

对数正态型通用备件满足率评估及 需求量计算方法

徐立^{1,*}, 阮旻智², 李华¹

(1. 海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033;

2. 海军工程大学舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 针对对数正态型通用备件满足率评估及需求量计算问题, 采用平均寿命和方差近似原理, 将对数正态型部件的寿命近似为伽玛分布, 建立了对数正态型通用备件的满足率评估模型。结合备件满足率指标约束, 开展了对数正态型通用备件的需求量计算。结合算例进行仿真分析, 结果表明, 在寿命对数标准差较低时, 本文建立的对数正态型通用件备件满足率评估模型具有较高的评估精度, 能够对不同寿命分布的对数正态通用备件配置方案进行评估, 备件需求量计算方法能够在备件满足率指标约束下准确给出对数正态通用件配置方案, 避免过度配置。提出的模型和采用的备件需求量计算方法能够为装备保障部门开展对数正态型通用备件配置方案满足率评估与确定提供理论支撑。

关键词: 对数正态; 通用件; 备件满足率; 评估

中图分类号: E 917, TJ 07

文献标志码: A

DOI:10.12305/j.issn.1001-506X.2022.04.41

Method of fill rate evaluation and demand calculation for lognormal component commonality

XU Li^{1,*}, RUAN Minzhi², LI Hua¹

(1. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. College of Naval Architecture & Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at the problem of fill rate evaluation and demand calculation of lognormal component commonality, the life of lognormal components is approximated to gamma distribution by using the principle of average life and variance approximation, and the fill rate evaluation model of lognormal component commonality is established. Combined with the constraint of spare parts fill rate index, the demand calculation of lognormal component commonality is carried out. The simulation analysis combined with an example shows that when the logarithmic standard deviation of life is low, the lognormal component commonality fill rate evaluation model established in this paper has high evaluation accuracy and can evaluate the lognormal component commonality spare parts configuration project with different life distributions. The calculation method of spare parts demand can accurately give the lognormal component commonality configuration project under the constraint of spare parts fill rate index, so as to avoid over configuration. The proposed model and the calculation method of spare parts demand can provide theoretical support for the equipment support department to evaluate and determine the lognormal component commonality configuration project.

Keywords: lognormal; component commonality; spare parts fill rate; evaluation

收稿日期:2020-12-02; 修回日期:2021-04-16; 网络优先出版日期:2021-07-02。

网络优先出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20210702.1555.019.html>

基金项目: 国家自然科学基金(71801220); 军委装备发展部十三五预研领域基金重点项目(61400040502)资助课题

* 通讯作者。

引用格式: 徐立, 阮旻智, 李华. 对数正态型通用备件满足率评估及需求量计算方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(4): 1417-1423.

Reference format: XU L, RUAN M Z, LI H. Method of fill rate evaluation and demand calculation for lognormal component commonality[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(4): 1417-1423.

0 引言

备件是装备保障的物质基础之一,备件配置的科学与否直接决定了维修保障过程能否顺利进行。因此,备件配置方案的评估及确定问题一直是装备保障领域关注的热点^[1-3]。近年来,随着新装备的不断列装,各种设备组件的通用化程度逐渐提高。由于通用件涉及的装备种类多、型号广,使用范围大、频率高,相较于专用备件,其短缺造成的影响也会更大^[4-6]。在通用件中,半导体器件、绝缘体等部件寿命服从对数正态分布^[7],应用较为广泛,需求程度高。对数正态型通用件备件满足率达标情况一直是装备保障部门关注的重点之一。

