

大型相控阵雷达天线阵面备件优化配置研究

常春贺¹, 武高卫², 于兴伟³, 姚旭⁴

- (1. 空军预警学院黄陂士官学校, 湖北武汉 430345;
2. 空军预警学院研究生管理大队, 湖北武汉 430019;
3. 中国人民解放军 95921 部队, 山东济南 250000;
4. 北部战区空军参谋部, 辽宁沈阳 110015)

摘要: 针对大型相控阵雷达天线阵面视情维修与定期维修在维修时机上存在交叉的现象, 将视情维修与定期维修相结合, 提出了一种基于 m/T 维修策略大型相控阵雷达天线阵面备件优化配置模型。首先, 在对 m/T 维修策略分析的基础上, 建立了系统的使用可用度模型, 并利用 0-1 分布对使用可用度进行了求解计算; 然后, 以使用可用度为约束条件, 以 LRU 备件配置费用最小为优化目标, 对大型相控阵雷达天线阵面备件配置进行了优化研究; 最后, 通过实例验证了该优化模型的有效性。

关键词: 天线阵面; k/N 系统; 维修策略; 使用可用度; 备件

中图分类号: TN956 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2017)03-0334-05

Research on Optimization Model for Spare Parts of Large-Scale Phased Array Radar Antenna

CHANG Chunhe¹, WU Gaowei², YU Xingwei³, YAO Xu⁴

- (1. Huangpi Sergeant School, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430345, China; 2. Department of Graduate Management, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 3. Unit 95921 of PLA, Jinan 250000, China; 4. North Theater Air Force Staff, Shenyang 110015, China)

Abstract: Aiming at the problem of time overlapping between condition-based maintenance and periodic maintenance of large phased array antenna, the m/T maintenance policy is put forward. Based on this maintenance policy, a system optimization model for spare parts is established. Firstly, a system operational availability model is set through analyzing the m/T maintenance policy; and the operational availability is calculated using 0-1 distribution law. Then, the optimization of spare-part configuration is studied by taking the operational availability as constraint condition and the configuration cost of LRU spare parts as optimization objective. Finally, the validity of the proposed maintenance and optimization model is verified by an example.

Key words: array antenna; k/N system; maintenance policy; operational availability; spare parts

0 引言

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。作为大型相控阵雷达的主要组成部分, 天线阵面分系统规模庞大, 造价昂贵, 天线阵面的备件配置问题已成为当前部队和科研院所研究和关注的重点^[1]。天线阵面备件作为装备保障维修工作顺利开展的物质基础, 其配置水平直接关系到大型相控阵雷达天线阵面能否

得到及时、有效的修复, 必须进行合理配置^[2]。对大型相控阵雷达天线阵面来说, 其最大的特点是采用模块化、冗余性设计, 所以天线阵面普遍采用预防性维修策略。预防性维修策略通常包括定期维修策略和视情维修策略两种。文献[3]提出了一种简单的视情维修策略—— m 维修策略, 当系统故障单元数达到 m 时进行维修, 并建立了 m 维修策略下系统使用可用度模型; 在此基础上, 文献[4]针对实际维修活动中备件有限的情况, 提出了 (m, N_G) 维修策略, 讨论分析了备件数目和 N_G 的选择对使用可用度的影响; 文献[5]根据装备系统

的不同结构特点,建立了复杂结构系统的特定 m 维修策略可用度模型;文献[6]提出了一种定期维修策略—— T 维修策略,对无备件情况下的系统定期维修周期进行了研究;文献[7]通过分析维修费用和维修效能,建立了基于装备可用度和期望费用的定期维修周期优化模型。上述文献中,要么是从视情维修的角度考虑,要么是从定期维修的角度考虑,而在实际的装备维修保障工作中,视情维修和定期维修是交叉进行的,视情维修和定期维修相结合的维修策略更加符合装备维修保障实际。文献[8]运用定数、定时混合截尾寿命思想,提出了一种 (n, L, r, r) 维修策略,并研究了基于该策略使用可用度的求解方法,为求解问题提供了思路;借鉴该思想,文献[9]提出了一种 (m, T, r) 维修策略,建立了备件充足条件下的 k/N 系统维修优化模型。然而,在装备实际运用中,备件数目不一定总能满足维修需求,如何对备件进行配置也是需要考虑的问题。

为了更好地解决大型相控阵雷达天线阵面的备件配置问题,本文综合考虑视情维修和定期维修这两种预防性维修策略,提出了一种 m/T 维修策略,并通过使用可用度进行分析,建立了以使用可用度为约束条件,以备件配置费用最小为优化目标的备件优化配置模型,并对 LRU 备件进行优化研究。需要说明的是,由于大型相控阵雷达天线阵面冗余性强,为此,本文将其看作一个 k/N 系统,以下 k/N 系统或系统均指大型相控阵雷达天线阵面。

