

doi: 10.7690/bgzdh.2020.09.003

## 舰载机着舰引导装备体系系统级备件保障

柴志君, 欧阳中辉

(海军航空大学岸防兵学院研究生大队, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对舰载机着舰引导装备体系中随舰备件存在补给周期长、难度大的问题, 对舰载机着舰备品备件保障进行研究。详细阐述备件保障关键指标及计算方法, 引入  $k/N(G)$  表决关系把复杂系统等效分解为串并联结构, 构建关键性指标在不同种备件寿命分布类型下的预测模型, 分析备件保障概率、使用可用度以及利用率等随着备件数量的变化规律, 利用解析计算方法实现预先评估备件方案, 并通过算例对算法进行验证。分析结果表明: 该方法优化了备件方案, 提高任务完成度与经济性, 同时为预先制定合理的备件方案提供参考, 具有较高的应用价值。

**关键词:** 系统级备件保障; 串联并联; 备件保障概率; 使用可用度; 利用率

**中图分类号:** TJ85 **文献标志码:** A

## System Level Spare Part Support of Ship Borne Aircraft Landing Guidance Equipment

Chai Zhijun, Ouyang Zhonghui

(Brigade of Postgraduate, College of Shore Defense, Navy Aviation University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In view of the problem of long replenishment period and difficulty in ship borne aircraft landing guidance equipment system, this paper studies the support of ship borne aircraft landing spare parts. Describe the key indexes and calculation method of spare parts in detail, introduce  $k/N(G)$  vote relationship to decompose complex system into series-parallel structure, establish the forecast model of critical index under different types of spare parts life distribution. The spare parts quantity makes influence on spare parts support probability, operational availability, and utilization ratio, analyze the variation principle among them, use analytical calculation method for evaluation of spare parts plan in advance, and verify the method by example. The analysis results show that the method can optimize the spare parts program, improve the completion degree and economy of the task, and provide reference for making reasonable spare parts program in advance. The method has high application value.

**Keywords:** system level spares support; series-parallel; spare part support probability; operational availability; utilization ratio

### 0 引言

舰载机着舰引导装备体系在确保航母战斗力生成和保持中起着关键性的作用, 其状态的稳定性及可用度直接影响舰载机能否顺利着舰, 从而决定出动架次率的高低。备品备件是维修保障中的重要物质资源, 随舰备品备件存在补给周期长、难度大的问题; 因此, 必须对随舰备品备件保障进行优化。

针对舰载机着舰引导系统保障当中备件优化问题, 国内外学者进行了研究: 针对非稳态两级单层备件可修复系统提出 Dyna-METRIC 模型<sup>[1]</sup>; 针对非稳态备件保障系统, 建立  $k/N$  冗余装备结构、站点维修能力有限条件下的备件配置优化系统, 对 Dyna-METRIC 模型进行优化<sup>[2-3]</sup>; 建立以可用度为目标, 备件存储空间为约束的分阶段边际优化模型的串联拼修对策下  $k-N(G)$  结构系统可用度建

模<sup>[4-6]</sup>; 建立任务期间不计运输和修理时间, 把不完全修复件视为报废件的多层级备件库存模型<sup>[7-8]</sup>。

在上述研究的基础上, 笔者结合航母舰载机着舰引导体系自身特点, 通过对备件保障关键指标物理解析、指标间相互内在联系分析, 提出一种对系统级不修复备件可用度、备件保障概率以及备件利用率的近似评估模型, 通过着舰回收引导系统保障中备件串并联后, 对上述 3 种指标进行评估, 构建舰载机着舰引导装备体系保障当中系统级备件保障模型, 并进行仿真。

### 1 术语定义及条件假设

#### 1.1 术语定义

**备件:** 用于装备及其主要成品进行维修所需的零部件、组件元器件等统称。根据备件的修复性可

收稿日期: 2020-05-19; 修回日期: 2020-06-29

作者简介: 柴志君(1989—), 男, 山东人, 硕士, 从事军用仿真技术研究。E-mail: 275131218@qq.com。

将备件分为可修复备件和不修复备件。

可修复备件：出现故障或损坏后，采用可行的技术手段使其可恢复原有功能的备件。

不修复备件：出现故障或损坏后，无法用可行的技术手段使其恢复原有功能的备件。

修复概率  $P_r$ ：修复一个故障备件的概率。

### 1.2 条件假设

由可修复备件定义可知：修复概率  $P_r$  取值范围为[0,1]；不修复备件的修复概率  $P_r$  值为 0。可修复备件存在因修复不成功而导致报废的可能性，因而其本质非常接近不修复备件；通过舰船实地调研，舰载机着舰引导装备体系备件损坏后，即使修复也难以保证其可靠性，所以在维修任务中，舰员级维修备件通常只换不修。基于上述原因，把舰载机着舰引导装备体系备件统一简化为不修复备件。