针对通用备件配置问题, Sherbrooke 等人^[8-9]面向多级多层次维修保障系统,建立了可修复备件最优库存多级控制理论,实现了备件配置优化从单项法向系统法的转变,针对不同层级的可更换单元,以装备使用可用度为研究对象,开展了基于可回收项目控制多级技术的通用备件优化配置方法研究。Sigrid 等人^[10]描述了备件消耗过程,给出了通用件库存优化方法。Ma 等人^[11]研究了多产品、多周期、多级装配、随机需求的通用件问题,考虑了通用件成本结构、补货提前期和装配时间等因素。Laura 等人^[12]根据工业部门和空军备件消耗数据,采用改进的 Kolmogorov-Smirnov 拟合检验研究备件消耗的最佳拟合分布,预测备件需求情况。Topan^[13]和 Douniel 等人^[14]采用启发式算法计算备件配置情况,大大减少了装备的总停机时间,提高了备件保障效率,降低了备件购置成本。Zhu 等人^[15]基于维修计划,提出了预测备件需求分布的简易方法和备件动态控制方法。Boutselis 等人^[16]采用搭建仿真系统产生保障基础数据,在此基础上,通过贝叶斯网络模型开展不同保障场景下的备件需求预测。冯蕴雯等人^[17]考虑部件的故障过程、维修周转以及备件的订购补给过程,提出了基于 Markov 过程的 k/n 冗余系统可用度模型,实现了备件库存配置与冗余度联合优化。Rupe 等人^[18]等使用马尔可夫更新过程和半再生过程理论,对 N 个相同独立部件组成的系统进行建模和系统可用度评估。Nahman 等人^[19]采用二项分布的概率模型,在寿命为非指数分布,更新时间为确定变量情况下研究了变压器的最优备件问题。Babai 等人^[20]针对备件间歇性需求,在假设备件消耗符合泊松分布的基础之上采用贝叶斯方法开展备件需求预测,取得良好效果。Zhao 等人^[21]针对多任务系统的任务成功率指标,讨论了组件或任务阶段的风险排序,通过综合建模方法在节省经费的前提下开展备件优化配置研究。

在进行保障资源规划过程中,备件满足率是各方关注的重点。程海龙等人^[22]从备件满足率和短缺量两参数的产生根源入手,分析二者的数学、物理等含义,给出二者的区别及联系。张志华等人^[23]针对备件满足率只有统计定

义的问题,研究了单备件满足率和串联系统备件满足率的概率性质,给出了概率模型。张建军等人^[24]基于过程更新理论,给出了部件寿命服从指数、正态等分布的备件保障度模型,在此基础上计算备件需求量。Wen 等人^[25]从部署站点的角度考虑不同备件放置站点对备件满足率的影响。Samuel 等人^[26]在随机需求和周转时间下解决备件库存的分类和控制问题,提出了需求分类理论,研究表明 Laplace 模型在计算备件满足率方面的优良性能。Rodrigues 等人^[27]根据装备健康管理数据,在备件满足率约束下,以购置费用为优化目标开展备件配置方案优化。Hasni 等人^[28-30]针对间断备件需求,采用 Bootstrap 方法以服务水平 and 备件满足率为优化目标,开展备件优化配置研究。对于非指数类备件需求预测及配置优化问题,在搭建模型和求解运算时存在一定的难度,通常是采用等效的方法开展相关研究。邵松世等人^[31]通过贝叶斯理论将有寿命件的寿命等效为正态分布,提出了一种基于正态等效的有寿命件备件方案确定方法。刘任洋等人^[32]通过可靠度等效方法将系统中的非指数单元转化为指数单元,将多指数单元表决系统等效为伽玛系统给出备件需求量解析方法。

综上所述,在开展对数正态型通用备件满足率评估及需求量确定方面存在以下不足:① 针对对数正态分布通用件开展备件保障效能评估的研究相对较少,工程计算缺乏相应的理论模型难以准确建立起备件配置数量与备件满足率之间的关系;② 理论上开展非指数类部件备件满足率计算时涉及多重卷积,计算过程难以快速实现,可操作性不强;③ 缺乏行之有效的近似方法开展该类部件的备件满足率计算。本文针对对数正态型通用部件的配置方案和评估问题,利用近似原理,将对数正态型部件消耗过程近似为伽玛冲击过程,建立对数正态型通用部件的备件满足率计算模型,并在备件满足率指标约束下,计算对数正态型通用部件的需求量。通过仿真验证,说明本文所建备件满足率评估模型及备件需求计算方法具有较高的求解精度和较强的适用性。能够为装备保障部门制定对数正态型通用部件的配置方案提供理论支撑。

