

引用格式:李钊,董斐,刘文彪,等.着舰引导装备体系备件系统级保障建模与仿真[J].电光与控制,2019,26(8):78-83,89. LI Z, DONG F, LIU W B, et al. Modeling and simulation of system-level support for spare parts in ship-landing guidance equipment system[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(8):78-83, 89.

着舰引导装备体系备件系统级保障建模与仿真

李钊, 董斐, 刘文彪, 欧阳中辉
(海军航空大学岸防兵学院, 山东烟台 264001)

摘要:针对舰载机着舰引导装备体系中备件构成复杂、数量众多,传统单元级备件保障效果单一,无法高效、全面评估整个备件系统等问题,引入 $k/N(G)$ 表决关系把复杂系统等效分解为串并联结构;提出备件保障概率、使用可用度、利用率等关键性指标在不同种备件寿命分布类型下的预测模型,针对任务结束后才能统计得出指标数据的缺陷,利用解析计算方法实现对备件方案预先评估,提高备件保障效果;并进一步给出系统级各指标计算方法。通过算例分析,与传统方法相比提高了该体系备件系统级保障方案制定的精度与综合评估能力,仿真结果符合实际情况。

关键词:备件系统级保障; 串联; 并联; 备件保障概率; 使用可用度; 利用率

中图分类号: V271.4⁺⁹²

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.08.015

Modeling and Simulation of System-Level Support for Spare Parts in Ship-Landing Guidance Equipment System

LI Zhao, DONG Fei, LIU Wen-biao, OUYANG Zhong-hui
(College of Coastal Defense Force, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: There are numerous spare parts in the carrier-borne aircraft landing guidance equipment system, and the effect of traditional unit-level spare part support is limited, so it is impossible to evaluate the entire spare part system efficiently and comprehensively. In regard to these problems, the $k/N(G)$ voting relationship is introduced to decompose the complex system into a series-parallel structure equivalently. The prediction model of the spare part support probability, use availability, the utilization rate and other key indicators under different life distribution types of the spare part is proposed. In regard to the deficiency that the indicator statistics can only be obtained after finishing the task, the analytical calculation method is used to pre-assess of the spare part plan to improve the effect of spare part support, and the calculation method of each index on the system level is further given. Through an example analysis, it is proved that the accuracy and comprehensive evaluation ability of the spare part support plan on the system level are improved compared with that of the traditional method, and the simulation results are in line with the actual situation.

Key words: spare part support on the system level; series connection; parallel connection; spare part support probability; use availability; utilization rate

0 引言

舰载机着舰引导体系作为航母战斗力的重要组成部分,舰载机的着舰回收引导装备体系的保障能力尤为重要。在该体系保障中,各型装备接力引导战机,相关战位人员协同指挥保障,而影响该体系正常运行的主要原因是各装备零部件是否正常工作,所以对该能

力进行研究,备件保障效能是重要一环。备件是维修能力最重要的物质基础,根据战略需要,航母编队会执行长时间、远距离作战任务,而基地级备件保障难度较大,在任务中主要由本舰及补给船只提供保障,专业技术力量有限,因此在任务中装备发生故障时以更换零部件为主。

国内外学者针对舰载机着舰回收引导装备体系保障中的备件优化问题进行了一系列研究。针对非稳态两级单层备件可修复系统提出 Dyna-METRIC 模型^[1];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,优化

收稿日期:2018-09-07

修回日期:2019-05-15

作者简介:李钊(1993—),男,河南内黄人,硕士生,研究方向为军用技术仿真。

了 Dyna-METRIC 模型^[2-3];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^[4-6];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^[7-8]。

在上述研究的基础上,基于现行备件保障研究中于单元级保障,而缺乏对于单元相互有机结合组装构成的备件系统级保障研究的现状,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含义解析、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。通过着舰回收引导装备体系保障中备件在系统中串并联后对上述3种指标进行评估,对舰载机着舰引导装备体系保障中备件系统级保障建模仿真,使备件系统级保障结果更加清晰、直观。