1 问题描述与假设

1.1 m/T 维修策略描述

在系统维修保障过程中,视情维修工作和定期维修工作的开展时机是并行的,这就不可避免地出现维修时机交叉现象:即在定期补给周期 T 内,若 k/N 系统的 LRU 故障数 $\xi \geq m$ (m 为视情维修阈值, $0 < m \leq N - k$),则系统停机,按照视情维修策略,需立即对其进行维修;维修完成后,当系统运行到定期维修阈值 T 时,按照定期维修策略,仍然需要对系统进行定期维修。这种维修时机交叉现象产生的维修冗余,不仅造成人力、物力和财力的浪费,还会因频繁停机维修而影响装备的正常运行,最终影响雷达装备整机的作战效能。维修时机交叉示意图如图 1 所示。

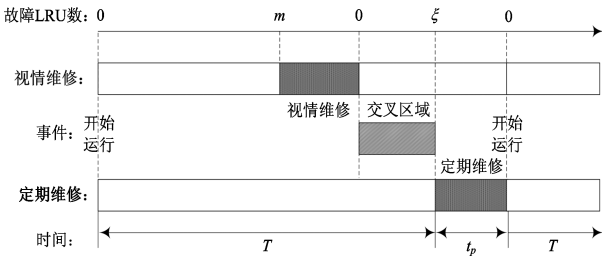


图 1 维修时机交叉示意图

所谓 m/T 维修策略是指,当 k/N 系统开始正常工作后,如果在定期维修周期 T 内系统故障 LRU 数 $\xi < m$,则等到 T 时刻对系统故障 LRU 进行定期维修;如果在定期维修周期 T 内任意时刻 t 系统故障 LRU 数 $\xi = m$,则立即进行视情维修,维修完成后开始新的定期维修周期。可见, m/T 维修策略属于预防性维修策略,其通过改变新的维修周期开始时刻消除了维修交叉时间。 m/T 维修策略示意图如图 2 所示。

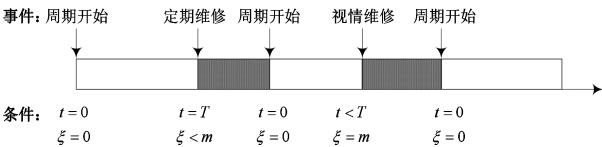


图 2 m/T 维修策略示意图

1.2 k/N 系统维修流程

当 k/N 系统停机后,需要对其进行换件维修。图 3 给出了 k/N 系统的维修流程:当故障 LRU 数 ξ 不大于 LRU 备件数 S 时,LRU 备件充足,直接对系统故障 LRU 进行换件维修;当故障 LRU 数 ξ 大于 LRU 备件数 S 时,LRU 备件不足,需要等待 $\xi - S$ 个故障 LRU 修复再对系统进行换件维修。

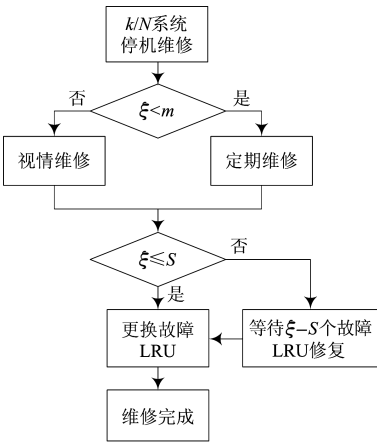


图 3 k/N 系统维修流程

1.3 关键性假设

根据大型相控阵雷达天线阵面实际维修保障特点,建立模型须作如下关键性假设:

- 1) LRU 的故障率服从参数为 λ 的指数分布,修复率服从参数为 μ 的指数分布;
- 2) 系统停机后对其进行完全维修,即更换所有故障 LRU;
- 3) 故障 LRU 修复如新,无报废;
- 4) 维修设备是完好不坏的,可以连续作业,不会出现故障而影响维修进程。

2 备件优化配置模型构建

2.1 m/T 维修策略分析

m/T 维修策略属于定数、定时混合截尾实验,系统的工作周期服从 0-1 分布,因此需要首先求确定数、定时寿命各自出现的概率。

由指数分布规律可知, k/N 系统在任意时间 t 内发生故障的 LRU 数 ξ 的概率为

$$P(\xi = j) = C_N^j (r(t))^{N-j} (1 - r(t))^j = C_N^j e^{-(N-j)\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^j \quad (1)$$