1 问题描述及模型假设

1.1 保障过程描述

某对数正态型通用件分别在 N 台装备中使用,这些装备可是不同类型或同类型不同规格,已知该通用件在装备 n 中年计划工作时间 $T_n, 1 \leq n \leq N$, 当该通用件发生故障时,对备件产生需求。由于装备工作强度的差异,各装备对通用件需求程度不同,备件需求关系如图 1 所示。在整个观察周期内,备件数量能够满足各装备的备件需求的概率称为备件满足率。备件仓库需要配置一定数量的备件以满足备件满足率指标要求,记备件满足率门限值为 P_0 。

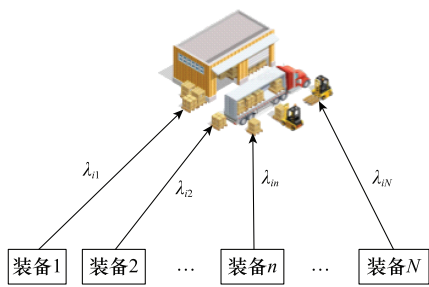


图 1 通用件需求示意图

Fig. 1 Sketch map of demand for component commonality

1.2 模型假设

在装备保障现场,由于维修设备和高水平维修人员配备情况的限制,难以开展故障件的维修和装备原位维修,通常对故障装备进行换件修理。除此之外,在批次采购部件之间的时间间隔内,开展紧急订货时周期较长。因此,本文在进行建模时做如下假设:① 观测周期内不考虑通用件的补给;② 装备通用部件发生故障时仅进行换件维修;③ 故障通用件无法修复。

2 对数正态型通用备件满足率模型

2.1 近似原理

对于部件寿命 X 服从对数均值为 μ , 对数标准差为 σ 的对数正态分布, 记作 $X \sim \text{LN}(\mu, \sigma^2)$, 则可得其平均寿命为

$$E(X) = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \tag{1}$$

方差为

$$\text{Var}(X) = e^{2\mu + 2\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) \tag{2}$$

根据近似原则,若需对数正态分布 $X \sim \text{LN}(\mu, \sigma^2)$ 近似为伽玛分布 $X' \sim \text{Ga}(\alpha, \lambda)$, 则需二者平均寿命与方差相等, 伽玛分布均值为

$$E(X') = \frac{\alpha}{\lambda} \tag{3}$$

方差为

$$\text{Var}(X') = \frac{\alpha}{\lambda^2} \tag{4}$$

联立方程(1)~式(4)可得

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{e^{\sigma^2} - 1} \\ \lambda = \frac{1}{e^{\mu + 0.5\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)} \end{cases} \tag{5}$$

即寿命服从 $X \sim \text{LN}(\mu, \sigma^2)$ 的部件可以近似为 $X \sim \text{Ga}\left(\frac{1}{e^{\sigma^2} - 1}, \frac{1}{e^{\mu + 0.5\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)}\right)$ 的伽玛型部件。

2.2 对数正态型通用备件满足率模型

若某通用件寿命分布符合伽玛分布即 $X \sim \text{Ga}(\alpha, \lambda)$, 工作时间为 T , 则其在工作时间内发生故障的概率为

$$F(T) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^T t^{\alpha-1} e^{-\lambda t} dt \tag{6}$$

在可靠性理论中,部件寿命服从伽玛分布时,部件故障可理解为冲击模型。若产品能经受若干次外界冲击,但当产品受冲击次数累积到 α 次时就产生失效。此时,产品寿命 X 就是第 α 次冲击来到的时间^[33]。对于装备特定的部件,其备件配置数量为 s , 则在任务期间 T 内,在故障率保持不变的情况下,不能承受 αs 次冲击的概率为

$$F(s, T) = \frac{\lambda^{\alpha s}}{\Gamma(\alpha s)} \int_0^T t^{\alpha s-1} e^{-\lambda t} dt \tag{7}$$

式(7)可理解为 s 个备件不能满足该装备备件需求的概率,则备件配置数量为 s 恰能够满足装备需求的概率为

$$p(s, T) = F(s-1, T) - F(s, T) \tag{8}$$

即为

$$p(s, T) = \frac{\lambda^{\alpha(s-1)}}{\Gamma[\alpha(s-1)]} \int_0^T t^{\alpha(s-1)-1} e^{-\lambda t} dt - \frac{\lambda^{\alpha s}}{\Gamma(\alpha s)} \int_0^T t^{\alpha s-1} e^{-\lambda t} dt \tag{9}$$