1 术语定义及条件假设

1.1 术语定义

1) 备件:维修装备及其主要成品所需要的组件、零部件和元器件等的统称,又分为可修复备件和不可修复备件。

2) 可修复备件:备件损坏或故障后,采用可行技术手段可以恢复其原有功能的备件。

3) 不可修复备件:备件损坏或故障后,无法采用可行技术手段恢复其原有功能的备件。

4) 修复概率 P_r :修复一个故障备件的概率。

1.2 条件假设

可修复备件修复概率取值范围为 $0 < P_r \leq 1$,不可修复备件的修复概率为 $P_r = 0$,而可修复备件因存在修复不成功而报废的可能性,所以其本质更加接近不可修复备件;同时通过舰船调研,在任务中舰员级维修备件一般只换不修,等待任务结束之后再进行维修,因此把备件统一简化为不可修复备件,即只换不修。而在进行计算时,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 $\frac{T_g}{1-P_r}$ 的不可修复备件。同时在理论研究中,保障任务检查装备、确认故障和备件更换维修等延误时间忽略不计。

2 备件单元级保障关键指标计算

备件单元级保障关键指标主要由备件保障概率、备件使用可用度和备件利用率构成。对于不同种备件类型,上述关键指标计算方法也有很大差别,只有从单元级入手,才能有效、合理地优化备件系统级保障。

2.1 备件保障概率

备件保障概率与备件满足率、保障任务成功率等

指标本质上都是描述在规定时间内,需要备件时不缺备件的概率。进行备件保障概率的计算,首先要考虑单元级备件本身寿命长短。不同类型备件的使用寿命保障概率模型不同,同种备件个体寿命也有差别,在此只讨论备件平均寿命,对于不同类型备件参照 GJB 4355-2002《备件供应规划要求》^[9]。

1) 电子件。

当备件为电子件,寿命服从指数分布,备件保障概率 P 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 为装备中该备件的装机数; t 为装备保障时间,该备件寿命服从指数分布,记为 $\exp(\lambda)$; λ 为失效率(描述指数分布的参数)。

2) 机械件。

当备件为机械件,寿命服从正态分布。若具有均值 μ 和方差 σ^2 的随机变量 T 的概率密度函数为

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

则称 T 服从随机分布,记为 $T \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。

寿命服从正态分布 $N(E, \sigma^2)$ 的备件需求量 S 的算式为

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

式中: t 为保障时间; E 为备件寿命平均值; p 为备件保障概率; μ_p 为正态分布位数; σ 为标准差。正态分布分位数如表1所示。

表1 正态分布分位数

Table 1 Normal distribution quantile

p	0.8	0.9	0.95	0.99
μ_p	0.84	1.28	1.65	2.33

由数学理论可得,正态分布具有卷积可加性^[10]。设随机变量 $X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$, $Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$,且 X 与 Y 相互独立,则 $Z = X + Y \sim (\mu_1 + \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2)$ 。则机械备件数量为 S 时,整个任务工作时间 T 服从 $N((1+S)\mu, (1+S)\sigma^2)$ 的正态分布,备件保障概率 P 为

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

3) 机电件。

当备件为机电件,寿命服从威布尔分布。威布尔型备件模型为多重无穷级数,计算复杂度高。文献[11]给出了通过 Monte Carlo 方法得到的机电件保障概率的算式。

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

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

式中: t 为随机变量; β 为形状参数; α 为尺度参数; Γ 分布见 IEC61649。

由数学归纳法可证, 对于任意正整数 k , 有 $G^{(k)}(t) \leq F^{(k)}(t)$, 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, $N(T)$ 表示在时间 $(0, T)$ 内备件故障次数。

2.2 使用可用度

备件可用度本质上是备件正常工作时间所占整个任务时间的比例。可用度是军方指导体系保障的重要指标, 在 GJB4355 中表述为“按照备件可用度确定保障概率”。在不考虑预防性维修的前提下, 连续工作备件可用度为

$$A_0 = \frac{T_{BF}}{T_{BF} + \bar{M}_{ct} + T_{LD}} \quad (7)$$

式中: A_0 为可用度; T_{BF} 为平均无故障工作时间; \bar{M}_{ct} 为平均修理时间; T_{LD} 为平均保障延误时间。

假设装备在执行任务过程中连续工作, 有备件使用可用度理论解析计算式为

$$A_0 = \frac{\bar{T}}{T_w} \quad (8)$$

式中: \bar{T} 为装备平均累计工作时间; T_w 为保障时间。

设装备 n 个备件, 该备件装机数量为 1, 记 $1+n$ 个备件寿命分别为 t_1, t_2, \dots, t_{n+1} 。令 $t_0 = t_1 + t_2 + \dots + t_{n+1} = \sum_{i=1}^{n+1} t_i$, 记 t_0 概率密度函数为 $f_0(t)$, 可靠度为 $R_0(t)$, $f_0(t)$ 可对 $f(t)$ 进行卷积计算得到。发生故障前平均时间 (Mean Time to Failure, MTTF) 算式为