在进行许多备件保障指标的计算时，需要考虑单元级备件寿命情况。备件寿命会因类型、个体差异而难以对每个备件的精确寿命进行估计，所以在此只讨论备件的平均寿命。

## 2 备件保障关键指标计算

备件保障关键指标主要由备件保障概率、备件使用可用度、备件利用率构成。

### 2.1 备件保障概率

GJB4335<sup>[9]</sup>规定：备件保障概率指在规定的时间内，需要备件时不缺备件的概率，也称为备件满足率(fill rate, FR)。

#### 1) 指数型备件。

寿命服从指数分布的备件简称为指数型备件，电子件的寿命分布一般服从指数分布规律。指数型备件的备件保障概率计算公式为：

$$P = \sum_{j=0}^S \frac{(N\lambda t)^j}{j!} e^{-N\lambda t} \quad (1)$$

式中： $S$ 为备件数量； $N$ 为备件的装机数； $t$ 为装备的保障时间；该备件的寿命服从指数分布，记为  $\exp(\lambda)$ ， $\lambda$  为失效率，是描述指数分布的参数。

#### 2) 正态型备件。

寿命服从正态分布的备件简称为正态型备件，机械件的寿命分布一般服从正态分布规律。

对于方差为  $\delta^2$ 、均值为  $\mu$  的随机变量  $T$ ，若其概率密度函数为：

$$f(t) = 1/(\delta\sqrt{2\pi})e^{-(t-\mu)^2/2\delta^2} \quad (2)$$

则称  $T$  服从正态分布，记为  $T \sim N(\mu, \delta^2)$ 。

在 GJB4335 中，若备件寿命服从正态分布  $N(E, \delta^2)$ ，计算其需求量的基本公式为：

$$S = t/E + \mu_p \sqrt{\delta^2 t/E^3} \quad (3)$$

式中： $t$ 为保障时间； $E$ 为备件寿命均值； $\delta$ 为标准差； $\mu_p$ 为正态分布分位数。常用正态分布分位数如表 1 所示。

表 1 常用的正态分布分位数

$P$	0.8	0.9	0.95	0.99
$\mu_p$	0.84	1.28	1.65	2.33

由数学理论得出正态分布的卷积可加性<sup>[10]</sup>：设随机变量  $X \sim N(\mu_1, \delta_1^2)$ ， $Y \sim N(\mu_2, \delta_2^2)$ ，且  $X$  与  $Y$  相互独立，则  $Z = X + Y \sim N(\mu_1 + \mu_2, \delta_1^2 + \delta_2^2)$ 。所以，当备件数量为  $S$  时，整个任务工作时间  $T$  服从  $N((1+S)\mu, (1+S)\delta^2)$  的正态分布，备件保障概率可由下式求得：

$$P = P(T > t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi(1+S)}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t - \mu\sqrt{1+S})^2}{2(1+S)\sigma^2}\right) dx \quad (4)$$

#### 3) 威布尔型备件。

寿命服从威布尔分布的备件简称为威布尔型备件。威布尔型备件模型是计算复杂程度很高的多重无穷级数。文献[11]给出了一种通过 Monte-Carlo 方法求得威布尔型备件保障概率的计算公式。

寿命服从威布尔分布  $G(t) = 1 - \exp(-\alpha t^\beta)$  的备件，平均寿命  $\mu = (1/\alpha^{1/\beta})\Gamma(1+1/\beta)$ ，则分布函数为

$$F(t) = 1 - \exp(-t/\mu) \quad (5)$$

式中： $\alpha$ 为尺度参数； $t$ 为随机变量； $\beta$ 为形状参数； $\Gamma$ 分布见 IEC61649。

由数学归纳法可证， $G^{(k)} \leq F^{(k)}(t)$  ( $k$ 为任意正整数)。从而得到

$$P(N(T) \leq S) = 1 - P\{\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_{n+1} < T\} = 1 - G^{S+1}(T) \quad (6)$$

式中： $S$ 为备件个数； $N(T)$ 为在时间(0,  $T$ )内备件的故障次数。

### 2.2 使用可用度

从战备完好性的角度评价备件保障效果，一般使用可用度这个指标，有时也称为可用度，其本质是备件累计正常工作时间与任务时间的比值。在 GJB4355 中，在综合考虑预防性维修备件和修复性备件的影响，连续工作时的使用可用度可用