针对不同装备编号 $1 \sim N$, 各装备有不同的任务时间 $T_1 \sim T_N$ 。在任务周期内,恰需相应数量的备件满足其的备件需求,分别记为 $s_1 \sim s_N$ 。根据离散场合下的卷积公式,若假设装备总体所需备件数量恰好为 $s (s = s_1 + s_2 + \dots + s_N)$ 时恰能满足备件需求,则备件数量为 S 时的备件满足率为

$$P_m(S) = p(s \leq S) = \sum_{s=0}^S p(s) = \sum_{s=0}^S p(s_1, T_1) * p(s_2, T_2) * \dots * p(s_N, T_N) \tag{10}$$

式中: $*$ 表示卷积。

3 备件需求量计算方法

若满足率门限值 P_0 , 可采取逐步迭代的方法开展通用备件需求量计算。计算流程如图 2 所示。

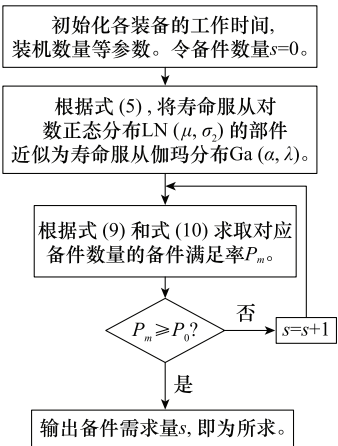


图 2 备件需求量计算方法

Fig. 2 Calculation method of spare parts demand

4 算例分析

4.1 仿真过程设计

装备保障过程仿真设计具体步骤如下。

步骤 1 设置装备数量 N , 部件寿命分布参数 $LN(\mu, \sigma^2)$, 装备工作时间 $T=[T_1, T_2, \dots, T_N]$, 仿真次数 $\text{sim}N$, 备件满足计数 $M=0$, 仿真次数计数 $k=1$;

步骤 2 按照对数正态分布规律生成部件寿命。判断各装备部件的故障时间是否在其任务时间范围内。若故障发生时刻在任务结束时刻之后, 则认为不需要备件, $M=M+1$, 转步骤 4; 若故障发生在任务时间范围内, 则产生一个备件需求, 转步骤 3;

步骤 3 此时若有备件, 则消耗 1 个备件, 同时针对该备件产生新的寿命, 继续仿真过程, 转步骤 2。若无备件, 则备件库存未满足使用需求, 此次仿真结束, 转步骤 4;

步骤 4 判断仿真次数是否达到 $\text{sim}N$, 若达到, 转步骤 5; 否则, $k=k+1$, 转步骤 2;

步骤 5 统计备件满足需求的总次数 M , M 与 $\text{sim}N$ 之比即可作为备件满足率的估计值。

4.2 模型仿真分析

选取对数正态型部件寿命分布如表 1 所示, 假设有 4 台装备具有相同的对数正态型部件, 其在观测期内的工作时间分别为 400 h, 600 h, 800 h, 1 000 h, 仿真次数设为 2 000 次。

表 1 各方案寿命分布参数

Table 1 Life distribution parameters of each scheme

序号	对数均值	对数标准差	平均寿命/h	寿命标准差
1	6.6	0.2	749.9	151.5
2	6.6	0.4	796.3	331.7
3	6.6	0.6	880.1	579.3
4	5.4	0.4	239.8	99.9
5	5.4	1	365.0	478.5
6	6.6	1	1 212.0	1 588.7

针对不同参数的对数正态分布, 采用本文方法计算多装备对数正态型部件的备件满足率随备件数量的变化情况, 并与仿真值进行对比, 计算结果如图 3~图 8 所示。其中, 方案 1~方案 6 的对数均值为 6.6、6.6、6.6、5.4、5.4、6.6; 对数标准差分别为 0.2、0.4、0.6、0.4、1.0、1.0。

