

Optimization Configuration of Weapon System Spare Parts Based on the Steady-State Availability

Zheng Zhou

32028 troops, Xichang Sichuan
Email: xchiang52851@126.com

Received: Jun. 15th, 2018; accepted: Jul. 10th, 2018; published: Jul. 17th, 2018

Abstract

Proceeding from studying the steady-state availability of weapon system and regarding it as the quota to evaluate spare parts of weapon system, this paper proposes the configuration model of repairable spare parts based on steady-state availability under the restriction of expenses. The model takes the steady state availability of weapon system as center and considers the delay time of maintenance of spare parts in weapon system so that the demand analysis of repairable parts will be more consistent with the real service condition of weapon system. The model is used to calculate spare parts under the assumption of a certain task according to management data of spare parts of a certain new weapon system, and the calculation results can be used as assurance criteria for spare parts under the assumption of a certain task that could be a reference when performing similar tasks.

Keywords

Weapon System, The Steady-State Availability, Spare Parts Configuration

基于稳态可用度的武器系统备件优化配置

周 正

32028部队, 四川 西昌
Email: xchiang52851@126.com

收稿日期: 2018年6月15日; 录用日期: 2018年7月10日; 发布日期: 2018年7月17日

摘 要

本文从研究武器系统的稳态可用度出发, 以此作为评价武器系统备件配置的指标, 结合经费约束, 提出

了基于稳态可用度的可修件备件配置模型。该模型以武器系统的稳态可用度为中心，考虑了武器系统备件维修的延迟时间，使得可修件需求分析更符合武器系统真实的使用状况。利用该模型，依据某新型武器系统的备件管理数据，进行了某任务假定下的备件配置计算，该结果可以作为某任务假定下的备件保障标准，在遂行相似任务时可以作为参考。

关键词

武器系统，稳态可用度，备件配置

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着高新武器装备的快速发展，系统级武器的日渐成熟，装备使用维护的备件器材数量种类也日趋复杂。在装备维修工作中，为缩短修理的停歇时间，根据设备的损耗规律和零件使用寿命，将设备中容易磨损的各种零部件，事先加工、采购和储备好。这些事先按一定数量储备的零部件，称为备件。一般地，武器装备的备件分为可修复件和消耗件。其中，可修复件价格昂贵，约占备件总费用的 80%，可修复件备件的保障经费与器材需求的矛盾显而易见[1] [2] [3]。如何以有限的经费，实施备件优化配置，满足武器系统使用、修理需求，最大限度提高装备完好率，显得至关重要。目前普遍使用的可修复件需求分析方法主要以器材消耗和期望缺货数为中心，经验性偏多，与武器装备的真实使用状况差距较大[1] [2] [3]。

本文根据现有研究成果，提出了基于武器系统稳态可用度的可修复件需求分析模型，该模型充分考虑了武器系统可修复件在维修过程中的延误时间，使得可修复件需求分析更符合武器系统真实的使用状况。利用该模型，依据某新型武器装备的备件管理数据，进行了某任务假定下的备件需求计算与分析。

2. 基于稳态可用度的武器系统备件模型

2.1. 武器系统稳态可用度

可用度是衡量部队武器装备可靠性、维修性的综合参数。它是指武器系统处于可使用状态的概率，是武器装备可以正常工作的定量指标。通常用 $A(t)$ 表示任一时刻 t 系统处在正常状态的概率，可用度的基本数学表达式为：

$$A(t) = \frac{\text{能工作时间}}{\text{能工作时间} + \text{不能工作时间}}$$

若 $\lim A(t) = A$ 存在，则称 A 为稳态可用度。它反映了武器系统在长期运行的情况下，处在正常状态的概率。

2.2. 模型假设

我们可以对武器系统可修复件的使用过程概括如下：一个新的可修复件投入使用，随着使用时间不断增加，部件状态会不断劣化，发生故障则对可修复件进行维修。受限于维修技术、维修工水平、部分维修等情况，会导致不完全维修，即无法令该可修复件恢复至全新状态。由于上次的维修是不完全维修，导致其没有恢复至全新的状态，所以工作时间较之第一次以一定速率缩短，而故障后维修时间以一定速

率增长。不完全维修后部件继续投入运行，某时刻又发生故障，再次进行不完全维修。如此下去，维修越来越频繁，维修时间也越来越多，直到最终部件报废，这一过程称为准更新过程[4]。

综上所述，我们进行如下假设：

假设 1：可修复件的失效率随使用时间增加，而可靠度随使用时间下降。

假设 2：可修复件投入使用时是全新的，从开始使用至部件报废的这段时间称为一个使用全寿命周期。

假设 3：可修复件只能进行不完全维修，即维修后无法恢复到最初状态，且每次故障维修、延误的时间不可忽略。

基于以上假设，

$$A(t) = \frac{\text{能工作时间}}{\text{能工作时间} + \text{不能工作时间}} = \frac{\text{能工作时间总和}}{\text{能工作时间总和} + \text{故障维修时间总和} + \text{故障延误时间总和}}$$