$A_0 = (T_T - T_{TP}) / T_T \left( T_{BF} / (T_{BF} + \overline{M_{ct}} + T_{LD}) \right)$  表达。其中：

$A_0$  为使用可用度； $T_T$  为年最大可使用时间； $T_{TP}$  为年预防性维修总时间； $T_{BF}$  为平均无故障工作时间； $\overline{M_{ct}}$  为平均修理时间； $T_{LD}$  为平均保障延迟时间。

若不考虑预防性维修，连续工作时的备件可用度可表示为：

$$A_0 = T_{BF} / (T_{BF} + \overline{M_{ct}} + T_{LD})。 \quad (7)$$

若用  $T_\omega$  表示保障时间， $\bar{T}$  表示备件平均累计工作时间，则对于不修复备件  $c$ ，其备件使用可用度的理论解析计算式为：

$$A_0 = \bar{T} / T_\omega。 \quad (8)$$

设装备某种备件有  $S$  个，装机数为 1，记  $n+1$  个备件寿命分别为  $t_1, t_2, \dots, t_{n+1}$ 。令  $t_0 = t_1 + t_2 + \dots + t_{n+1} = \sum_{i=1}^{n+1} t_i$ ， $f_0(t)$  和  $R_0(t)$  分别为  $t_0$  的概率密度函数和可靠度，对  $f(t)$  进行卷积计算可得到  $f_0(t)$ 。平均寿命发生故障前平均时间 (mean time to failure, MTTF) 的计算公式为

$$\text{MTTF} = \int_0^\infty R_0(t) dt。 \quad (9)$$

可靠度  $R_0(t)$  在可靠性理论中的定义为：备件在规定时间和条件内，完成既定功能的概率。其数学本质与备件保障概率  $P(T > t)$  等价。将  $T_\omega$  设置为积分上限，即可得到备件平均累计工作时间，则有

$$A_0 = \bar{T} / T_\omega = \int_0^{T_\omega} R_0(t) dt / T_\omega = \int_0^{T_\omega} P(T > t) dt / T_\omega。 \quad (10)$$

由上式可以看出，备件使用可用度的物理含义就是平均备件保障概率。

### 2.3 备件利用率

备件利用率是任务中备件消耗数量与初始备件数量之间比例，表达式为

$$P_1 = n_{gm} / n。 \quad (11)$$

式中： $n_{gm}$  为消耗备件数量； $n$  为初始备件数量。

任务中初始备件数量  $n$  即为常量。计算备件利用率关键是计算备件消耗数量  $n_{gm}$  数学期望。假设某故障发生一次消耗某特定备件一个，则平均故障次数等效于备件消耗数量，则该型备件利用率表达式则为

$$P_1 = \min(1, T_w / n\mu)。 \quad (12)$$

式中， $T_w / \mu$  为任务保障时间与单元备件平均寿命  $\mu$  (不同类型备件  $\mu$  取值不同) 的比例，物理含义为任务期间该备件平均故障次数。

## 3 系统级备件保障关键指标计算

对于若干数量、类型的单元结合成可完成某一特定功能的装备而言，该装备可等效成子系统，而装备之间能相互配合完成特定任务，可视为总系统。舰载机着舰引导系统复杂，各备件、装备之间交联关系情况有很多种，但最底层装备、备件关系可用  $k/N(G)$  表决关系表示<sup>[12]</sup>。 $k/N(G)$  表决系统是指某系统由  $N$  个同类型备件组成的，假设至少有  $k$  个备件正常工作，该系统才能正常地工作 ( $1 \leq k \leq N$ )，记为  $k/N(G)$ 。实装中备件的基本关系主要由串联关系、并联关系构成，则  $N/N(G)$  为串联系统， $1/N(G)$  为并联系统。

### 3.1 $N/N(G)$ 串联系统

$N/N(G)$  串联系统工作强度是单个备件的  $N$  倍；而  $k/N(G)$  系统工作强度是单个备件的  $N \sim N-k+1$ ，并非是常数。对于维修串联系统备件，一旦某一备件故障，就会造成整个装备或系统宕机；而对于  $k/N(G)$  系统备件，只要正常工作备件数量不小于  $k$ ，整个装备或系统就无需维修。