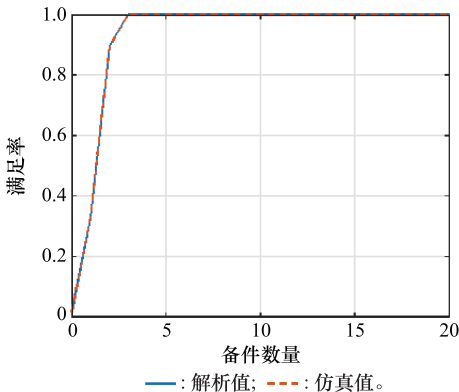


图 3 方案 1 备件满足率对比

Fig. 3 Comparison of spare parts fill rate of scheme 1

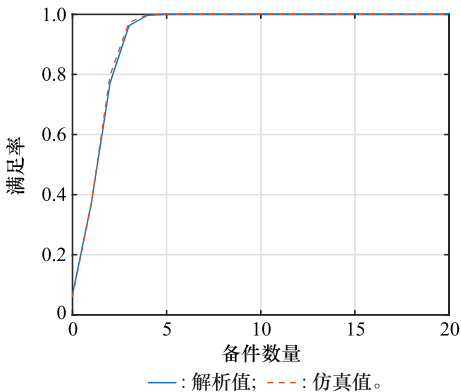


图 4 方案 2 备件满足率对比

Fig. 4 Comparison of spare parts fill rate of scheme 2

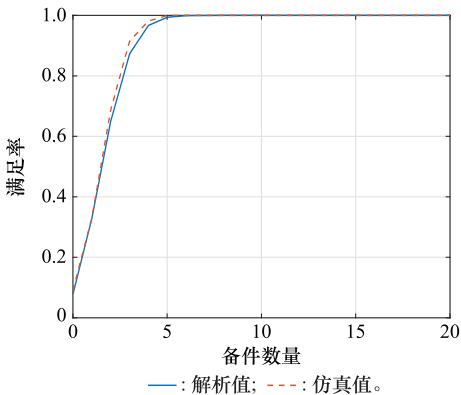


图 5 方案 3 备件满足率对比

Fig. 5 Comparison of spare parts fill rate of scheme 3

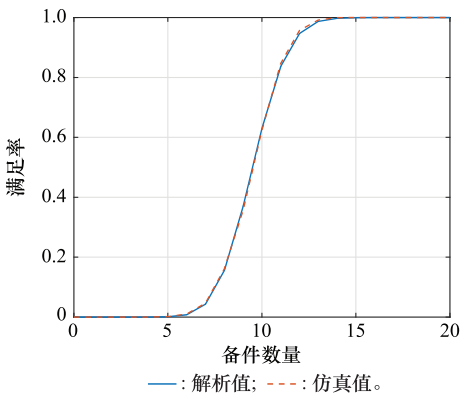


图 6 方案 4 备件满足率对比

Fig. 6 Comparison of spare parts fill rate of scheme 4

观察对比曲线可知, 当对数标准差较小时, 解析值与仿真值的满足率变化曲线吻合度较高; 当部件寿命对数标准差增大时, 对数正态分布部件备件满足率解析值与仿真值差别逐渐增大。在相同条件下, 一定范围内遍历对数均值和对数标准差, 分别用仿真方法和本文近似方法求得备件满足率, 进一步求得解析值与仿真值整体误差如表 2 所示。由表 2 可知, 近似方法的误差大小主要与部件寿命的对数

标准差大小有关,当对数标准差值大于 1.1 时,近似方法与仿真值整体误差超过 10%,此时,工程上不宜继续使用;当对数标准差在 1.1 以下时,本文近似方法具有较高的精度,可为后续开展对数正态型部件备件需求量计算打下基础。

