可能少的装备系统中的一种维修策略^[8]。串件拼修策略能够在有限的备件约束及特定的保障模式下, 使系统的可用度达到上限, 并且可以有效的降低备件配置费用。可见, 对于 k/N 系统而言, 研究串件拼修条件下系统的备件配置问题意义重大。

当前, 国内关于串件拼修问题的报道较少, 在大型相控阵天线阵面等大型 k/N 系统领域更是少见。为解决串件拼修条件下 k/N 系统的备件配置问题, 本文以备件配置费用最小为目标、以备件满足率为约束条件, 建立了系统的备件优化配置模型。该模型可以解决首先进行串件拼修的 k/N 系统基层级维修的备件配置问题, 为广泛开展考虑串件拼修的 k/N 系统的备件优化配置研究提供了理论依据。

1 问题描述与假设

所谓 k/N 系统是指系统由 N 个部件组成, 并且至少有 k 个或以上部件正常工作时系统才能正常运行的系统。设某型 k/N 系统由 N 个 LRU 组成, 每个 LRU 由 M 个 SRU 串联组成, 当任意一个 SRU 故障时, 对应的 LRU 故障; 系统正常工作时, 要求至少有 k 个 LRU 正常工作, 其具体结构如图 1 所示。

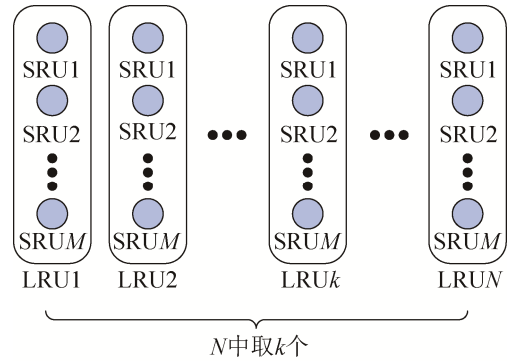


图 1 k/N 系统结构图

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。以视情维修为例, 当系统运行到视情维修阈值 m 时, 需停机进行维修; 维修时, 如果库存中有 LRU 备件, 则先对故障 LRU 进行更换, 剩余的故障 LRU 分两部分进行修复, 一部分通过串件拼修的方式进行修复, 另一部分则通过库存中提供相应的 SRU 备件进行 SRU 换件得到修复; 整个过程中产生的故障 LRU 或者 SRU 直接送修基地或厂家, 而基层库存则通过基地或厂家进行补充。图 2 给出了考虑串件拼修的基层级预防性维修的具体流程。

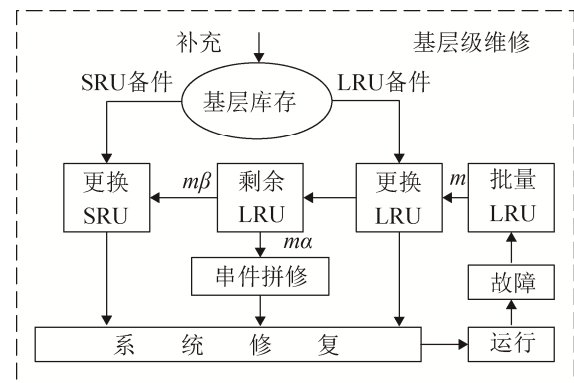


图 2 k/N 系统基层级维修流程

Fig. 2 AVUM repair flow of k/N system

根据图 2 所示的维修流程, 如何对系统的批量备件进行合理的配置是本文重点解决的问题。在开展研究前, 首先需要做出以下假设:

(1) 系统中各 LRU 及各 LRU 中对应的 SRU 为同型部件, 且 LRU 原件维修时间远远大于其拆卸时间。

(2) 系统采取基层级视情维修策略，维修时，先进行 LRU 换件维修，然后对剩余的故障 LRU 采取基层级串件拼修策略或更换 SRU。

(3) 串件拼修原则为以故障数目最少的 LRU 为拼修母体；SRU 备件配置原则为要求备品种单一，即只对其中一种 SRU 进行备件配置。

(4) 系统维修能力无限，且部件都能修复如新；上级对基层级备件采取周期供货方式，供货周期为 T 。

2 备件优化配置模型

2.1 系统级备件满足率模型

记 LRU 中第 j 个 SRU 为 SRU_j ，设 SRU_j 的故障率为 λ_j ，由于系统中所有 LRU 都相同，则 LRU 的故障率 λ 可统一表示为

$$\lambda = \sum_{j=1}^M \lambda_j \quad (1)$$

设在 τ 时间段内，发生故障的 LRU 数目的期望值为 m_τ 。定义 α 为串拼修复率，通过串件拼修修复的故障 LRU 数目占故障 LRU 总数的百分比，则可求得通过串件拼修修复的 LRU 数目 m_c 为

$$m_c = \lceil m_\tau \alpha \rceil \quad (2)$$

定义 β 为 SRU 更换率，即通过更换 SRU 修复的 LRU 占故障 LRU 总数的百分比，则通过更换 SRU 修复的 LRU 的期望数目(即系统对 SRU 备件的总需求数) m_{SRU} 为

$$m_{SRU} = \lceil m_\tau \beta \rceil \quad (3)$$

进一步可得到在 τ 时间段内，系统对 LRU 备件的需求数的期望值 m_{LRU} 为

$$m_{LRU} = m_\tau - m_c - m_{SRU} = (1 - \alpha - \beta)m_\tau \quad (4)$$

由于 k/N 系统采取视情维修方式且 LRU 发生故障具有随机性，因此，在供货周期 T 内，系统对库存中 LRU 备件的需求可以分为两个阶段，第一个阶段发生在当系统发生故障的 LRU 数目 $m_i \leq m-1$ 时，此时系统不需要进行维修，消耗系统备件 RU (包括 LRU 备件和 SRU 备件)的数目 $s=0$ 的概率为

$$p_{RU}(s=0) = \sum_{m_i=0}^{m-1} C_N^{m_i} \cdot e^{-\lambda T(N-m_i)} \cdot (1 - e^{-\lambda T})^{m_i} \quad (5)$$

第二阶段发生在当系统中发生故障的 LRU 数目达到 m 个时，此时系统需停机进行维修，需要消耗 RU 备件。设第一阶段开始到第二阶段开始的过渡时间为 t ($0 \leq t \leq T$)，则系统中故障 LRU 的数目从 0 个变为 m 个的概率密度函数为

$$p_m(t) = C_N^{m-1} C_{N-m+1}^1 \lambda e^{-\lambda t(N-m+1)} (1 - e^{-\lambda t})^{m-1} \quad (6)$$

系统消耗 $s_{lru} > 0$ 个 LRU 备件和 $s_{sruij} > 0$ 个 SRU_j 备件概率分别为

$$p_{LRU}(s_{lru} > 0) = \int_0^T p_m(t) \frac{(\lambda(N-m)(T-t)(1-\alpha-\beta))^{s_{lru}}}{s_{lru}!} e^{-(\lambda(N-m)(T-t)(1-\alpha-\beta))} dt = \frac{C_N^m (N-m)^{s_{lru}} \lambda^{s_{lru}+1} (1-\alpha-\beta)^s}{m s_{lru}!} e^{-(\lambda T(N-m)(1-\alpha-\beta))} \int_0^T e^{-\lambda t((N-m)(\alpha+\beta)+1)} (1 - e^{-\lambda t})^{m-1} (T-t)^{s_{lru}} dt \quad (7)$$

$$p_{SRU_j}(s_{sruij} > 0) = \int_0^T p_m(t) \frac{(\lambda_j(N-m)(T-t)\beta\gamma_j)^{s_{sruij}}}{s_{sruij}!} e^{-(\lambda(N-m)(T-t)\beta\gamma_j)} dt = \frac{C_N^m \lambda^{s+1} (N-m)^{s_{sruij}} (\beta\gamma_j)^{s_{sruij}}}{m s_{sruij}!} e^{-\lambda T(N-m)\beta\gamma_j} \int_0^T e^{-\lambda t((N-m)(1-\beta\gamma_j)+1)} (1 - e^{-\lambda t})^{m-1} (T-t)^{s_{sruij}} dt \quad (8)$$