1) 由于  $N/N(G)$  串联系统工作强度 (是单个备件  $N$  倍) 比其他  $k/N(G)$  系统备件工作强度 (是单个备件  $N \sim N-k+1$  倍) 要大。在计算系统级备件保障指标时，如要求相同的备件保障概率， $N/N(G)$  系统备件需求量也会比  $k/N(G)$  系统大，但在实际保障中，面对备件数量可能过多或者不足 2 种情况时，会更倾向于前者。计算指标时， $k/N(G)$  系统可采用  $N/N(G)$  串联系统计算模型进行工程近似。对于串联系统备件保障概率，则有

$$P_{\#} = \prod_{i=1}^n P_i, i=1, 2, \dots, n。 \quad (13)$$

式中  $P_i$  为第  $i$  种备件保障概率， $P_i$  计算模型参照 2.1 节。

2) 同理串联系统备件使用可用度  $A_0$  可表示为

$$A_{0\#} = \prod_{i=1}^n A_{0i}, i=1, 2, \dots, n。 \quad (14)$$

式中  $A_{0i}$  为第  $i$  种备件使用可用度。根据可靠度与备件保障概率等价，串联系统可靠度为  $R_0(t) = \prod_{i=1}^n R_{0i}(t), i=1, 2, \dots, n$ ，再依据备件使用可用度物理含义即为平均备件保障概率。对于串联系统备件使用可用度，则有

$$A_{0\#} = \int_0^{T_w} \prod_{i=1}^n P_{\#}(T > t) dt / T_w。 \quad (15)$$

3) 在计算系统级备件利用率时，首先确定初始备件数量  $n$  和系统级备件保障概率  $P_S$ ；在不低于保

障概率  $P_S$  的情况下,参考单元级备件利用率计算模型。在保证备件保障率的前提下计算系统级备件利用率,无差别对待各类型备件。以所有初始备件数量之和为分母,以所有类型备件各自保障概率不低于系统级备件保障概率  $P_S$  所对应的备件最小数之和为分子。二者比值即为本系统备件保障概率,其模型为

$$P_{si} \geq P_s \left. \vphantom{P_{si} \geq P_s} \right\} P_{串} = \frac{\sum_{m=1}^s n_s}{\sum_{j=1}^i n_i} \quad (16)$$

式中:  $P_{Si}$  为第  $i$  种备件保障概率;  $n_i$  为第  $i$  种备件保障概率不低于  $P_S$  所对应的备件最小数量。

### 3.2 1/N(G)并联系统

并联系统只要有 1 个备件正常工作,则该系统可继续运行。并联系统中单元级备件保障概率最高的即可视为系统备件保障概率,则有  $P_{并} = \max(P_1, P_2, \dots, P_n)$

同理单元级备件使用可用度最高的即可视为系统备件使用可用度,则有  $A_{0并} = \max(A_{01}, A_{02}, \dots, A_{0n})$ 。

备件利用率是描述备件消耗情况的指标,在保证系统级备件保障概率不低于规定值的前提下,计算模型参照串联系统。

## 4 算例仿真验证

航母舰载机着舰引导系统主要涉及作战指挥系统以及航空保障系统,其系统下辖多种指挥控制台与着舰回收引导设备,设备备件类型、数量众多。笔者选取部分着舰回收引导系统备件情况分布如图 1 所示。

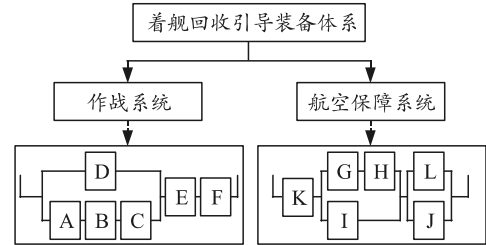


图 1 部分着舰回收引导系统备件情况分布

对舰载机着舰引导系统系统级备件保障,某任务保障时间  $T_w$  为 2 000 h,上述备件可等效为不修复备件,且装机数  $N=1$ 。

由表 2 可知,该体系有机械备件 6 种、电子备件 4 种、机电备件 2 种。对于平均无故障工作时间  $T_g$ 、修复概率  $P_r$  的可修复备件,可将其视作寿命近似  $T_g/(1-P_r)$  的不修复备件。对各类型备件保障概率  $P$ 、使用可用度  $A_0$  和利用率  $P_1$  进行建模仿真。建模过程与仿真流程如图 2,各串并联系统备件参数如表 2 所示。

表 2 部分着舰回收引导备件参数

指标	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
备件类型	机械	机械	电子	机电	机械	电子	电子	机械	电子	机械	机械	机电
寿命分布类型	正态	正态	指数	威布尔	正态	指数	指数	正态	指数	正态	正态	威布尔
备件数量	4	3	6	7	5	7	8	5	4	5	8	7
平均使用寿命/h	450	700	750	550	650	500	300	400	450	700	350	650