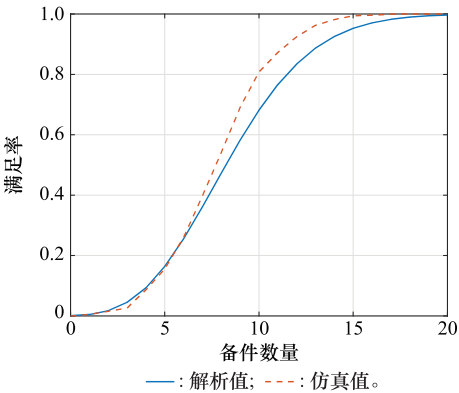


图 7 方案 5 备件满足率对比

Fig. 7 Comparison of spare parts fill rate of scheme 5

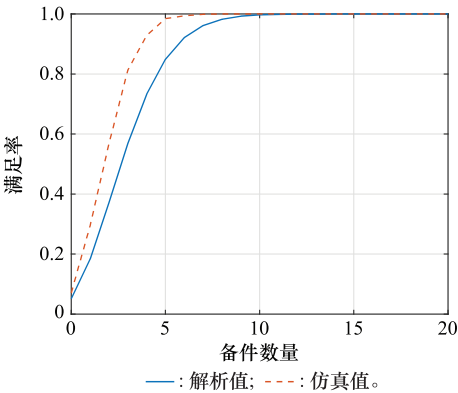


图 8 方案 6 备件满足率对比

Fig. 8 Comparison of spare parts fill rate of scheme 6

表 2 不同对数均值和对数标准差下解析值与仿真值之间的误差

Table 2 Error between analytic value and simulation vlue in different logarithmic mean and logarithmic standard deviation

对数均值	对数标准差												
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
5	0.78	1.22	2.01	1.12	1.93	3.43	5.34	6.87	11.09	18.77	27.68	38.02	50.22
5.5	0.47	0.37	0.38	1.36	2.23	2.58	3.37	6.90	10.79	17.58	25.30	36.32	47.57
6	0.20	0.18	0.90	1.04	1.27	2.17	4.09	6.98	10.81	15.73	22.68	33.13	43.74
6.5	0.20	0.96	0.73	0.75	1.35	2.81	4.84	7.48	11.11	15.93	21.90	29.59	39.05
7	0.11	1.00	0.71	2.02	3.07	3.99	5.39	8.18	8.90	12.77	17.82	24.43	33.16

4.3 算例分析

假设 4 台不同类型的装备中都有某同一类对数正态通用件,已知该通用件的寿命服从对数正态分布 $LN(5,2,0.5^2)$,根据装备年工作计划,4 台装备每年的工作时间分别为 400 h, 600 h,800 h,1 000 h,某仓库现欲确定该通用件两年的用量,使其备件满足率不低于 0.85。

根据本文建立的对数正态部件备件满足率模型与备件需求量计算方法开展备件需求量计算,与此同时采用仿真方法对备件配置情况进行仿真评估,结果对比如表 3 所示。

由表 3 可知,本文解析方法在备件配置数量较低时,此时备件满足率较低,二者相差较大,当备件满足率在 0.1 以下时,二者误差在 10%以上;随着备件配置数量的增加,装备备件满足率逐渐升高,此时解析方法计算得到的备件满足率与仿真评估结果基本一致,尤其是在备件配置数量达到 20 以上时,二者计算误差较低,此时已满足工程应用要求。而在实际进行备件配置时,备件满足率较低的方案不会采用,只会考虑备件满足率在门限值附近或以上的备件配置方案,此时,本文所提方法精度较高,结果可信。

表 3 迭代过程中备件满足率计算结果对比

Table 3 Comparison of calculation results of spare parts fill rate in iterative process

参数	序号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
备件数量	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
解析方法	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
仿真方法	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
误差/%	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

参数	序号									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
备件数量	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
解析方法	0	0	0	0	0	0	0.000 2	0.001	0.003 4	0.010
仿真方法	0	0	0	0	0	0	0.002	0.002	0.005 3	0.013
误差/%	—	—	—	—	—	—	85.76	57.89	35.49	18.75

续表 3
Continued Table 3

参数	序号									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
备件数量	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
解析方法	0.027	0.060	0.118	0.206	0.323	0.460	0.600	0.726	0.828	0.901
仿真方法	0.027	0.058	0.112	0.204	0.324	0.450	0.584	0.732	0.832	0.898
误差/%	0.44	3.39	4.73	0.97	0.225	2.32	2.67	0.73	0.41	0.373

若在备件满足率指标为 0.85 的前提下,确定各装备独立的备件需求方案,可得其备件数量如表 4 所示。

表 4 单个装备备件需求量计算结果
Table 4 Calculation results of spare parts demand of single equipment