式中, $r(t) = e^{-\lambda t}$ 表示每个 LRU 的可靠度函数。

则 k/N 系统在能工作到定期维修阈值 T 的条件下,发生故障的 LRU 数 ξ' 的概率为

$$P(\xi' = j) = \frac{P(\xi = j)}{\sum_{h=0}^m P(\xi = h)} = \frac{C_N^j e^{-(N-j)\lambda T} (1 - e^{-\lambda T})^j}{\sum_{h=0}^m C_N^h e^{-(N-h)\lambda T} (1 - e^{-\lambda T})^h} \quad (2)$$

从而得到系统正常工作时间为 T 的概率,即 m/T 维修策略下,系统进行定期维修的概率为

$$\eta = P(\xi' < m) = 1 - P(\xi' = m) = 1 - \frac{C_N^m e^{-(N-m)\lambda T} (1 - e^{-\lambda T})^m}{\sum_{h=0}^m C_N^h e^{-(N-h)\lambda T} (1 - e^{-\lambda T})^h} \quad (3)$$

显然,系统进行视情维修的概率为 $1 - \eta$ 。

另外,系统平均无故障间隔时间为

$$MTBF = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{1}{(N-i)\lambda} \quad (4)$$

2.2 使用可用度模型

根据 GJB 1909A—2009^[10] 定义,使用可用度 (A_0) 是与系统能工作时间和不能工作时间有关的

一种可用性参数。对于连续工作的可修复系统,平均能工作时间和平均不能工作时间分别是能工作时间和不能工作时间的数学期望。则 k/N 系统的使用可用度 A_0 计算公式如下:

$$A_0 = \frac{E(T_0)}{E(T_0) + E(T_{DW})} = \frac{E(T_0)}{E(T_0) + E(T_s) + E(T_r)} \quad (5)$$

式中, $E(T_0)$ 为 k/N 系统正常工作时间期望, $E(T_{DW})$ 为 k/N 系统故障维修时间期望, $E(T_s)$ 为 LRU 备件更换时间期望, $E(T_r)$ 为等待故障 LRU 修复时间期望。

2.2.1 $E(T_0)$ 计算

k/N 系统工作到 t 时刻时恰好发生 ϵ 个 LRU 故障的概率为

$$p(t, \epsilon) = C_N^{\epsilon-1} (r(t))^{N-\epsilon} (1 - r(t))^{\epsilon-1} f(t) = C_N^{\epsilon-1} (e^{-\lambda t})^{N-\epsilon} (1 - e^{-\lambda t})^{\epsilon-1} \lambda e^{-\lambda t} = C_N^{\epsilon-1} \lambda e^{-(N-\epsilon+1)\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{\epsilon-1} \quad (6)$$

式中, $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ 表示 LRU 的故障密度函数。

可以得到在 $t \leq T$ 条件下 t 的条件期望,即 m/T 维修策略下,系统进行视情维修时的正常工作时间期望为

$$E(t | t \leq T) = \frac{\int_0^T t p(t, \epsilon) dt}{\int_0^T p(t, \epsilon) dt} \quad (7)$$

综上,可以得出 m/T 维修策略下 k/N 系统的正常工作时间期望为

$$E(T_0) = T \cdot \eta + E(t | t \leq T) \cdot (1 - \eta) \quad (8)$$

2.2.2 $E(T_s)$ 计算

当进行视情维修时,每次换件维修的故障 LRU 数为定值 m ,得到视情维修时系统 LRU 备件更换时间为

$$E(T_{s1}) = t_{s0} + m \cdot t_s \quad (9)$$

式中: t_{s0} 为更换故障 LRU 所需的准备时间,例如更换相控阵雷达天线阵面的 T/R 组件时准备维修工具和架设天线维修架所需时间; t_s 为每个故障 LRU 的平均更换时间。

当进行定期维修时,每次换件维修的故障 LRU 为变量,此处取其期望值 m' ,得到定期维修时系统 LRU 备件更换时间为

$$E(T_{s2}) = t_{s0} + m' \cdot t_s \quad (10)$$

$$m' = \sum_{j=0}^m j \cdot P(\xi' = j) \quad (11)$$

因此,备件更换时间期望为

$$E(T_s)=E(T_{s1}) \cdot (1-\eta)+E(T_{s2}) \cdot \eta \tag{12}$$

2.2.3 $E(T_r)$ 计算

假设有 c 组维修设备对故障 LRU 进行维修,则修复 x 个故障单元的期望时间为

$$E(T_r|x)=\begin{cases} \sum_{h=0}^{x-1} \frac{1}{(x-h)\mu}, & x < c \\ \frac{x-c}{c\mu} + \sum_{h=0}^{c-1} \frac{1}{(c-h)\mu}, & x \geq c \end{cases} \tag{13}$$

