

文章编号:1000-6893(2008)05-1163-05

# 备件需求产生、传播及解析算法研究

王乃超, 康锐

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100191)

## Research on Spare Demand Generation, Transfer and Analytical Algorithm

Wang Naichao, Kang Rui

(Department of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**摘要:** 研究了备件需求产生、传播过程及解析计算方法。首先,分析了影响备件需求的主要因素,对装备维修需求和备件需求之间的关系进行了论述;然后,针对修复性维修备件需求和预防性维修备件需求在复杂系统中的传播过程进行了阐述,给出了两类备件需求的合成计算方法;最后,应用研究结论进行备件需求量预测,并用仿真软件对预测结果进行分析,验证了分析方法的可行性与合理性。

**关键词:** 备件; 需求分析; 传播; 影响因素分析; 解析计算

**中图分类号:** V215.7      **文献标识码:** A

**Abstract:** Spares demand rate is an important factor affecting the number of spares required and is a vital parameter in spares inventory calculation models. However, little work was focused on the spares demand analysis using systematic procedures. This paper addresses the issue of analyzing spares demand generation, transfer and analytical algorithm in multi-echelon maintenance support organizations with the purpose of developing an effective spare demand rate calculation method. First, the factors affecting spares demand are analyzed and the relationship between maintenance requirement and spares demand is discussed. Then the spares demand transfer process of corrective maintenance and preventive maintenance between each two of the multi-echelon maintenance support organizations is expatiated. The method of how to incorporate two aforementioned types of demand in spares inventory calculation models is also given. In the end, based on the research conclusion, the spares stock project is given in a numerical study which is tested by computer simulation. Simulation result shows that the algorithm works well and so, the feasibility and rationality of the analytical method are validated.

**Key words:** spare; demand analysis; transfer; influencing factors analysis; analytic algorithm

备件是重要的维修保障资源,其需求量的准确预测对于保证装备战备完好能力和任务持续能力要求,降低备件采购、管理费用有重要意义。目前,装备使用过程中备件需求量预测主要有以下两类方式:一种是经验法,根据以往装备使用过程中备件消耗的情况和经验,以及装备的使用要求预测备件需求数量;一种是模型法,根据备件的寿命分布采用相应的计算模型计算备件的需求量。较为常用的备件需求量预测模型如表 1 所示。

从表 1 可以看出,需求率是备件预测模型中的重要参数,其分析预测结果对于备件需求预计值有非常重要的影响;从对相关文献的查阅可以得出:很少有文献对备件需求的产生、传播及解析

表 1 备件需求量计算模型及其主要参数

Table 1 Main parameters in spare demand calculation model

模型名称	模型中的主要参数
METRIC <sup>[1]</sup>	备件需求率、周转时间、备件价格
VARI-METRIC <sup>[2]</sup>	备件需求率、周转时间、备件价格
保障概率模型	备件需求率
边际效应分析法	备件需求率、备件价格
经济定货量模型	备件需求率、订货时间、备件价格

算法进行深入的研究;更多的文章侧重于从模型角度改进预测方法,如文献[3-13]。为解决上述问题,本文首先分析了备件需求产生原因及影响备件需求的主要因素,然后给出了复杂层次系统内部各层次之间及层次内部备件需求传播过程及计算方法,最后,运用备件保障概率模型给出了计算备件需求量的案例,并用仿真对备件方案进行分析和评价。

收稿日期:2007-08-06; 修订日期:2007-11-12  
通讯作者:王乃超 E-mail: tian\_jia\_zhuang@sina.com

## 1 备件需求及其影响因素分析

产品备件需求主要由以下几方面的主要因素构成:①故障产品更换;②错误的非故障产品更换;③预防性维修产品更换。影响备件需求的因素很多,主要分为 5 类,如图 1 所示。



图 1 备件需求影响因素

Fig. 1 Factors influencing spares demand

图 1 中设计特性包括:装备及产品可靠性、维修性、系统中产品数目等;维修方案包括:采用的维修级别、维修策略、各级别维修工作等;使用方案包括:装备任务、部署编排、使用方式等;环境因素包括<sup>[14]</sup>:温度、湿度、灰尘、盐雾、辐射等;其他因素包括:要求的备件保障概率、使用与维修人员技能水平及其他不可预知因素,例如:战损、战伤等。在和平时期、正常使用条件下,着重考虑装备的可靠性、维修性、保障性对备件需求的影响。