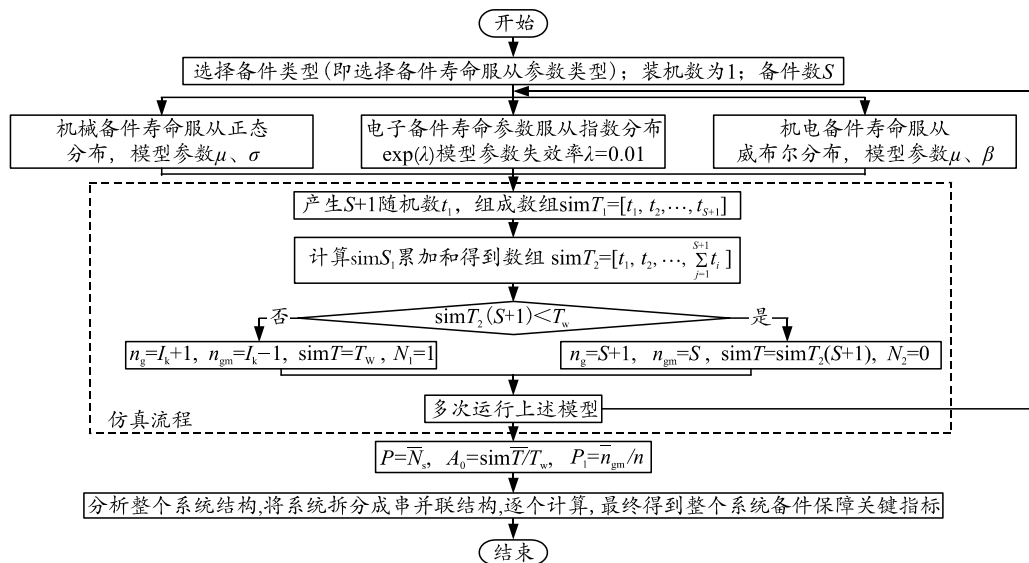


图 2 建模过程与仿真流程

各类型备件保障关键指标仿真如图 3—5 所示 (每种类型备件选取一个)。

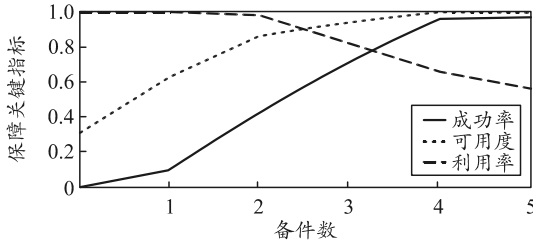


图 3 寿命服从正态分布的备件 C 指标仿真

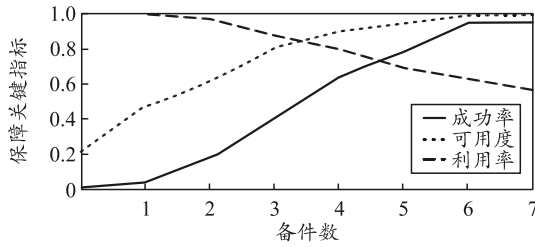


图 4 寿命服从指数分布的备件 F 指标仿真

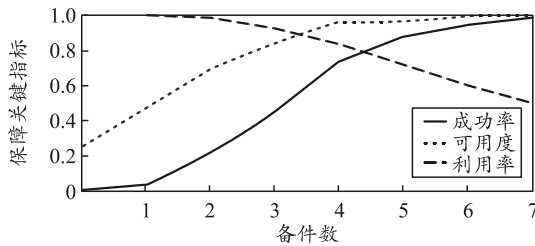


图 5 寿命服从威布尔分布的备件 D 指标仿真

由仿真结果表明：无论何种类型备件，备件的保障概率、使用可用度和利用率随着备件数量变化，各指标趋势相同，即初始备件数量增加，备件保障概率和使用可用度增高，利用率降低。在实际工作中：保障概率是指备件能满足整个任务所需的概率，备件增加使得完成任务的概率增大；可用度是指备件正常工作时间所占整个任务时间比例，备件增加使正常工作的时间增加；备件利用率是指备件消耗数量与初始数量比值，初始备件全部使用依旧不能满足任务时，利用率为 100%，随着备件数量增加至可以满足任务并继续增加，利用率随之下降。仿真结果与实际情况相符。