式中： γ_j 为各 SRU_j 备件的需求权重，即 SRU_j 备件占系统对 SRU 备件需求总数的百分比。

假设 LRU 备件的数量为 S_{LRU} ，则可得到 LRU 备件的满足率模型为

$$p_{LRU}(S_{LRU}) = p_{RU}(s_{lru} = 0) + \sum_{s_{lru}=1}^{S_{LRU}} p_{LRU}(s_{lru} > 0) \quad (9)$$

假设 SRU_j 备件的数量为 S_{SRU_j} ，则可得到 SRU_j 备件的满足率模型为

$$p_{LRU}(S_{SRUj}) = p_{RU}(s_{sruj} = 0) + \sum_{s_{sruj}=1}^{S_{SRUj}} p_{SRUj}(s_{sruj} > 0) \quad (10)$$

由于系统级的备件满足率需要综合考虑 LRU, SRU $_j$ 及串件拼修等多种因素, 对寿命服从指数分布的 RU 组件, 系统级备件满足率可表示为

$$p = \frac{\sum_{x=1}^{M+1} \lambda_x \delta_x T p_x(s)}{\sum_{x=1}^{M+1} \lambda_x \delta_x T} \quad (11)$$

式中: $M+1$ 表示系统中可供进行配置的备件品种, 包括 M 种 SRU 备件和 1 种 LRU 备件; λ_x 表示需要配置的第 x 种备件的故障率; δ_x 为选择示性函数, 当第 x 种备件需要配置时, $\delta_x=1$, 否则, $\delta_x=0$ 。

如果只需要配置一种 SRU 时, 以配置 SRU $_j$ 为例, 则有 $\gamma_j=1$; 否则, $\gamma_j=0$ 。此时, 系统的备件满足率模型可表示为

$$p = \frac{\lambda p_{LRU}(s_{lrul}) + \lambda_j p_{SRUj}(s_{sruj})}{\lambda + \lambda_j} \quad (12)$$

2.2 确定参数 α 、 β 范围

参数 α 、 β 的取值直接影响系统的串件拼修水平以及 SRU 换件水平, 为此, 需要确定参数 α 、 β 的取值范围。

在进行串件拼修前, 首先要对故障件进行检测和故障区分, 其中, LRU 发生故障的原因是由 SRU $_j$ 引起的概率可表示为^[9]

$$p_{SRUj} = \frac{DC_j \lambda_j (1 - p_{cj})}{\lambda (1 - p_c)} \quad (13)$$

式中: DC_j 为占空比定义, 即 SRU $_j$ 运转时间占整个 k/N 系统运转时间的百分比; p_c 为 LRU 的故障虚检概率, p_{cj} 为 SRU $_j$ 的故障虚检概率。

进一步可求得在 τ 时间段内, 故障 SRU $_j$ 的期望个数为

$$m_{SRUj} = \left\lceil \frac{m_\tau p_{SRUj}}{\sum_{j=1}^M p_{SRUj}} \right\rceil \quad (14)$$

根据 k/N 系统基层级维修流程, 在对系统中批量到来的故障件进行检测后需对故障件进行串件拼修, k/N 系统的串件拼修的过程如图 3 所示。从图中可以看出, 一个故障 LRU 与其他故障 LRU 串件可以修复 $M-1$ 个故障 LRU。设维修时故障 SRU 数目的最小值为 m_s , 则