## 2 备件需求层次性分析与计算

备件需求主要由维修需求引起,其特点由维修活动的统计规律决定。维修活动根据其特点可以分为修复性维修活动和预防性维修活动。因此,备件需求分为两种类型:随机性备件需求和周期性备件需求。随机性备件需求是由修复性维修引起的,可用泊松过程描述;周期性备件需求是由预防性维修引起的,可用伯努力利程描述。

备件需求强度可用备件需求率表示。备件需求率和系统(或产品)的维修频率密切相关,但维修频率不等于备件需求率。某些情况下故障系统或产品的修复可以通过直接维修完成,而非换件维修。

备件需求根据其发生、发展、传播及其被满足过程从宏观到微观可以从维修保障站点、系统(装备)、产品 3 个层次进行论述。

### 2.1 维修保障站点备件需求

维修保障站点是维修保障组织的组成要素,是装备部署、维修以及备件存放的场所。确定产品在保障站点的备件需求量,需要描述保障站点的备件需求过程。

根据维修保障站点在保障组织中所处位置和作用可以构建维修保障组织结构图,抽象构造出来的维修保障组织结构通常如图 2 所示。

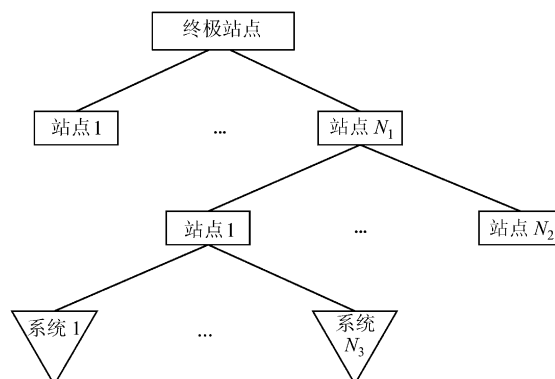


图 2 维修保障组织结构图

Fig. 2 Structure of maintenance support organizations

图 2 从上到下可以分为 4 层:第 1 层是终极保障站点,任何到达终极站点可修复产品都会被修复,不可修复产品会被废弃并向生产厂家发出订购需求;第 2 层是中继级站点,它们接受上级站点提供的备件和维修保障服务,并向下级站点提供备件和维修保障服务;第 3 层是外场级站点,它们接受中继级站点提供的备件和维修保障服务,并直接面向装备提供备件和维修保障服务;第 4 层是装备部署和使用地点。在保障组织结构图中,各层次站点构成保障层面上的父子关系。

当维修需求输入站点时,站点根据其维修能力对输入的维修需求进行相应处理。如果站点只能处理一部分输入的维修需求,那么没有被满足部分会继续向上传送直到需求满足为止。被处理的维修需求在当前站点会引起 3 种类型的备件需求:①故障产品自身备件需求;②故障产品中子产品备件需求;③不需要备件。输入某一保障站点的备件需求是和此站点相关的所有子站点备件需求之和。令  $J$  表示站点集,  $|J| \geq 0$ , 站点  $j$  的所有子站点构成的集合为  $J_j^s, |J_j^s| \geq 0$ 。

$$D_j^r = \sum_{j_s \in J_j^s} D_{j_s}^r \quad (1)$$

$$D_j^c = \sum_{j_s \in J_j^s} D_{j_s}^c \quad (2)$$

式中:  $D_j^r$  为站点  $j$  的随机性备件需求,  $j \in J$ ;  $D_j^c$  为站点  $j$  的周期性备件需求,  $j \in J$ ;  $D_{j_s}^r$  为子站点  $j_s$  的随机性备件需求,  $j_s \in J_j^s$ 。