#### 4.1 传统备件保障指标计算

基于单元级备件保障指标仿真与计算，得出备件保障概率  $P$ 、使用可用度  $A_0$  和利用率  $P_1$  等关键型保障指标。

1) 作战指挥系统。

备件保障概率：

$$P = \max(P_A, P_B, P_C, P_D, P_E, P_F) = 0.9900。$$

使用可用度：

$$A_0 = \max(A_{0A}, A_{0B}, A_{0C}, A_{0D}, A_{0E}, A_{0F}) = 0.9995。$$

备件利用率：

$$P_1 = \frac{n_A \cdot P_{1A} + n_B \cdot P_{1B} + \dots + n_F \cdot P_{1F}}{n_A + n_B + \dots + n_F} = 0.5994。$$

2) 航空保障系统。

备件保障概率：

$$P = \max(P_G, P_H, P_I, P_J, P_K, P_L) = 0.9900。$$

使用可用度：

$$A_0 = \max(A_{0G}, A_{0H}, A_{0I}, A_{0J}, A_{0K}, A_{0L}) = 0.9997。$$

备件利用率：

$$P_1 = \frac{n_G \cdot P_{1G} + n_H \cdot P_{1H} + \dots + n_L \cdot P_{1L}}{n_G + n_H + \dots + n_L} = 0.6719。$$

#### 4.2 系统级备件保障指标建模与计算

相较于传统备件保障指标计算，系统级备件保障指标建模由系统级拆分子系统再到各单元的思路。首先分析各备件组成结构，部分着舰回收引导系统备件情况分布如图 2 所示，描述了备件系统级构建方式：作战指挥系统中，备件 A、B、C 为串联系统，与备件 D 并联后再和备件 E、F 串联；航空保障系统中，备件 G、H 串联与 I 并联，备件 L、J 并联，上述 2 个子系统再与 K 串联。

1) 作战指挥系统：

对于备件 A、B、C 构成串联系统，备件保障概率由式(13)得：

$$P_1 = \prod_{i=1}^n P_i = P_{1A} P_{1B} P_{1C} = 0.8600 \times 0.9600 \times 0.9900 = 0.8173。$$

备件使用可用度由式(15)得：

$$A_{01} = \frac{\int_0^{T_w} \prod_{i=1}^n P(T > t) dt}{T_w} = \frac{\int_0^{T_w} A_{0A} \cdot A_{0B} \cdot A_{0C} dt}{T_w} = 0.9916 \times 0.9977 \times 0.9995 = 0.9888。$$

备件利用率在备件保障概率  $P_1 \geq 0.8173$  的情况下，由式(16)得：

$$P_{si} \geq P_1 = 0.8173, \quad P_{11} = \sum_{m=1}^s n_s / \sum_{j=1}^i n_i = 0.8462。$$

将上述子系统再与备件 D 构成并联系统，则备件保障概率为：

$$P_2 = \max(P_1, P_D) = \max(0.8173, 0.9800) = 0.9800。$$

备件使用可用度为

$$A_{02} = \max(A_{01}, A_{0D}) = \max(0.9888, 0.9978) = 0.9978。$$

备件利用率在备件保障概率  $P_2 \geq 0.9800$  的情况下，由式(16)得：

$$P_{si} \geq P_2 = 0.9800, P_{12} = \sum_{m=1}^s n_s / \sum_{j=1}^i n_i = 1。$$

最后备件 A、B、C、D 所组成的子系统与备件 E、F 再次构成串联系统, 备件保障概率由式(13)得:

$$P_1 = \prod_{i=1}^n P_i = P_2 P_{1E} P_{1F} = 0.9800 \times 0.9700 \times 0.9500 = 0.9031。$$

备件使用可用度由式(15)得:

$$A_0 = \frac{\int_0^{T_w} \prod_{i=1}^n P(T > t) dt}{T_w} = \frac{\int_0^{T_w} A_{02} \cdot A_{0E} \cdot A_{0F} dt}{T_w} = 0.9978 \times 0.9953 \times 0.9932 = 0.9864。$$

备件利用率在备件保障概率  $P_1 \geq 0.9031$  的情况下, 由式(16)得:

$$P_{si} \geq P_1 = 0.9031, P_{12} = \sum_{m=1}^s n_s / \sum_{j=1}^i n_i = 0.8750。$$

2) 航空保障系统。

备件 G、H 构成串联系统, 备件保障概率由式(13)得:

$$P_1 = \prod_{i=1}^n P_i = P_{1G} P_{1H} = 0.8400 \times 0.8700 = 0.7308。$$

备件使用可用度由式(15)得:

$$A_0 = \frac{\int_0^{T_w} \prod_{i=1}^n P(T > t) dt}{T_w} = \frac{\int_0^{T_w} A_{0G} \cdot A_{0H} dt}{T_w} = 0.9777 \times 0.9847 = 0.9627。$$