视情维修时等待故障单元修复时间期望为

$$E(T_{r1})=\begin{cases} 0, & m \leq S \\ E(T_r|m-S), & m > S \end{cases} \tag{14}$$

定期维修时等待故障单元修复时间期望为

$$E(T_{r2})=\begin{cases} 0, & m' \leq S \\ E(T_r|m'-S), & m' > S \end{cases} \tag{15}$$

因此,等待故障单元修复时间期望为

$$E(T_r)=E(T_{r1}) \cdot (1-\eta)+E(T_{r2}) \cdot \eta \tag{16}$$

2.3 备件优化配置模型

以系统使用可用度为约束条件,以 LRU 备件配置费用最小为优化目标,建立大型相控阵雷达天线阵面备件优化模型:

$$\begin{cases} \min & C=r \cdot S \\ \text{s. t.} & A_o \geq A_{o\text{accept}} \end{cases} \tag{17}$$

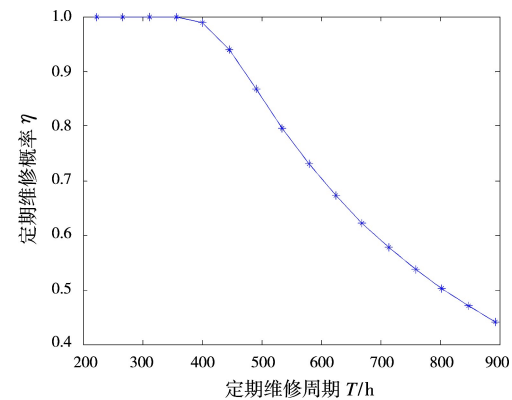
式中, r 为每个 LRU 备件费用, $A_{o\text{accept}}$ 为最低可接受的系统使用可用度。

3 算例分析

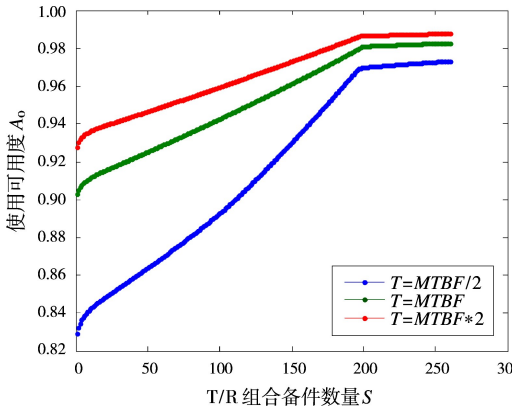
设某型相控阵雷达天线阵面由 1 000 个故障率服从 $\lambda = 0.000\ 5$ 的指数分布,且相互独立的 T/R 组件组成,当至少有 800 个 T/R 组件正常工作时该天线正常运行,即该天线可以看作一个 800/1 000 的 k/N 系统。该型雷达天线阵面采用 m/T 维修策略,视情维修阈值为 $m=N-k$;系统停机后,更换故障 LRU 所需的准备时间 $t_{s0}=2\ \text{h}$,每个故障 LRU 的平均更换时间 $t_s=0.1\ \text{h}$;LRU 初始备件配备数量为 S ,其单价 $r=2.5$ 万元;修理所配备有 $c=14$ 组维修设备,其单价为 50 万元,每组维修设备对故障 LRU 的修复率服从 $\mu=0.35$ 的指数分布。为满足任务要求,系统使用可用度不低于 $A_{o\text{accept}}=0.95$ 。

定期维修阈值 T 影响着系统实施视情维修还

是定期维修的概率。以系统平均无故障间隔时间 MTBF 为参考,设定 T 取值范围为 $[0.5MTBF, 2MTBF]$,步进为 $0.1MTBF$,得到定期维修概率 η 随定期维修阈值 T 的变化情况如图 4(a) 所示;图 4(b) 给出了不同 T 的系统使用可用度 A 。随 T/R 组件备件数量的变化情况。从图 4 可以看出,随着定期维修阈值的增大,定期维修的概率变小,系统使用可用度变大。原因是,当定期维修阈值较小时,系统在 T 内 T/R 组件故障数达到 m 的概率很小,因此实施视情维修的概率很小,定期维修的概率很大,而定期维修阈值较小会导致定期维修频繁,增加停机维修时间,因此系统使用可用度较小。