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

在可靠性理论中, 可靠度 $R_0(t)$ 定义为: 产品在规定条件与时间内完成既定功能的概率。数学本质等价于备件保障概率 $P = (T > t)$ 。所以, 为得到保障任务期间该装备平均累计工作时间 \bar{T} , 将积分上限替换成 T_w , 则有

$$A_0 = \frac{\bar{T}}{T_w} = \frac{\int_0^{T_w} R_0(t) dt}{T_w} = \frac{\int_0^{T_w} P(T > t) dt}{T_w} \quad (10)$$

因此, 备件使用可用度物理含义即为平均备件保

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的比例, 表达式为

$$P_l = \frac{n_{gm}}{n} \quad (11)$$

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 为常量, 因此, 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就消耗一个某特定备件, 则平均故障次数等效于备件消耗数量, 则该备件利用率表达式为

$$P_l = \min\left(1, \frac{T_w}{n\mu}\right) \quad (12)$$

式中: $\frac{T_w}{n\mu}$ 为任务保障时间与单元备件平均寿命 μ (不同类型备件 μ 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 备件系统级保障关键指标计算

对于若干数量、类型的单元结合成可以完成某一特定功能的装备而言, 该装备可以等效成子系统, 而装备之间能相互配合完成特定任务的, 则视为总系统。舰载机着舰回收引导系统复杂, 各备件、装备之间交联关系情况多样, 但最底层装备、备件关系可用 $k/N(G)$ 表决关系表示^[12]。 $k/N(G)$ 表决系统是指某系统由 N 个同类型备件组成, 假设至少有 k 个备件正常工作时该系统才能正常工作 ($1 \leq k \leq N$), 记为 $k/N(G)$ 。实装中, 备件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 $N \sim N - k + 1$, 并非是非常数。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) 大, 因此在计算备件系统级保障指标时, 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, 在面对备件数量可能过多或者不足这两种情况, 会更倾向于前者, 所以计算指标时, $k/N(G)$ 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

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

式中, P_i 为第 i 种备件保障概率, 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

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

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, 则串联系统可靠度为 $R_0(t) = \prod_{i=1}^n R_{0i}(t)$,

$i = 1, 2, \dots, n$ 。再依据备件使用可用度的物理含义(平均备件保障概率), 则对于串联系统备件使用可用度有

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

3) 备件利用率描述的是备件数量消耗情况, 事关装备经济性问题, 所以军方一般会对备件方案同时提出备件保障概率与备件使用可用度两种指标要求。备件保障概率用于描述装备完好性, 备件使用可用度用于描述备件方案的经济性, 而通过模型计算公式可知这两种指标均与保障时间 T_w 及备件数量 n 有关。当保障时间不变, 随初始备件数量增加, 备件保障概率亦增大, 备件利用率则随之减小。因此, 构建备件系统级利用率计算模型时应同时考虑备件保障概率: 在保证装备完好性前提下优化备件方案经济性, 即在不低于规定的备件保障概率的同时考虑备件利用率最优解。

在计算备件系统级利用率时, 首先确定初始备件数量 n 和备件系统级保障概率 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备件系统级利用率, 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备件系统级保障概率 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利用率, 其模型为

$$\begin{cases} P_{si} \geq P_s \\ P_{\#} = (\sum_{m=1}^s n_s) / (\sum_{j=1}^i n_i) \end{cases} \quad (16)$$

表 2 部分着舰回收引导装备体系备件参数

Table 2 Parameters of partial spare parts of the ship-landing recovery guidance equipment system

指标	备件											
	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
备件件数	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

由表 2 可知, 该体系有 6 种机械备件、4 种电子备件和 2 种机电备件。对各类型备件保障概率 P 、使用可

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

对于并联系统, 只要有一个备件正常工作, 则该系统就可继续运行, 所以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

$$P_{\#} = \max(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (17)$$

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

$$A_{0\#} = \max(A_{01}, A_{02}, \dots, A_{0n}) \quad (18)$$

备件利用率是描述备件消耗情况的指标, 在保证备件系统级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

航母舰载机着舰回收引导装备体系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引导设备, 其设备备件类型、数量众多。在此选取部分着舰回收引导装备体系备件情况, 分布如图 1 所示。