装备序号	年工作时间/h	备件数量	备件满足率
1	400	5	0.960
2	600	7	0.940
3	800	9	0.910
4	1 000	11	0.896
合计	—	32	—

由表 3 和表 4 对比可知,若单独考虑各装备的备件需求而不进行统一考虑时,所需备件数量为每个装备所需备件数量之和为 32 个。单个装备在一定的备件满足率指标要求下,随着年工作时间的增加,备件需求数量逐渐增加,这与实际情况一致。若将各装备作为一个整体,考虑其总的备件满足率,备件配置数量为 29 个。体现出不同装备在采用相同通用件时,在节省备件购置费用方面的优势。

5 结 论

(1) 针对对数正态型通用件满足率评估问题,基于均值、方差相等的寿命近似方法,将对数正态型部件消耗过程近似为伽玛冲击过程,从而将对数正态型通用件备件满足率问题转化成伽玛型部件的备件满足率问题,建立了对数正态型通用备件的满足率评估模型,提高了对数正态型通用件备件满足率的计算效率。通过仿真对比分析,本文所建模型在寿命对数标准差较低时,对于不同寿命分布的对数正态型通用备件配置方案,均能够较为准确的评估其备件满足率。

(2) 在备件满足率指标约束下,开展对数正态型通用备件需求量计算。在备件方案迭代过程中,生成的备件配置方案所对应的备件满足率均能与仿真值较好贴合,所得备件配置方案能够有效满足装备备件需求。本文对数正态型通用备件满足率评估及需求量计算方法能够为保障部门评估对数正态型通用备件配置效果,制定配置方案提供决策支持和理论支撑。

参考文献

[1] MORGAN N R, DAVIS K D, RICHARDSON C, et al. Common components analysis: an adapted approach for evaluating programs[J]. Evaluation and Program Planning, 2018,67: 1-9.

[2] PASCHE M, SKOLD M. Potential drawbacks of component commonality in product platform development[J]. International Journal of Automotive Technology and Management, 2012, 12(1):92-108.

[3] TUNG D V, NAGEN N. Effects of component commonality in multi-component inventory models[J]. Opsearch, 2000, 37(4): 294-315.

[4] 李少龙, 黄南, 董红莉, 等. 航空发动机通用件设计体系建设思路研究[J]. 航空科学技术, 2019,30(4):21-25.
LI S L, HUANG N, DONG H L, et al. Research on construction proposals of Aero-engine general parts design system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019,30(4):21-25.

[5] SHUN T, SANKAR S. An approach to evaluate the profitability of component commonality[J]. Journal of Mechanical Design, 2017,139(7): 074501.

[6] DEZA A, HUANG K, LIANG H F, et al. On component commonality for periodic review assemble-to-order systems[J]. Annals of Operations Research, 2018, 265(1): 29-46.

[7] 张志华. 可靠性理论及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 15-17.
ZHANG Z H. Reliability theory and engineering application[M]. Beijing: Science Press,2012: 15-17.

[8] SHERBROOKE C C. VARI-METRIC: improved approximations for multi-indenture, multi-echelon availability models[J]. Operations Research, 1986, 34(2): 311-319.

[9] SHERBROOKE C C. Optimal inventory modeling of systems: multi-echelon techniques[M]. London: Springer, 2004.

[10] SIGRID L N. Finding and identifying optimal inventory levels for systems with common components[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 193(1): 98-119.

[11] MA S H, WANG W, LIU L M. Commonality and postponement in multistage assembly systems[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 142(3): 523-538.

[12] LAURA T, JOERN M. Spare parts inventory management: new evidence from distribution fitting[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 273(1): 118-130.

[13] TOPAN E, VAN D H. Operational level planning of a multi-item two-echelon spare parts inventory system with reactive and proactive interventions[J]. European Journal of Operational Research,2020,284(1):164-175.

[14] DOUNIEL L I, BASTEN R, VAN H G. Spare parts inventory control under a fixed-term contract with a long-down constraint[J]. International Journal of Production Economics, 2020,219: 123-137.