(a) 定期维修概率 η



(b) 系统使用可用度 A_o

图 4 定期维修阈值 T 的影响

根据系统使用可用度要求,分别计算得出 4 种不同方案的 T/R 组件备件优化结果,如表 1 所示。其中,方案 1 表示采用 m/T 维修策略, $m=N-k$, $T=MTBF$, $c=14$ 组;方案 2 表示采用定期维修策略, $T=MTBF$, $c=14$ 组;方案 3 表示采用视情维修策略, $m=N-k$, $c=14$ 组;方案 4 表示采用

m/T 维修策略, $m = N - k$, $T = MTBF$, $c = 11$ 组。由表 1 可以看出, 方案 1 比方案 2 的 T/R 组件备件配置费用节省了 60 万元, 降低约 16.55% 的经费开支; 比方案 3 节省了 122.5 万元, 降低约 28.82% 的经费开支, 可见本文的 m/T 维修策略较定期维修策略、视情维修策略更具有明显优势。另外, 通过对比分析方案 1 和方案 4 可以看出, 当降低维修设备数量时, 虽然备件配置费用增加了 50 万元, 但配置备件和维修设备的总费用却减少了 100 万元, 可见, 综合考虑维修设备和备件进行维修资源的优化更有意义, 这也是下一步将要研究的内容。

表 1 4 种方案仿真结果对比

方案	维修设备 数量/组	备件 数量/个	系统使用 可用度	备件配置 费用/万元	维修资源配置 费用/万元
1	14	121	0.950 3	302.5	1 002.5
2	14	145	0.950 2	362.5	1 062.5
3	14	170	0.950 2	425.0	1 125.0
4	11	141	0.950 3	352.5	902.5

4 结束语

对大型相控阵雷达天线阵面进行预防性维修时, 视情维修和定期维修往往会因为维修时机交叉而产生维修冗余的问题, 为此, 本文将视情维修和定期维修相结合, 提出了一种基于 m/T 维修策略的大型相控阵雷达天线阵面备件优化配置模型。首先, 在对 m/T 维修策略分析基础上, 建立了系统的使用可用度模型, 并利用 0-1 分布对使用可用度进行了求解计算; 然后, 以使用可用度为约束条件、以备件配置费用最小为优化目标, 对 LRU 备件进行了优化研究, 最后, 通过实例验证了该模型的有效性, 为科学配置大型相控阵雷达天线阵面备件提供了参考依据。另外, 由于维修设备能够影响故障单元的维修进度, 进而影响系统的可用度, 因此, 综合考虑维修设备和备件进行维修资源的优化将是下一步研究的内容。

参考文献:

[1] 卢雷, 杨江平. $k/N(G)$ 结构系统初始备件配制方法[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 773-779.

[2] 徐飞, 杨士英, 魏祥生, 等. 基于改进灰色预测模型的雷达备件消耗预测[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(6): 609-614.
XU Fei, YANG Shiyong, WEI Xiangsheng, et al. The Forecast of Radar Spare Part Consumption Based on the Improved Gray Forecasting Model [J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(6): 609-614. (in Chinese)

[3] DE SMIDT-DESTOMBES K S, VAN DER HEIJDEN M C, VAN HARTEN A. On the Availability of a k -out-of- N System Given Limited Spares and Repair Capacity Under a Condition Based Maintenance Strategy [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 83(3): 287-300.

[4] 张涛, 张建军, 郭波. 基于使用可用度的 k/N 系统 (m, N_G) 维修策略分析[J]. 宇航学报, 2009, 30(1): 395-401.

[5] 高崎, 刘平, 黄照协, 等. 特定 m 维修策略更新过程系统可用度模型[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(7): 124-127.

[6] KRISHNAMOORTHY A, REKHA A. k -out-of- n System with Repair: T -Policy[J]. Korean Journal of Computational and Applied Mathematics, 2001, 8(1): 199-212.

[7] 李浩, 张耀辉, 李勇, 等. 基于费用-效能分析的装甲装备定时维修方案优化[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(8): 131-135.

[8] 贾秀芹, 刘瑞元. k/n 系统在 (n, L, r, r) 维修策略下的可用度[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(9): 17-21.

[9] 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.

[10] 装备可靠性维修性保障性要求论证: GJB 1909A—2009[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部军标出版发行部, 2009.

作者简介:



常春贺 男, 1982 年出生, 河南上蔡人, 博士, 讲师, 现为空军预警学院黄陂士官学校训练部参谋、讲师, 主要研究方向为教学训练管理、预警装备管理与维修保障技术。
E-mail: cch1725@163.com