备件利用率在备件保障概率  $P_1 \geq 0.7308$  的情况下, 由式(16)得:

$$P_{si} \geq P_1 = 0.7308, P_{11} = \sum_{m=1}^s n_s / \sum_{j=1}^i n_i = 1。$$

上述子系统与备件 I 构成并联系统, 备件保障概率为:

$$P_2 = \max(P_1, P_I) = \max(0.7308, 0.4600) = 0.7308。$$

备件使用可用度为:

$$A_{02} = \max(A_{01}, A_{0I}) = \max(0.9627, 0.8218) = 0.9627。$$

备件利用率在备件保障概率  $P_2 \geq 0.7308$  的情况下, 由式(16)得

$$P_{si} \geq P_2 = 0.7308, P_{12} = \sum_{m=1}^s n_s / \sum_{j=1}^i n_i = 1。$$

备件 L、J 构成并联系统, 备件保障概率为:

$$P_3 = \max(P_L, P_J) = \max(0.9900, 0.9800) = 0.9900。$$

备件使用可用度为:

$$A_{03} = \max(A_{0L}, A_{0J}) = \max(0.9997, 0.9947) = 0.9997。$$

备件利用率在备件保障概率  $P_3 \geq 0.9900$  的情况下, 由式(16)得

$$P_{si} \geq P_3 = 0.9900, P_{13} = \sum_{m=1}^s n_s / \sum_{j=1}^i n_i = 1。$$

备件 G、H、I 与备件 L、J 构成的 2 个子系统与备件 K 构成串联系统, 备件保障概率由式(13)得:

$$P_1 = \prod_{i=1}^n P_i = P_2 P_3 P_{1K} = 0.7308 \times 0.9900 = 0.9700 = 0.7018。$$

备件使用可用度由式(15)得:

$$A_0 = \frac{\int_0^{T_w} \prod_{i=1}^n P(T > t) dt}{T_w} = \frac{\int_0^{T_w} A_{02} \cdot A_{03} \cdot A_{0K} dt}{T_w} = 0.9627 \times 0.9997 \times 0.9974 = 0.9599。$$

备件利用率在备件保障概率  $P \geq 0.7018$  的情况下, 由式(16)得:

$$P_{si} \geq P = 0.7018, P_1 = \sum_{m=1}^s n_s / \sum_{j=1}^i n_i = 0.7567。$$

将上述仿真计算结果与实操装备在任务完成后统计结果进行比较如表 3 所示。图 6、图 7 分别为作战指挥系统和航空保障系统下 2 种方法与实测结果对比。

表 3 系统级备件保障关键指标仿真计算结果与实际结果

指标	作战指挥系统			航空保障系统		
	传统方法	系统级方法	实测结果	传统方法	系统级方法	实测结果
保障概率	0.9900	0.9031	0.8873	0.9900	0.7018	0.7811
使用可用度	0.9995	0.9864	0.9532	0.9997	0.9599	0.9712
利用率	0.5994	0.8750	0.8961	0.6719	0.7567	0.7102

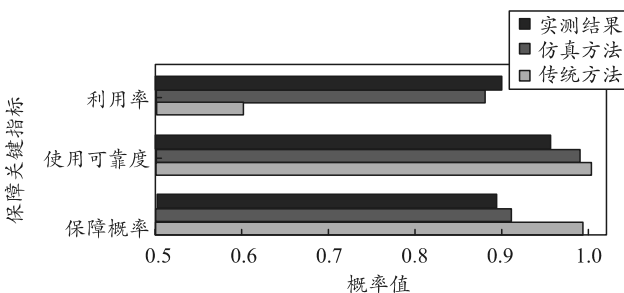


图 6 作战指挥系统下 2 种方法与实测结果对比

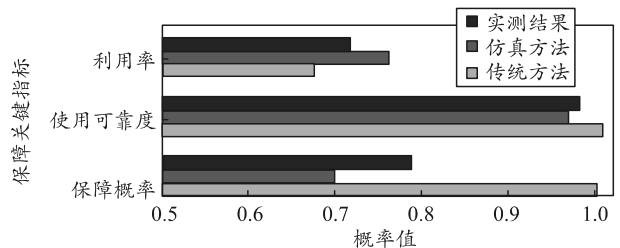


图 7 航空保障系统下 2 种方法与实测结果对比

2017(4): 122-12.