2.3. 模型分析与建模

在武器系统运行时间 t 内，系统部件可能已经更换过多次，即在 t 时间内部件有多个使用全寿命周期。假设某可修复件在一个使用全寿命周期内最多进行 $(m-1)$ 次不完全维修，当第 m 次故障发生时就对部件进行更换。

由上述可知，一个使用全寿命周期内有 m 个运行周期，每个运行周期包括工作时间和故障维修时间。若用 μ_j 表示部件在第 j 个运行周期内的工作时间； η_j 表示部件在第 j 个运行周期内的故障维修时间； δ 表示除维修以外所有为保证备件供应而出现的各种延误时间之和； μ 表示部件在一个使用全寿命周期内的工作时间总和； η 表示部件在一个使用全寿命周期内的故障维修时间总和。设在准更新过程描述的模型中， α 表示部件每个运行周期内工作时间的递减尺度因子， $0 < \alpha < 1$ ； β 表示部件每个运行周期内故障维修时间的递增尺度因子， $\beta > 1$ ，则有：

$$A(t) = \frac{\mu}{\mu + \eta + \delta} = \left[1 + \frac{\eta}{\mu} + \frac{\delta}{\mu} \right]^{-1} \quad (1)$$

其中， $\mu = \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_m$ ， $\eta = \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_m$ ， $1 \leq j \leq m-1$ 且 $m-1 \geq 1$ 。

又因为 μ_j ， η_j 是符合准更新过程的单调时间序列，即

$$\begin{cases} \mu_{j+1} = \beta \mu_j \\ \eta_{j+1} = \alpha \eta_j \end{cases} \quad (2)$$

其中 $1 \leq j \leq m-1$ 且 $m-1 \geq 1$ 。

所以有，

$$\begin{cases} \mu = \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_m = \frac{\mu_1(1-\alpha^m)}{1-\alpha} \\ \eta = \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_m = \frac{\eta_1(1-\beta^m)}{1-\beta} \end{cases} \quad (3)$$

其中， $1 \leq j \leq m-1$ 且 $m-1 \geq 1$ 。

工程上常用的 δ 的表达式为：

$$\delta = (1-P)T_{SR}$$

一般情况下，备件器材寿命分布为指数分布类型，即

$$P = \sum_{i=0}^n \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}$$

其中, $i=1,2,\dots,n$ 为所需备件数量; λ 为所讨论器材的需求率(即); T_{SR} 为所讨论器材的平均供应反应时间(即备件供应的延误时间的平均值); t 为武器系统工作时间。

将上述结果带入(1)式, 得

$$A(t) = \left[1 + \frac{\eta_1(1-\alpha)(1-\beta^m)}{\mu_1(1-\alpha^m)(1-\beta)} + \frac{(1-\alpha) \left(1 - \sum_{i=0}^n \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \right) T_{SR}}{\mu_1(1-\alpha^m)} \right]^{-1} \quad (4)$$

一般情况下, 武器系统含有多项器材, 这里假设所需备件种类为 k 项, 若从军事性角度考虑, 兼顾经济性, 则可以武器系统的稳态可用度为目标函数, 以经济性指标为约束条件来构造计算模型:

$$\begin{cases} \max(A_0) = \prod_{j=1}^k A_j(t) \\ \text{s.t. } N \times C^T \leq E \end{cases} \quad (5)$$

式中: A_0 为武器系统的期望稳定可用度; E 为备件投资的总费用; $C^T = (c_1, c_2, \dots, c_k)^T$ 为 k 项器材备件的价格矩阵; $N = (n_1, n_2, \dots, n_k)$ 为 k 项器材备件的补充库存量。

同时, 系统单位时间的近似故障次数可以表示为: 总的故障次数除以总的运行时间, 即

$$\tilde{N} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\tilde{N}(t)}{t}$$

进一步可得,

$$\tilde{N} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\tilde{N}(t)}{t} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{N(U(t))}{\frac{U(t)}{t}} \stackrel{a.s.}{=} \frac{m}{\mu} \left[1 + \frac{\eta_1(1-\alpha)(1-\beta^m)}{\mu_1(1-\alpha^m)(1-\beta)} \right]^{-1} \quad (6)$$

3. 某任务需求分析与评价

为应对突发的某次 XX 演训作战任务备件需求, 需要进行合理的备件预测。因此本文利用前述稳态可用度备件预测模型, 按照某新型武器系统备件管理指标, 结合适当的经费约束即我军备件保障实际, 制定符合国军情的备件保障方案, 并进行分析与评价。