$$m_s = \min \{m_{SRU1}, m_{SRU2}, \dots, m_{SRUM}\} \quad (15)$$

通过串件拼修修复的 LRU 数目 m_{cr} 可表示为

$$m_{cr} = (M - 1)m_s \quad (16)$$

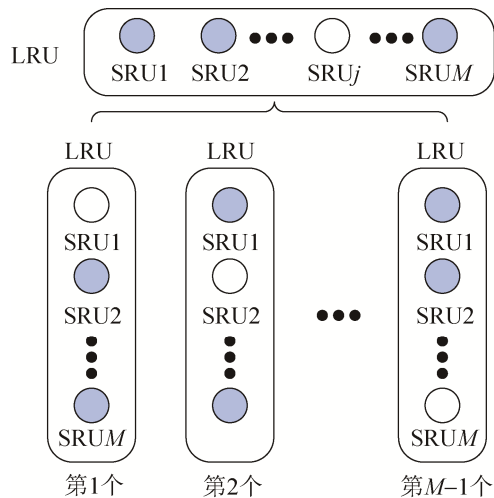


图 3 k/N 系统串件拼修过程
Fig. 3 Cannibalization process of k/N system

最终可求得串件拼修率 α 的取值范围为

$$0 \leq \alpha \leq \frac{m_{cr}}{m_\tau} = \min \left\{ \frac{(M - 1) p_{SRUj}}{\sum_{j=1}^M p_{SRUj}} \right\} \quad (17)$$

在串件拼修率为 α 的条件下, 系统进行串件拼修的母体 LRU 数目 m_{bLRU} 为

$$m_{bLRU} = \left\lceil \frac{m\alpha}{M - 1} \right\rceil \quad (18)$$

经过串件拼修后, 系统对 SRU $_j$ 备件期望数目的最大值为

$$S_{SRUj} = m_{SRUj} - m_{bLRU} \quad (19)$$

在给定各 SRU $_j$ 备件的需求权重 γ_j 条件下, SRU $_j$ 备件的需求数目通常满足

$$m_\tau \beta \gamma_j \leq S_{SRUj} \quad (20)$$

由于只需配置一种 SRU，此时需配置的 SRU_j 的权重 $\gamma_j=1$ ，因此，可得到备件 SRU_j 更换率 β 的取值范围为

$$0 \leq \beta \leq \min \left\{ \frac{P_{SRUj}}{\sum_{j=1}^M P_{SRUj}} - \frac{a}{M-1} \right\} \quad (21)$$

2.3 备件优化配置模型

为了在一定的备件满足率条件下使得备件的配置费用最小，可建立如下的备件优化配置模型

$$\begin{cases} \min & C = S_{LRU} C_{LRU} + \sum_{j=1}^M S_{SRUj} C_{SRUj} \\ s.t. & p \geq p_0 \end{cases} \quad (22)$$

式中： S_{LRU} 为 LRU 备件的配置数量； S_{SRUj} 为第 j 个 SRU 的备件配置数量； C_{LRU} 为单个 LRU 备件的费用； C_{SRUj} 为单个 SRU_j 备件的费用； p_0 为规定的备件满足率最小值。

在模型求解方法方面，与其他算法相比，边际效益分析法具有操作简便、计算准确度高的特点，国外先进的备件模型如瑞典的 OPUS10、美国的 VMETRIC 均将其作为核心算法。可见，边际效益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，本文借助边际效益分析法对模型进行求解，图 4 给出了模型求解方法的流程图。