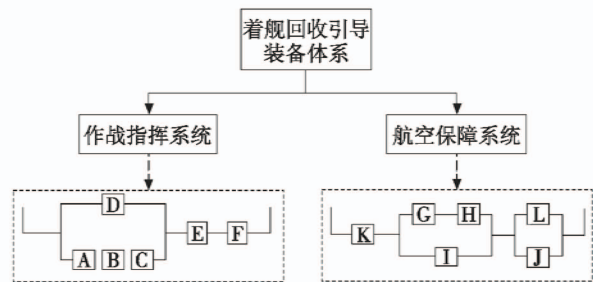


图 1 部分着舰回收引导装备体系备件情况分布图

Fig. 1 Distribution of partial spare parts of the ship-landing recovery guidance equipment system

对舰载机着舰回收引导装备体系备件系统级保障, 某任务保障时间 $T_w = 2000$ h, 上述备件均为或可等效为不可修复备件, 且装机数 $N = 1$ 。

各串并联系统备件参数如表 2 所示。

用度 A_0 和利用率 P_i 进行建模仿真。建模过程与仿真流程如图 2 所示。

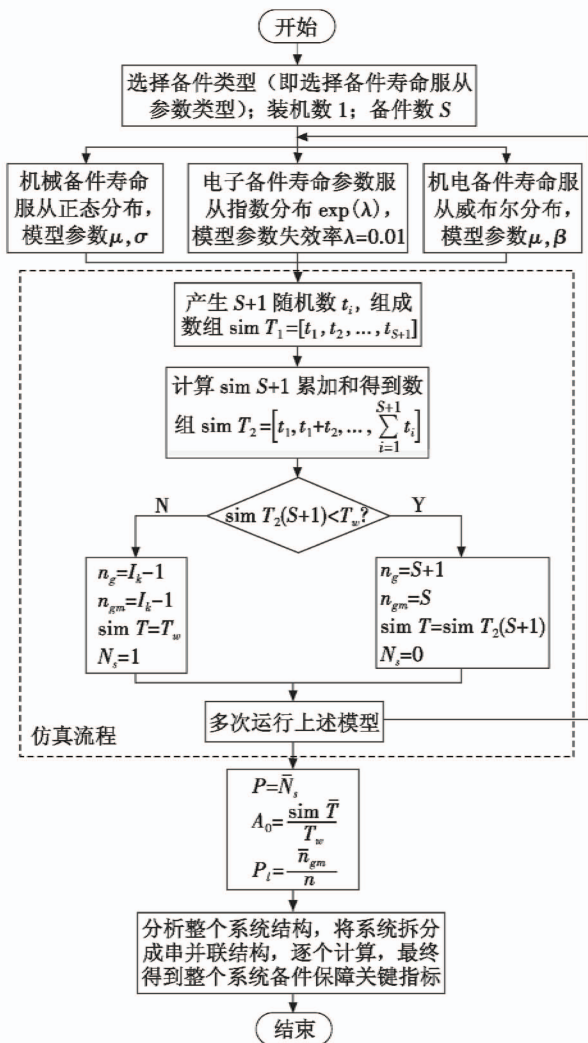


图 2 建模过程与仿真流程图

Fig. 2 Flow chart of modeling process and simulation

各类型备件保障关键指标仿真如图 3 所示(每种类型备件选取一个)。

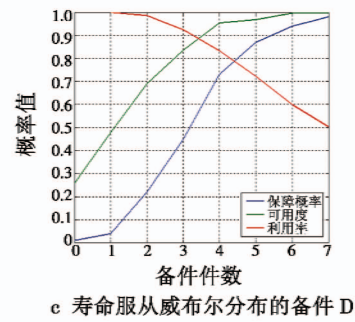
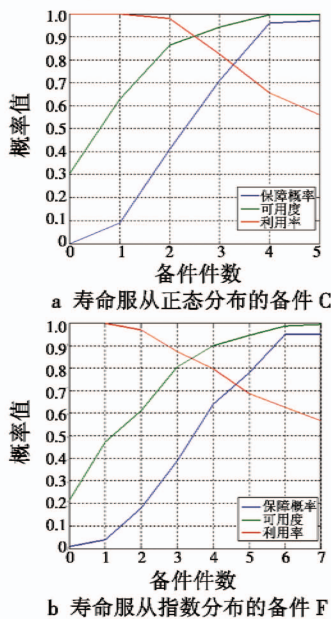


图 3 不同类型备件指标仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of the index of different kinds of spare parts