3.1. 某作战任务设定

为满足某作战任务需求, 由装备某新型武器装备的作战单元实施作战任务。为应对突发事件的需求, 要求作战单元在作战任务期内的稳态可用度尽可能的高, 达到 99.5%以上, 而某子系统的备件经费限定在 10,000 元以内。

现结合近年来该型武器系统的备件使用数据, 制定备件保障方案。考虑该子系统的可修复部件数量为两个, 即 $k=2$ 。部件的相关参数见表 1。

该子系统的其他相关参数见表 2。

设定 $m=6$, 即该系统在一个使用全寿命内进行 5 次不完全维修, 当其第 6 次发生故障时, 就对其进行更换。

Table 1. Component related parameter
表 1. 部件相关参数

序号	部件	项目	数值	单位
1	部件 1	单价 c_1	500	元
2	部件 1	需求率 λ_1	0.3%	
3	部件 1	平均供应反应时间 T_{SR1}	7×24	小时
4	部件 2	单价 c_2	600	元
5	部件 2	需求率 λ_2	0.4%	
6	部件 2	平均供应反应时间 T_{SR2}	10×24	小时

Table 2. Subsystem related parameter
表 2. 子系统相关参数

首次工作运行 时间 μ_1 (小时)	首次故障维修 时间 η_1 (小时)	梯度递减 因子 α	梯度递增 因子 β	工作时间 T (小时)	总费用 E (元)
1000	1	0.90	1.05	1000	10,000

将上述参数带入(5)式, 通过 MATLAB 编程计算可得最优解: $n_1 = 8$, $n_2 = 10$, 此时该子系统的稳态可用度最大, $A_0 = 0.9968$, 满足任务需要。

同时可计算得 $\tilde{N} = \frac{m}{\mu} A(t) = 0.001276$ 。

3.2. 结果分析

计算结果显示, 当该子系统的经费限定在 10,000 元以内时, 部件 1 采购 8 个备件, 部件 2 采购 10 个备件, 此时该子系统的稳态可用度最大, $A_0 = 99.68\%$ 。

$\tilde{N} = \frac{m}{\mu} A(t) = 0.001276$ 表示该系统单位时间内故障次数为 0.001276 次, 形象的说就是当部件工作 1000 小时时, 可能会发生 1.276 次故障, 换个角度, 即该系统在工作到 783 个小时后可能会发生一次故障。

3.3. 结果评价

事实上不同的器材寿命分布类型也不尽相同, 并不一定遵从指数分布。常用的其他寿命分布类型有正态分布、 Γ 分布、威布尔分布等。这些分布不具备指数分布的特殊性质, 该类系统的稳态可用度备件问题还有待进一步研究。文献[5]中针对单项器材的不同寿命分布进行了研究, 该工作对其他寿命分布形式备件稳态可用度研究具有借鉴意义。

在进行备件配置决策时, 应将多项备件作为一个整体进行系统的优化, 利用本文的稳态可用度模型进行求解。在武器系统上, 不同的备件, 其使用的重要程度、执行具体任务、管理筹措的难易不同, 实际的备件管理也不尽相同。若能对武器系统备件, 根据其使用、维护和筹措等决定的重要程度进行分级, 对重要程度高的根据其寿命分布进行单项计算, 采取单项和系统计算相结合的方法将更为合理。

4. 结束语

本文从研究武器系统稳态可用度出发, 综合考虑影响武器系统使用和故障维修时间等各种情况, 结合经费约束, 提出了基于稳态可用度的可修复件备件管理预测模型。最后, 进行了某作战任务假定下的

备件优化配置计算, 该仿真结果可以作为某任务假定下的备件保障方案, 在遂行相似任务时可以提供参考。仿真结果对故障的发生频率及时刻进行了预测, 为装备维修提供一定的依据。

致 谢

值此论文付梓之际, 谨向我的爱人——陈诚女士, 表示由衷地感谢和深深的爱意。她在生活中承担了更多的家庭责任, 使我有精力潜心于工作的追求和兴趣的钻研。

参考文献

- [1] Hood, W.C. (1987) A Handbook of Supply Inventory Models. AD-A187 269.
- [2] Brooks, R.B.S. and Lu, C.J.Y. (1969) United States Air Force Project Rand. AD 692703.
- [3] 何亚群, 谭学峰, 金福禄. 基于可用度的飞机可修件需求分析[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(6): 848 -849.
- [4] Wang, H. and Pham, H. (1996) A Quasi-Renewal Process and Its Applications in Imperfect Maintenance. *International Journal of Systems Science*, 27, 1055-1062. <https://doi.org/10.1080/00207729608929311>
- [5] 金家善, 陈砚桥. 舰艇备件需求计算模型研究报告[R]. HG-ILS-REP-06, 2004.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-677X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: dsc@hanspub.org