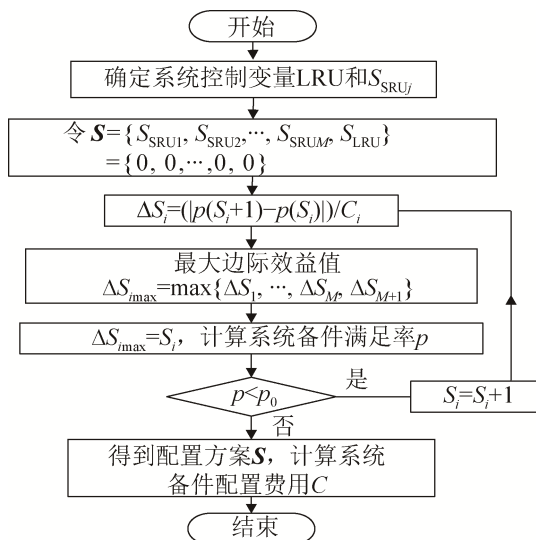


图 4 算法流程图

Fig. 4 The algorithm flow chart

具体步骤如下：

Step 1 确定系统控制变量，即 S_{LRU} 和 S_{SRUj} ，令 $S = \{S_{SRU1}, S_{SRU2}, \dots, S_{SRUM}, S_{LRU}\} = \{0, 0, \dots, 0, 0\}$ ，记 S 中第 i 个元素为 S_i ，其对应的备件单价为 C_i 。

Step 2 计算每一轮迭代过程中控制变量的最大边际效益值 $\Delta S_{imax} = \max\{\Delta S_1, \dots, \Delta S_M, \Delta S_{M+1}\}$ ，其中 $\Delta S_i = (p(S_i+1) - p(S_i))/C_i$ (23)

如果 $\Delta S_{imax} = \Delta S_i$ ，则 $S_i = S_i + 1$ 。

Step 3 计算对应控制变量下的系统备件满足率的值 p ，如果 $p < p_0$ ，转到 Step2；否则，算法结束，对应的控制变量 S 即为最终配置方案。

3 算例仿真与分析

某大型相控阵天线阵面由 1 440 个 T/R 组件 (LRU) 组成，可以看作一个 1 220/1 440 的 k/N 系统。已知：系统视情维修阈值 $m=180$ 个；备件的供应周期 $T=400$ h；用户要求的最小备件满足率为 $p_0=0.95$ ；系统中单个 LRU 备件的配置费用为 6 000 元；每个 LRU 由 4 个 SRU 串联而成，其对应的具体参数如表 1 所示。

表 1 SRU 具体参数
Tab. 1 The detailed parameter of SRU

名称	SRU1	SRU2	SRU3	SRU4
λ_j	0.000 05	0.000 10	0.000 15	0.000 20
$C_{SRUj}/\text{元}$	2000	1500	1200	800

该天线阵面在视情维修过程时存在串件拼修现象，且要求配备的 SRU 级备件单一，为此，提供了表 2 所示的 4 种方案，并在假定串件拼修率 $\alpha=10\%$ 的条件下，计算出了各种方案对应的 SRU 更换率 β 的最大值。

表 2 SRU 具体参数
Tab. 2 The detailed parameter of SRU

名称	SRU1	SRU2	SRU3	SRU4	β_{max}
方案 1 γ_j	1	0	0	0	0.065 8
方案 2 γ_j	0	1	0	0	0.168 2
方案 3 γ_j	0	0	1	0	0.269 0
方案 4 γ_j	0	0	0	1	0.363 5

为了说明问题，选择 SRU 更换率 $\beta=5\%$ ，且将

相关数据代入建立的备件优化配置模型, 根据模型求解算法, 借助 MATLAB 工具得到备件的优化配置结果如表 3 所示, 不同 SRU 备件条件下备件配置费用与备件满足率的关系如图 5 所示。

表 3 备件配置结果

Tab. 3 The configuration results of spare parts

$\alpha=10\%$	配置结果/个		配置费用/元	满足率
	LRU	SRU $_j$		
$\beta=5\%$				
$j=1$	94	21	606 000	0.956 31
$j=2$	93	22	591 000	0.952 41
$j=3$	93	22	584 400	0.954 64
$j=4$	92	23	570 400	0.950 79

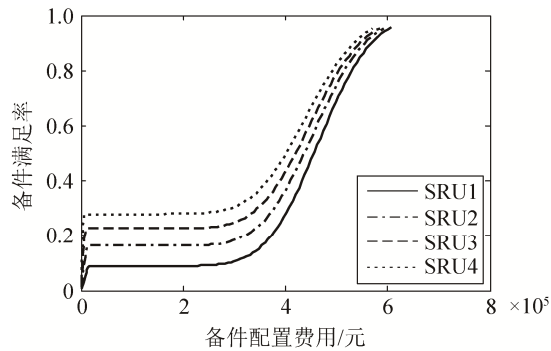


图 5 不同 SRU 备件配置费用与满足率的关系

Fig. 5 Relations between cost of spare parts and spare fill rate among different SRU