[2] 王晓梅. 推块式分拣机分拣系统的动力学理论与仿真[D]. 重庆: 重庆大学, 2002: 1-2.

[3] 吴宏鑫, 沈少萍. PID 控制的应用与理论依据[J]. 控制工程, 2003(1): 37-42.

[4] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000(3): 347-355.

[5] 王伟晨. 增量式 PID 和位置式 PID 算法的整定比较与研究[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(5): 123-124.

[6] 谭加加, 刘鸿宇, 黄武, 等. PID 控制算法综述[J]. 电子世界, 2015(16): 78-79.

[7] 沈永福, 吴少军, 邓方林. 智能 PID 控制综述[J]. 工业

仪表与自动化装置, 2002(6): 11-13, 24.

[8] 李庆哲, 梁秀满, 刘振东, 等. 改进型增量式 PID 算法在 S7-200 中的程序实现[J]. 工业仪表与自动化装置, 2013(6): 29-31, 94.

[9] 徐海川, 张岳, 张鹤航, 等. 增量式 PID 控制算法在采暖智能控制系统中应用[J]. 辽宁科技学院学报, 2019, 21(1): 21-22, 61.

[10] 文波, 孟令军, 张晓春, 等. 基于增量式 PID 算法的水温自动控制器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2015(12): 113-116.

[11] 陶永华. 新型 PID 控制及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 23-25.

\*\*\*\*\*

(上接第 14 页)

系统级备件计算以及对比图结果表明: 作战指挥系统保障概率指标与实际误差 1.8%; 使用可用度指标与实际误差 3.5%; 利用率指标与实际误差 2.4%。航空保障系统保障概率指标与实际误差 10.2%; 使用可用度指标与实际误差 1.2%; 利用率指标与实际误差 6.5%。相较于传统备件保障计算方法, 上述指标误差分别为 11.6%、4.9%、33.1%、26.7%、2.9%和 5.4%。误差分析结果表明: 传统指标计算方法误差时大时小, 不能保证与实测值误差精度, 而从系统级思想计算备件相关指标, 误差基本低于 10%, 趋于稳定且误差较小。

算例结果表明: 传统制定备件保障方案是任务结束后才能统计得出指标数据, 利用解析计算方法可实现预先评估备件方案; 同时通过与传统方法进行比较, 系统级备件保障误差较小且趋于稳定, 适于预先评估, 提高备件保障效果。仿真计算结果验证了系统模型的有效性与优势性。

### 5 结论

笔者针对舰载机着舰引导系统, 提出系统级备件保障模型, 并通过算例对仿真算法进行验证。算例分析表明: 该方法能对备件保障概率、使用可用度以及利用率等关键指标随备件数量变化的情况进行准确描述, 优化了备件方案, 提高任务完成度与经济性; 提出的系统级备件保障指标计算方法结果与实际情况相符, 仿真结果优于传统方法, 验证了该方法的有效性与优势性, 可为预先制定合理的备件方案提供参考。

### 参考文献:

[1] ISAACSON K E, BOREN P. Dyna-METRIC Version 6:An advanced capability assessment model: R-4214-AF[R]. Santa Monica, CA:RND Corporation, 1993.

[2] LAU H C, CONG H, SEE T C, et al. Evaluation of timevarying availability in multi-echelon spare parts systems with passivation[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 170(1): 91-105.

[3] 周亮, 李庆民, 彭英武, 等. 串件拼修对策下 K/N(G)结构系统可用度评估建模[J]. 航空学报, 2017(4): 123-132.

[4] 郭继周, 郭波, 张涛, 等. 地空导弹维修保障能力评估与备件优化模型[J]. 火力与指挥控制, 2008(3): 9-12.

[5] 任洋, 李华, 李庆民, 等. 多级可修备件库存的生灭过程建模与优化[J]. 国防科技大学学报, 2017(3): 111-120.

[7] 刘文浩, 鲁世红, 王伟. 基于可靠性数据的航材备件需求预测方法[J]. 航空计算技术, 2017(4): 53-56.

[8] SALMAN S, ASSADY C R, POHL E A, et al. Evaluating the impact of cannibalization on fleet performance[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2007, 23(7): 97-104.

[9] 杨秉国, 李金国, 张义方, 等. 备件供应规划要求: GJB4355-2002[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2003.

[10] 邴诗松, 程依鸣, 濮晓龙. 概率论与数理统计教程[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2010: 69-72.

[11] 王玉龙, 金灿, 冉红亮, 等. 威布尔分布备件的蒙特卡洛模拟配置[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018(1): 159-162.

[12] 张志华. 可靠性理论及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 136-147.