[15] ZHU S, JAARSVELD W V, DEKKER R. Spare parts inven-

- tory control based on maintenance planning[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2020, 193: 106600.
- [16] BOUTSELIS P, MCNAUGHT K. Using Bayesian networks to forecast spares demand from equipment failures in a changing service logistics context[J]. International Journal of Production Economics, 2019, 209(3): 325–333.
- [17] 冯蕴雯, 刘奎剑, 薛小锋, 等. 基于 Markov 过程的冗余系统备件与冗余度联合优化[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(4): 921–930.
- FENG Y W, LIU K J, XUE X F, et al. Joint optimization of redundancy level and spare parts for redundant system based on Markov process [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(4): 921–930.
- [18] RUPE J, WAY K. Performability of systems based on renewal process models[J]. IEEE Trans. on Systems Man Cybernetics-Systems, Part A, 1998, 28(5): 691–698.
- [19] NAHMAN J M, TANASKOVIC M R. Probability models for optimal sparing of distribution network transformers[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2009, 24(2): 758–763.
- [20] BABAI M Z, CHEN H, SYNTETOS A A, et al. A compound-Poisson Bayesian approach for spare parts inventory forecasting[J]. International Journal of Production Economics, 2021, 232: 107954.
- [21] ZHAO J B, CAI Z Q, SI W T, et al. Mission success evaluation of repairable phased-mission systems with spare parts[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 132(6): 248–259.
- [22] 程海龙, 康锐, 韦艺, 等. 备件满足率与备件短缺量对比分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(5): 580–583.
- CHENG H L, KANG R, WEI Y, et al. Comparison analysis of fill rate and backorder[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 580–583.
- [23] 张志华, 应新雅, 费广玉. 串联系统备件满足率分配及配置优化[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(11): 2987–2992.
- ZHANG Z H, YING X Y, FEI G Y. Series system spares fill rate allocation and optimization [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35(11): 2987–2992.
- [24] 张建军, 李树芳, 张涛, 等. 备件保障度评估与备件需求量模型研究[J]. 可靠性与环境适应性理论研究, 2004(6): 18–22.
- ZHANG J J, LI S F, ZHANG T, et al. Study on spare availability and optimization model[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2004(6): 18–22.
- [25] WEN M L, LU B H, LI S Y, et al. Location and allocation problem for spare parts depot on integrated logistics support[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, 30(6): 1252–1259.
- [26] SAMUEL V C, SILVA G L C, LU D, et al. A demand classification scheme for spare part inventory model subject to stochastic demand and lead time[J]. Production Planning & Control, 2015, 26(16): 1318–1331.
- [27] RODRIGUES L R, YONEYAMA T. A spare parts inventory control model based on prognostics and health monitoring data under a fill rate constraint[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 148: 106724.
- [28] HASNI M, AGUIR M S, BABAI M Z, et al. Spare parts demand forecasting: a review on bootstrapping methods [J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(15–16): 4791–4804.
- [29] HASNI M, BABAI M Z, AGUIR M S, et al. An investigation on bootstrapping forecasting methods for intermittent demands[J]. International Journal of Production Economics, 2018, 209(3): 20–29.
- [30] HASNI M, AGUIR M S, BABAI M Z, et al. On the performance of adjusted bootstrapping methods for intermittent demand forecasting[J]. International Journal of Production Economics, 2019, 216: 145–153.
- [31] 邵松世, 张志华, 李华, 等. 正态型有寿件的备件方案确定方法[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 193–198.
- SHAO S S, ZHANG Z H, LI H, et al. Determination method for support plan for life-limited spares with normal distribution[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 193–198.
- [32] 刘任洋, 李庆民, 王慎, 等. 任意寿命分布单元表决系统备件需求量的解析方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(3): 714–718.
- LIU R Y, LI Q M, WANG S, et al. Analytical algorithm of spare demand for voting system of any life distribution units[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(3): 714–718.
- [33] 茆诗松, 程依明, 濮晓龙. 概率论与数理统计教程[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 168–169.
- MAO S S, CHENG Y M, PU X L. Probability theory and mathematical statistics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2019: 168–169.

作者简介

徐立(1987—),男,讲师,博士,主要研究方向为装备综合保障建模与仿真、保障资源规划。

阮旻智(1983—),男,讲师,博士,主要研究方向为装备综合保障建模。

李华(1972—),男,副教授,博士,主要研究方向为装备综合保障建模与仿真。