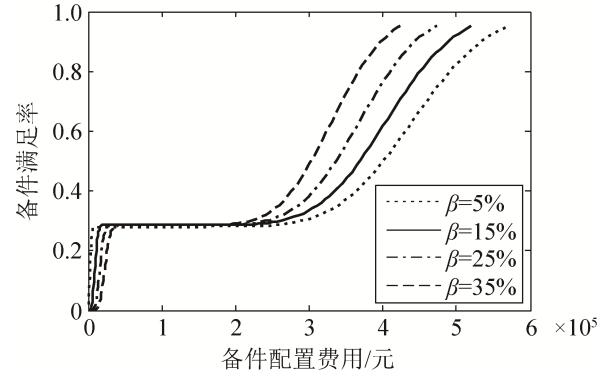
仿真结果表明: 在满足规定的备件满足率条件下, 不同 SRU 备件的配置水平各不相同, 其中, 方案 4 的备件配置水平相对较低, 且备件配置费用最小。在考虑串件拼修的条件下, 大型相控阵雷达天线阵面的备件配置方案应选择方案 4。

选定方案 4, 假定串件拼修率 $\alpha=10\%$, 逐步增加 SRU 更换率, 得到 β 变化条件下系统的备件配置结果如表 4 所示, 其中, 系统备件配置费用与备件满足率的关系如图 6 所示。

表 4 备件配置结果

Tab. 4 The configuration results of spare parts

$\alpha=10\%$	配置结果/个		备件配置费用/元	满足率
	LRU	SRU4		
$\beta=5\%$	92	23	570 400	0.950 79
$\beta=15\%$	81	43	520 400	0.951 63
$\beta=25\%$	71	60	474 000	0.954 10
$\beta=35\%$	61	76	426 800	0.957 23

图 6 β 变化条件下备件配置费用与满足率的关系Fig. 6 Relations between cost of spare parts and spare fill rate while β changes

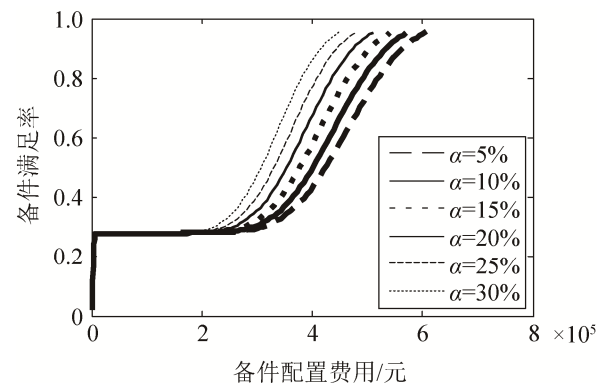
仿真结果表明: α 不变, 不同的 SRU 更换率, 备件的配置水平不同, β 越大, 系统的备件配置费用越小。

选定方案 4, 假定 SRU 更换率 $\beta=5\%$, 逐步增加串件拼修率, 得到 α 变化条件下系统的备件配置结果如表 5 所示, 系统备件配置费用与备件满足率的关系如图 7 所示。

表 5 备件配置结果

Tab. 5 The configuration results of spare parts

$\beta=5\%$	配置结果/个		配置费用/元	满足率
	LRU	SRU4		
$\alpha=5\%$	98	23	606 400	0.955 41
$\alpha=10\%$	92	23	570 400	0.950 79
$\alpha=15\%$	87	23	540 400	0.951 91
$\alpha=20\%$	82	22	509 600	0.953 14
$\alpha=25\%$	77	22	479 600	0.954 49
$\alpha=30\%$	72	22	449 600	0.955 98

图 7 α 变化条件下备件配置费用与满足率的关系Fig. 7 Relations between cost of spare parts and spare fill rate while α changes