在各维修站点是否产生备件需求与在此站点采取的维修工作类型密切相关。如,采取直接维修,不会产生备件需求,而采取换件维修则会产生

备件需求;而且更换下来的一个或多个故障子产品可能会在本地维修,也可能会送到更高级别站点维修,可能会在高级别站点产生新的备件需求。

## 2.2 系统层次备件需求

系统层次备件需求是指从系统整体角度考虑系统维修和系统需求,把整个系统作为备件储备。而系统整体作为备件储备只能是名义上的,因为这样做会带来巨额的采购费用及保管维护费用。系统层次备件需求的满足往往是通过满足系统自身需求来实现,例如:更换装备中的故障外场可更换单元(LRU)实现装备的修复。在装备维修过程中,更换下来故障产品会产生维修需求并沿着保障组织从下到上在保障站点之间传播,直到所有维修需求被满足为止;在维修需求被逐步满足过程中,各个保障站点中被满足部分的维修需求可能会在当前站点引发备件需求,也可能不会引发备件需求,具体情况需要根据故障件的故障模式和维修保障站点的维修能力而定。

## 2.3 产品层次备件需求

产品层次备件需求是指装备中部件或者子部件的备件需求,这其中LRU、车间可更换单元(SRU)、可报废单元(DU)是最为常用的3类部件,它们的备件需求占据系统备件需求的绝大部分。产品层次备件需求主要从修复性维修备件需求和预防性维修备件需求两方面进行论述。

### (1) 修复性维修备件需求

#### ① 换件维修

在维修站点中对产品或子产品进行更换维修活动会在本地站点或其他站点引起维修需求,从而可能会引起备件需求。从理论上讲,产品故障率=产品换件维修频率;但在某些情况下,由于故障定位不准确导致在同一修理工作中对非故障产品的误拆或由于其他产品故障引发当前产品发生从属故障,出现多个故障产品或故障子产品需要进行更换情况,此时“产品维修率≠产品故障率”,这种情况可以用拆卸率因子 $R$ 表示。 $R$ 表示故障产品(或故障子产品)被更换的比例,在故障定位准确或不发生从属故障或不存在维修人员误动作情况下, $R=1$ ;而在故障定位不准或发生从属故障和维修人员误动作情况下, $R>1$ 。故障定位不准和维修人员误动作会导致在单个子产品发生故障情况下多个子产品被更换;从属故障和维修

人员误动作发生时会有多个子产品同时发生故障,需要对这些故障产品进行更换。当 $R>1$ 时,更换下来的所谓故障产品送到维修站,经检测确实发生故障则会被维修,否则会送入备件库作为备件使用。单个站点换件维修备件需求率计算公式为

$$D_R = \lambda \cdot Q_n \cdot Q_s \cdot U \cdot R \quad (3)$$

式中: $D_R$ 为产品的修复性维修备件需求率; $\lambda$ 为产品故障率; $Q_n$ 为单机安装数; $Q_s$ 为站点中使用的装备数量; $U$ 为产品利用率因子; $R$ 为拆卸率因子。

#### ② 直接维修

直接维修不会产品备件需求,因为直接维修不是通过更换故障子产品来恢复系统(或产品)的正常状态,例如:由于SRU松动造成LRU故障,可以通过固定SRU来修复。

### (2) 预防性维修备件需求

令 $P$ 表示预防性维修工作项目集, $|P| \geq 0$ 。则单个站点产品预防性维修活动备件需求率为

$$D_C = \sum_{p \in P} f_c \cdot Q_n \cdot Q_s \cdot U \cdot R_c \quad (4)$$

式中: $D_C$ 为产品预防性维修备件需求率; $f_c$ 为单个预防性维修项目的工作频率; $R_c$ 为产品预防性维修更换比率。

$f_c$ 的计算方法如下:

如果MTBPM按照装备使用时间计算

$$f_c = \frac{1}{\text{MTBPM}}$$

如果MTBPM按照日历时间计算

$$f_c = \frac{1}{\text{MTBPM} \cdot U}$$

## 3 备件需求量计算

产品总的备件需求是产品修复性维修备件需求和预防性维修备件共同作用的结果。计算修复性维修备件需求量常用的计算模型是泊松分布计算模型,它在工程实践中得到了广泛的应用,一般来说,指数型寿命分布适用与电子产品、复杂系统及经老练试验并进行定期维修的产品,而寿命分布为指数分布的产品在计算备件数量时使用的模型为泊松分布。泊松分布备件计算模型为<sup>[15]</sup>

$$P(n) = \exp(-Dt) \sum_{X=0}^n \frac{(Dt)^X}{X!} \quad (5)$$

式中: $D$ 为备件需求率; $X$ 为备件需求量; $n$ 为备件储备量; $t$ 为备件周转时间。

根据预防性维修备件需求特点,可以用伯努

利分布模拟其备件需求过程

$$P(n) = \begin{cases} 1-q & n = k \\ q & n = k+1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

给定需求量均值  $m$  时,  $k$  和  $q$  的确定方法为

$$k \leq m < k+1$$

$$m = q + k$$

式(6)表示备件需求量为  $k$  的概率为  $1-q$ ; 需求量为  $k+1$  的概率为  $q$ ; 而需求量为其他值时概率为 0。

综合上述两种备件需求, 运用卷积定理可以得出备件需求量计算模型为

$$P(n) = (1-q) \cdot \exp(-\lambda t) \times \sum_{X=0}^{n-k} \frac{(\lambda t)^X}{X!} + q \cdot \exp(-\lambda t) \sum_{X=0}^{n-k-1} \frac{(\lambda t)^X}{X!} \quad (7)$$

根据式(7)就可以在考虑装备修复性维修和预防性维修情况下达到规定的备件保障概率所需储备的备件库存量。

#### 4 实例分析

假设某系统在使用外场部署数量为 48, MT-BF 为 53.3 h, 年计划利用率为 0.2。产品相关数据如表 2 所示。

表 2 产品数据表  
Table 2 Data of items

产品名称	父产品名称	故障率/ $10^{-6}h^{-1}$	周转时间/h	数量/系统	利用率
LRU1	SY	2 500	120	2	0.9
LRU2	SY	4 250	120	3	0.9

系统预防性维修工作相关数据如表 3 所示。

表 3 预防性维修数据表  
Table 3 Data of preventive maintenances

名称	间隔时间/h	更换概率/%	维修工作	更换数量
PM1	50	30	更换 LRU1	1
PM2	150		更换 LRU2	2

#### 4.1 备件需求率计算

根据表 1 和表 2 中数据, LRU1 修复性维修频率:  $D_r^1 = 2\,500 \times 10^{-6} \times 2 \times 0.9 \times 48 \times 0.2 = 0.043$  (次/h); LRU1 预防性维修频率:  $D_c^1 = \frac{1}{50} \times 2 \times 0.9 \times 48 \times 0.2 \times 30\% = 0.104$  (次/h); 那么, LRU1 在修复性维修中备件需求率为 0.043 (个/

h), 在预防性维修中的备件需求率为 0.052 (个/h), 总的备件需求率为:  $0.043 + 0.052 = 0.095$  (个/h)。同理, 可以计算 LRU2 的备件需求率, 如表 4 所示。

表 4 需求率计算结果表

Table 4 Calculation results of demand rate

产品名称	维修类型	需求率	总需求率
LRU1	修复性维修	0.043	0.095
	预防性维修	0.052	
LRU2	修复性维修	0.110	0.144
	预防性维修	0.034	