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均随备件数量变化,各指标趋势相同: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,备件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;使用可用度是指备件正常工作时间所占整个任务时间的比例,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的比值,初始备件全部使用依旧不能满足任务需求时,利用率为 100%,随着备件数量增加至可以满足任务需求并继续增加,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,得出备件的 P, A_0 和 P_l 等关键性保障指标。

1) 作战指挥系统。 $P = \max(P_A, P_B, P_C, P_D, P_E, P_F) = 0.9900$; $A_0 = \max(A_{0A}, A_{0B}, A_{0C}, A_{0D}, A_{0E}, A_{0F}) = 0.9995$; $P_l = \frac{n_A \cdot P_{lA} + n_B \cdot P_{lB} + \dots + n_F \cdot P_{lF}}{n_A + n_B + \dots + n_F} = 0.5994$ 。

2) 航空保障系统。 $P = \max(P_C, P_H, P_I, P_J, P_K, P_L) = 0.9900$; $A_0 = \max(A_{0C}, A_{0H}, A_{0I}, A_{0J}, A_{0K}, A_{0L}) = 0.9997$; $P_l = \frac{n_C \cdot P_{lC} + n_H \cdot P_{lH} + \dots + n_L \cdot P_{lL}}{n_C + n_H + \dots + n_L} = 0.6719$ 。

4.2 备件系统级保障指标建模与计算

相较于传统备件保障指标计算,备件系统级保障指标建模由系统级拆分成子系统再到各单元的思路首先分析各备件组成结构,在部分着舰回收引导装备体系备件情况分布图中,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 并联后再与备件 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,上述两个子系统再与 K 串联。

4.2.1 作战指挥系统

1) 备件 A, B, C 构成串联系统:备件保障概率由

式(13)得 $P_1 = 0.8173$; 备件使用可用度由式(15)得 $A_{01} = 0.9888$; 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 $P_{s1} \geq P_1 = 0.8173, P_{l1} = 0.8462$ 。

2) 上述子系统再与备件 D 构成并联系统: 备件保障概率由式(17)得 $P_2 = 0.9800$; 备件使用可用度由式(18)得 $A_{02} = 0.9978$; 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 $P_{s2} \geq P_2 = 0.9800, P_{l2} = 1$ 。

3) 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 $P_1 = 0.9031$; 备件使用可用度由式(15)得 $A_0 = 0.9864$; 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 $P_{s1} \geq P_1 = 0.9031, P_{l1} = 0.8750$ 。

4.2.2 航空保障系统

1) 备件 G, H 构成串联系统: 备件保障概率由式(13)得 $P_1 = 0.7308$; 备件使用可用度由式(15)得 $A_{01} = 0.9627$; 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 $P_{s1} \geq P_1 = 0.7308, P_{l1} = 1$ 。

2) 上述子系统与备件 I 构成并联系统: 备件保障概率由式(17)得 $P_2 = 0.7308$; 备件使用可用度由式(18)得 $A_{02} = 0.9627$; 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 $P_{s2} \geq P_2 = 0.7308, P_{l2} = 1$ 。

3) 备件 L, J 构成并联系统: 备件保障概率由式(17)得 $P_3 = 0.9900$; 备件使用可用度由式(18)得 $A_{03} = 0.9997$; 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 $P_{s3} \geq P_3 = 0.9900, P_{l3} = 1$ 。

4) 最后, 备件 G, H, I 及备件 L, J 构成的两个子系统与备件 K 构成串联系统: 备件保障概率由式(13)得 $P_1 = 0.7018$; 备件使用可用度由式(15)得 $A_0 = 0.9599$; 备件利用率在备件保障概率 $P \geq 0.7018$ 的情况下由式(16)得 $P_{s1} \geq P = 0.7018, P_{l1} = 0.7567$ 。

将上述仿真计算结果与实操装备在任务完成后的统计结果进行比较, 如表3所示。

表3 备件系统级保障关键指标仿真计算结果与实测结果
Table 3 The calculated results of two methods and the measured results for key indexes of spare part support

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

备件系统级计算结果表明: 作战指挥系统保障概率指标与实际误差为 1.8%; 使用可用度指标与实际误差为 3.5%; 利用率指标与实际误差为 2.4%。航空保障系统保障概率指标与实际误差为 10.2%; 使用可

用度指标与实际误差为 1.2%; 利用率指标与实际误差为 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%。误差表明, 传统指标计算方法误差时大时小, 不能保证计算结果与实测值的误差精度, 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。