仿真结果表明： β 不变，不同的串件拼修率条件下备件配置水平不同， α 越大，系统的备件配置费用越小。

结合上述仿真分析结果可知，存在某一 α 和 β 在满足系统备件满足率的条件下可使得系统的备件配置费用最低。根据分析，对于任意的 α ，存在 $\beta = \beta_{max}$ 使得其对应的备件配置费用最低。为此，可得到 α 和 β 变化条件下系统的备件配置费用变化曲线如图 8 所示。从图中可以看出，当 $\alpha = 30\%$ ， $\beta = 29.69\%$ 时，在保证系统备件满足率条件下，备件的配置费用达到最小。利用边际效益分析法对备件优化配置模型进行仿真求解，在经历 111 轮迭代后，得到最终的配置结果为：LRU 备件配置 65 个；SRU4 备件配置 45 个；备件保障概率 $p = 0.95063$ ；备件配置费用为 322 000 元。

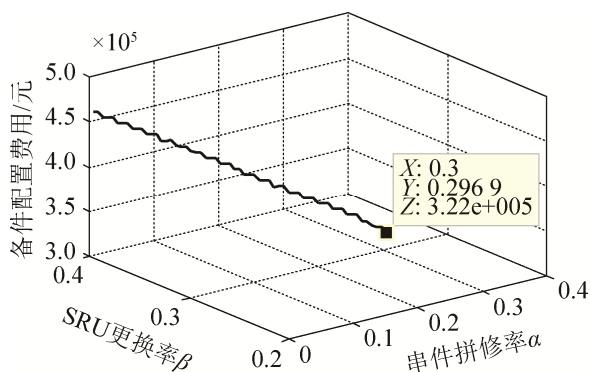


图 8 α 、 β 与系统的备件配置费用的关系
Fig. 8 Relation between cost of spare parts and α , β

综上所述：论文提出的备件配置方法能够解决考虑串件拼修的 k/N 系统的备件配置问题，具有一定的实效性。

当前，关于备件的配置，传统的方法是国军标中提供的备件满足率法^[10]。然而，传统方法主要对单项备件进行配置，而对于批量备件并不能起到较好的配置效果。为了进一步突出本文方法的先进性，对两种方法条件下备件配置费用与备件满足率的关系进行了仿真比较，图 9 给出了本文方法与传统方法的比较结果。从图中可以看出，本文方法在解决串件拼修问题方面优越性突出，能够以较小的

备件配置费用获取较高的备件满足率水平。

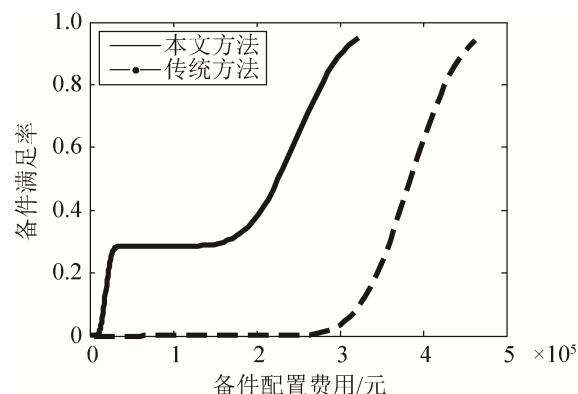


图 9 两种方法对比分析
Fig. 9 Contrastive analysis of two methods

4 结论

k/N 系统批量备件的优化配置是当前和今后需要重点解决的问题，结合研究现状及工程应用实际，本文主要做了以下工作：

(1) 定义了系统的串件拼修率和 SRU 更换率两个重要参数，并给出了参数的约束条件，在此基础上建立了系统级备件满足率模型；

(2) 以备件配置费用最小为目标、以备件满足率为约束条件，建立了考虑串件拼修的 k/N 系统备件优化配置模型，并给出了模型求解算法；

(3) 以某大型相控阵雷达天线阵面为例，利用定量分析法和比较分析法对模型进行了仿真，研究了备件配置费用与串件拼修率和 SRU 更换率的关系，最终确定了系统备件的优化配置结果。

