备件满足率与备件短缺量对比分析

程海龙 康 锐 韦 艺 曲丽丽

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

摘 要: 针对备件供应规划中选用何种部件级的供应保障效能度量参数的问题,从满足率和短缺量两参数的产生根源入手,分析二者的数学含义、物理意义、实际使用中获取的难易程度以及同系统级效能度量参数的关系,进而得到二者的区别及联系. 通过具体的案例应用,在METRIC模型寻优方法基础上,考虑费用的影响,对比并验证备件满足率和备件短缺量的适用范围. 结果表明,备件短缺量在完成供应规划目标上优于备件满足率,而备件满足率易于衡量备件供应中管理水平的优劣.

关 键 词: 备件; 满足率; 短缺量; 对比分析

中图分类号: V 215

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)05-0580-04

Comparation analysis of fill rate and backorder

Cheng Hailong Kang Rui Wei Yi Qu Lili

(Dept. of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem that how to choose the part level measuring parameter of supply support efficiency in spare supply provisioning, the mathematics means, physics means, the obtaining difficulty in practical use and the relationship of the same systemic efficiency measuring parameter of the fill rate and backorder based on the origin of the two parameters were analyzed, and then the difference and the contact of the two were observed. The application range of the fill rate and backorder was compared and validated through the application case, which is based on the METRIC model with the considering of the cost affection. The results show that the spare backorder is more exceeding than the spare fill rate in achieving the supply programming, while the spare fill rate is better in scaling the management of spare supply.

Key words: spare part; fill rate; backorder; compare analysis

美军自上世纪50年代关注备件问题始,提出了一系列的备件配置和预测优化模型,从最初的泊松过程模型到边际效应分析法,再到以METRIC为基础的各类预测模型[1-3];而国内学者也进行了相应的研究,文献[4]从备件保障概率等部件级参数入手,考虑了备件在多级站点间的优化配置问题,这些模型为准确规划备件供应提供了可能,使得备件预测由最初的经验判断,到单级站点的单项备件预测,单级站点的多项备件预测,再到多级站点的多项备件预测成为可能. 在多部件系统的备件配置中,所有模型都不可避免地需要考虑部件级的保障效能参数(备件满足率[4]和备件短缺量[5])与系统级效能参数(可用度)的关系,往往认为备件短缺量和备件满足率是互补或简单对应的关系,对于究竟选用哪种部件级效能参数、两种参数的实际物理意义以及两者间的相互联系如何存在考虑较少,影响了对备件预测模型的正确理解和合理使用. 针对这种问题,本文主要以需求率较低费用较高,且在备件供应规划中起主要作用的可修件为研究对象,在$(s-1,s)$[3]库存策略下,从库存经典公式入手,对备件短缺量和备件满足率这两种部件级效能参数的数学含义、物理

收稿日期: 2007-04-29

作者简介: 程海龙(1981—),男,河南濮阳人,博士生,cheng.hailong@163.com.

意义、实际获取的难易程度、二者的相互联系,以及对系统级效能参数的影响出发,分析二者的区别与优劣,并给出按两种部件级效能参数进行备件优化配置的实例.

1　备件满足率和备件短缺风险

1.1　基本概念

备件满足率 FR(Fill Rate):当需要备件时,备件需求被满足的概率[3];备件短缺量 BO(backorder):在规定的时间内,持续的备件需求未被满足的次数[3].由定义可知,前者仅考虑某一时间点上备件需求是否被满足的问题,而后者则综合考虑了一段时间内备件需求的变化情况.

1.2　FR,BO 的物理意义和相互关系

$(s-1,s)$库存策略,即当装备上某个部件出现故障后,立即将故障件送修,如果该部件存有备件,立即予以更换,更换时间忽略不计,如果没有备件,则装备因供应延误导致停机,等待故障件修复返回后装备重新开始运行.在这种策略下,存在一个经典的库存数量守恒函数,即

$$s = S_{OH} + S_{DI} - S_{BO} \tag{1}$$

式中,s 为初始库存量;S_{OH}为现有库存量;S_{DI}为在修或再供应的备件数量;S_{BO}为备件短缺量.

由式(1)知,备件规划中备件需求被满足,抑或是不能满足从而产生备件短缺量,根源问题都在于 S_{DI}值是否达到初始库存量,即 FR 与 BO 是密切相关的;但 FR 仅仅衡量当备件需求发生时,该需求是否得到满足,而 BO 则不仅衡量缺货量,而且考虑缺货的持续时间问题,因此二者的关系并不是简单的此消彼长.通常情况下,当站点的初始库存量减小时,满足率会较低,而短缺量会较高;但如果站点的修复能力较强或修复及时,也可以使得满足率较低,而短缺量不出现显著的变化,这是因为短缺量的大小不仅取决于备件库存量的多少,还与持续时间有关.但对于站点来说,既有较高的 FR,同时 BO 又较高的情况是不会出现的,因为当 S_{BO}较高时,站点的 S_{OH}一定较小,则满足率一定会变小.