#### 4.2 需求量计算及仿真验证

设要求的备件保障概率为 0.95, 所需备件数量计算结果如表 5 所示。

表 5 备件库存方案表

Table 5 Scenario of spares inventory

	保障概率	库存方案	
库存方案	0.95	LRU1	17
		LRU2	25

建立系统任务并用 SIMLOX<sup>®</sup> 进行仿真, 结果如图 3 所示。

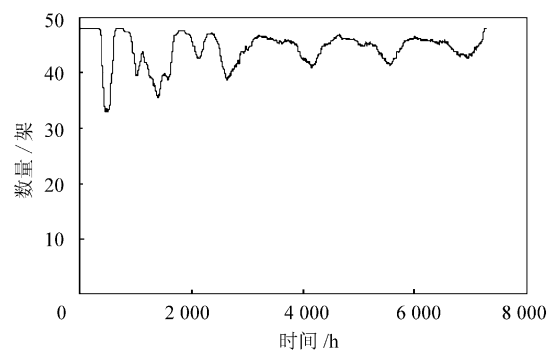


图 3 系统可用数量

Fig. 3 Available numbers of systems

从仿真数据可以看出, 在备件保障概率为 0.95 时, 仿真得出系统平均可用度为 0.92。备件相关数据如表 6 所示。

表 6 备件相关数据

Table 6 Relevant data of spares

产品名称	平均库存量	短缺风险	延期交货量
LRU1	2.16	0.427 8	2.179 8
LRU2	6.63	0.441 6	2.474 4

从表6中数据可以看出,虽然库存短缺风险较高,但平均的备件延期交货量较低(相对于备件库存量),因此,计算所得备件方案较好地满足了装备保障需求。

## 5 结 论

备件需求率是备件需求强度的表现,也是计算备件需求量的重要参数。装备设计特性及使用与维修方案都是影响备件需求的重要因素。了解并掌握影响备件需求产生机理及其传播过程对于准确计算备件需求率非常重要。在此基础上采用适当的方法进行备件需求量预测,能够给出较为满意的备件保障方案。

## 参 考 文 献

- [1] Sherbrooke C C. METRIC: a multi-echelon technique for recoverable item control [J]. *Operations Research*, 1968, 16(1): 122-141.
- [2] Sherbrooke C C. VARI-METRIC: improved approximation for multi-indenture, multi-echelon availability models [J]. *Operations Research*, 1986, 34(2): 311-319.
- [3] Siddiqi A, de Weck O L. Spare parts requirements for space missions with reconfigurability and commonality [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2007, 44(1): 147-155.
- [4] Lau H C, Song H, 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.
- [5] Wong H, van Houtum G J, Cattrysse D, et al. Multi-item spare parts systems with lateral transshipments and waiting time constraints [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171(3): 1071-1093.
- [6] Ghodrati B, Kumar U. Operating environment-based spare parts forecasting and logistics: a case study [J]. *International Journal of Logistics: Research and Application*, 2005, 8(2): 95-105.
- [7] Sung C S, Kim S H. Analysis of a multi-part spares inventory system subject to ambiguous fault isolation [J]. *The Journal of the Operational Research Society*, 2001, 52(4): 418-432.
- [8] Axsater S. Exact analysis of continuous-review (R, Q) policies in two-echelon inventory systems with compound Poisson demand [J]. *Operations Research*, 2000, 48(5): 686-696.
- [9] Wu K S, Ouyang L Y. A replenishment policy for deteriorating items with ramp type demand rate [J]. *Proc Natl Sci Counc ROC: A serie*, 2000, 24(4): 279-286.
- [10] Alfredsson P. Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with simultaneous location of repair facilities [J]. *European Journal of Operational Research*, 1997, 99(3): 584-595.
- [11] Moinszadeh K, Lee H L. Batch size and stocking levels in multi-echelon repairable systems [J]. *Management Science*, 1986, 32(12): 1567-1581.
- [12] Graves S C. A multi-echelon inventory model for a repairable item with one-for-one replenishment [J]. *Management Science*, 1985, 31(10): 1247-1256.
- [13] Muchstadt J A. A model for a multi-item, multi-echelon, multi-indenture inventory system [J]. *Management Science*, 1973, 20(4): 472-481.
- [14] 张恒喜,朱家元,郭基联,等. 军用飞机型号发展工程导论 [M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- Zhang Hengxi, Zhu Jiayuan, Guo Jilian, et al. Introduction to airplane model development engineering [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [15] 贺国芳. 可靠性数据处理与寿命评估 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1991.
- He Guofang. The management of reliability data and life-span evaluation [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1991. (in Chinese)

### 作者简介:

王乃超(1978—) 男,博士研究生。主要研究方向:综合后勤保障工程。

Tel:010-82338236-8011

E-mail: tian\_jia\_zhuang@sina.com

康锐(1966—) 男,教授,博士生导师。主要研究方向:可靠性系统工程和工程系统工程。

E-mail: kangrui@buaa.edu.cn

(责任编辑:李铁柏)