仿真与分析结果表明：提出的模型能够有效的解决串件拼修条件下 k/N 系统的备件配置问题，具有一定的实用价值。

参考文献：

- [1] 王永攀, 杨江平, 郑玉军, 等. 任意备件条件下的 k/N 系统维修优化模型 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2015, 16(6): 569-574. (Wang Y P, Yang J P, Zheng Y J, et al. Optimal Maintenance Model for the k -out-of- n System with random spares [J]. Journal of PLA University of Science and Technology Natural Science Edition, 2015, 16(6): 569-574.)

- [2] 卢雷, 杨江平. 任意寿命分布下 $k/N(G)$ 系统定时维修决策模型 [J]. 现代防御技术, 2015, 43(1): 145-149. (Lu L, Yang J P. Time based maintenance optimization model for k/N (G) system with various lifetime distribution [J]. Modern Defence Technology, 2015, 43(1): 145- 149.)
- [3] 卢雷, 杨江平. $k/N(G)$ 结构系统初始备件配置方法 [J]. 航空学报, 2014, 35(3): 773-779. (Lu L, Yang J P. Initial spare allocation method for $k/N(G)$ structure system [J]. Acta Aeronautica Sinica, 2014, 35(3):773- 779.)
- [4] 聂涛, 盛文. $K:N$ 系统可修复备件两级供应保障优化研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(7): 1452-1455. (Nie T, Sheng W. Research on two-echelon supply support optimizing for repairable spare parts of $K:N$ system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(7): 1452-1455.)
- [5] 薛陶, 冯蕴雯, 秦强. 考虑报废的 K/N 系统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 T, Feng Y W, Qin Q. 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.)
- [6] 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 Z Y, Wang L C, Wang N C, et al. Maintenance resources configuration model for complex system based on down time [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(10): 2211-2216.)
- [7] 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其优化方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1799-1803. (Ruan M Z, Li Q M, Peng Y W, 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.)
- [8] 阮旻智, 李庆民, 彭英武, 等. 串件拼修对策下多级维修供应的装备系统可用度评估 [J]. 航空学报, 2012, 33(4): 658-665. (Ruan M Z, Li Q M, Peng Y W, et al. Evaluation of equipment system availability for multi-echelon maintenance supply with cannibalization [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(4): 658-665.)
- [9] 罗祎, 阮旻智, 李庆民. 任意结构下可修复备件的配置方案优化 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9): 1865-1871. (Luo Yi, Ruan Minzhi, Li Qingmin. Configuration project optimization for repairable spare parts under discretionary structures [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(9): 1865-1871.)
- [10] 国防科学技术工业委员会. GJB 4335-2002 备件供应规划要求 [S]. 北京: 国防工业出版社, 2002. (Commission of Science and Technology Industry for National Defense. GJB 4355-2002 Spare provisioning requirements [S]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2002.)

(上接第 645 页)

- [9] Alnimr M A, Hammoudeh V A, Hamdan M A. Effect of Velocity-Slip Boundary Conditions on Jeffery-Hamel Flow Solutions [J]. Journal of Applied Mechanics, 2010, 77(4): 615-622.
- [10] 周江华, 苗育红. 基于矢量观测的最小方差姿态估计算法 [J]. 宇航学报. 2009, 30(5): 377-397. (Zhou Jianghua, Miao Yuhong. A minimum variance attitude estimation algorithm based on vector observation [J]. Acta Astronautica Sinica, 2009, 30(5): 377-397.)
- [11] 占荣辉. 非线性滤波理论与目标跟踪应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013. (Zhan Ronghui. Non-linear filtering theory and application of target tracking [M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2013.)
- [12] Stefan I Adalbjornsson. Efficient Block and Time-recursive estimation of Sparse Volterra Systems [C]// 2012 IEEE Statistical Signal Processing Workshop. USA: IEEE, 2012: 173-176.