算例表明, 传统制定备件保障方案时往往是任务结束后才能统计得出指标数据, 而利用解析计算方法可实现预先评估备件方案; 与传统方法进行比较, 备件系统级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。

5 结论

针对舰载机着舰回收引导装备体系提出备件系统级保障建模仿真, 并通过算例对仿真算法进行验证。算例表明: 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在备件数量变化时的各自变化情况进行准确描述, 优化了备件方案, 提高了任务完成度与经济性; 同时, 提出的备件系统级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: RAND Corporation, 1993.
- [2] LAU H C, SONG H W, SEE C T, et al. Evaluation of time-varying 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, 38(4): 118-127.
- [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, 33(3): 9-12.
- [5] 刘任洋, 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, 39(3): 111-120.
- [6] 董琪, 徐廷学, 杨继坤, 等. 基于改进边际优化算法的备件配置研究[J]. 现代防御技术, 2015, 43(5): 198-204.

- (6):485-501.
- [3] HARITAOGLU I, FLICKNER M D. Detection and tracking of shopping groups in stores[C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001;I-431-I-438.
- [4] HARITAOGLU I, HARWOOD D, DAVIS L S. W4: real-time surveillance of people and their activities[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(8):809-830.
- [5] AWERBUCH B, PELEG D. Concurrent online tracking of mobile users [C]//Proceedings of the Conference on Communications Architecture and Protocols, 1991; 221-233.
- [6] 王鑫,徐立中. 图像目标跟踪技术[M]. 北京: 人民邮电出版社,2012.
- [7] 周明珠,周治平,孙子文. 基于全局和局部信息的目标跟踪算法[J]. 光电工程,2015(4):19-24.
- [8] 初红霞,谢忠玉,王君祥,等. 空间相关背景加权直方图均值漂移目标跟踪[J]. 控制与决策,2014,29(3):528-532.
- [9] 闫河,刘婕,王朴,等. 基于 SUSAN 角点和 HSV 颜色模型的粒子滤波目标跟踪算法[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(5):173-176, 221.
- [10] 孙继银,孙向东,王忠,等. 前视红外景象匹配技术[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [11] 卢建国,蔡安妮,李莉丽. 基于局部模板匹配的运动目标跟踪[J]. 光电子·激光,2011,22(2):297-301.
- [12] 陈瑞文. 基于改进的 BoVW 模型的图像检索方法研究[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版,2015,17(5):77-79.
-
- (上接第66页)
- [85] 姜凯峰,周明,门金柱. 火箭助飞鱼雷作战使用中直升机安全问题初探[J]. 鱼雷技术,2010,18(1):72-75.
- [86] 刘兴林,鄂群,刘德才,等. 舰机协同反潜中影响直升机引导水面舰艇鱼雷攻击效果的误差因素分析[J]. 舰船科学技术,2010,32(5):76-79.
- [87] 曲延明,杨军,周明,等. 舰机协同使用火箭助飞鱼雷攻潜中的舰艇占位方法[J]. 鱼雷技术,2011,19(4):303-306.
- [88] 鄂群,马远良,刘德才,等. 水面舰艇引导直升机鱼雷攻击误差分析[J]. 鱼雷技术,2009,17(5):72-76.
- [89] 陶万成,杨日杰,熊雄,等. 航空深弹投放模型及空中弹道仿真[J]. 海军航空工程学院学报,2011,26(5):525-529.
- [90] 孙明太,任东彦,李居伟,等. 使用航空深弹驱赶潜艇建模与仿真[J]. 鱼雷技术,2012,20(6):449-453.
- [91] 姜选凯,赵学涛,贾跃. 航空自导深弹攻潜命中概率分析[J]. 火力与指挥控制,2009,34(8):64-67.
- [92] 郑晓庆,杨日杰,赵轩坤. 投放时机和投放位置对航空攻潜武器命中概率的影响[J]. 测试技术学报,2013,27(1):87-92.
- [93] 吴芳,吴铭,高青伟,等. 飞机运动态势对航空深弹入水点散布影响分析[J]. 火力与指挥控制,2016,41(4):35-37.
-
- (上接第83页)
- [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,2017,47(4):53-56.
- [8] SALMAN S, CASSADY C R, POHL E A, et al. Evaluating the impact of cannibalization on fleet performance [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2007, 23(4):445-457.
- [9] 杨秉喜,李金国,张义芳,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] 崑诗松,程依明,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,2011.
- [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.