如图 1 所示,图 1a 为某一站点一年的备件变化情况,其中备件的修复率为 4 个/年,修复工作从 0.5 年时开始.初始库存量为 1 个,0.15 年时出现第一次备件需求,0.25 年时出现第二次备件需求,0.5 年时出现第三次备件需求.则对应的 FR 为 33%(由定义知,一年内出现 3 次备件需求,仅满足 1 次);BO 为 1(由定义知,即为阴影部分的面积,$(0.25\times1+0.25\times2+0.25\times1)/1=1$).图 1b 修复率变为 8 个/年,其他条件不变,则对应的 FR 不变,而 BO 变为 $0.625((0.25\times1+0.125\times2+0.125\times1)/1=0.625$,即为阴影部分的面积),图 1b 较图 1a 的 BO 值变小,而 FR 值未变.因此,BO 需要考虑某一时间段对于备件需求的影响问题.

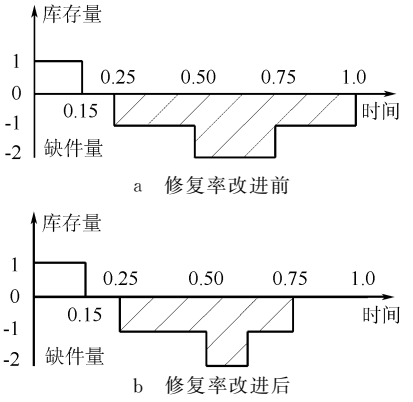


图 1　修复率改进前后的短缺量示例图

1.3　FR,BO 函数的由来

在式(1)中,当 S_{DI}的值小于初始库存量 s 时,即现有库存中还有可用备件,如果此时,系统发生故障产生新备件需要,则这个需求可被满足;反之,当 S_{DI}的值大于或等于初始库存量 s 时,即现有库存中没有可用备件,则会相应地产生缺件情况,即产生 BO.

1)期望备件满足率 EFR(Expected Fill Rate):备件满足率的均值函数,是考虑 $S_{DI}<s$ 时的备件需求分布函数的结果,即为

$$E_{FR}(s) = P\{S_{DI}=0\} + \cdots + P\{S_{DI}=s-1\} = P\{S_{DI}\leqslant s-1\} \tag{2}$$

上式需要考虑边界条件,当库存量 s 为 0 时,FR 应为 0,因为此时备件的需求不可能得到满足.

2)期望备件短缺量 EBO(Expected Backorder):当 S_{DI}值为 $s+k$ 时,由经典库存公式可知,产生数量为 k 的缺货量,即短缺量应为 k,此时考虑 $S_{DI}>s$ 时的备件需求分布函数的结果,即为期望短缺量:

$$E_{BO}(s) = P\{S_{DI}=s+1\} + 2P\{S_{DI}=s+2\} + \cdots = \sum_{x=s+1}^{\infty}(x-s)P\{S_{DI}=x\} \tag{3}$$

1.4　EBO,EFR 同系统可用度的关系

库存管理人员往往更喜欢备件满足率,因为它易于统计,仅需要知道当备件需求产生时,是否有可用的备件即可.而且对于装备系统来说,满足率的量化值看起来更有意义,因为对于系统来说,

库存管理人员明确地知道多大满足率能够使得使用和维修人员感到满意,而低于某值的满足率则会让使用人员产生抱怨.相反的,期望短缺量的计算则较为复杂,需要记录持续时间内备件短缺量,并进行统计分析,而且库存管理人员并不知道到底多小的BO值能够令人满意,但期望短缺量的值却与系统的可用度有着直接的关系,系统管理人员往往更喜欢确切的BO值,具体如下.

1.4.1 系统可用度(availability)

系统可用度是装备在任一随机时刻需要和开始执行任务时,处于可工作或可使用状态的程度.衡量系统效能时,常常将使用可用度 A_o 作为参数.A_o 是与工作时间、修复性维修、预防性维修时间和保障延误时间有关的一种可用性参数;文中将使用可用度分解为仅与维修策略有关的可达可用度 A_a 和仅与备件库存、供应保障有关的可用度 A_s,为方便描述,称之为供应可用度.进而针对供应可用度同EBO,EFR的关系进行分析.可用度的公式如下:

$$1/A_o = 1/A_a + 1/A_s - 1 \tag{4}$$

$$A_s = \frac{T_{\mathrm{MTBF}}}{T_{\mathrm{MTBF}} + T_{\mathrm{MSD}}} \tag{5}$$

式中 T_{MSD} 为平均保障延误时间.

1.4.2 EBO同供应可用度 A_s 的关系

$$A_s = 100\prod_{i=1}^{I}\{1 - E_{\mathrm{BO}_i}(s_i)/(NZ_i)\}^{Z_i} \tag{6}$$

式中,$E_{\mathrm{BO}_i}(s_i)$ 为可修单元 i 的期望备件短缺量;Z_i 为系统中可修单元 i 的数量;N 为系统数量;I 为系统包含的所有可修单元.

经幂级数展开化简,有

$$\log(A_s/100) = \sum_{i=1}^{I} Z_i \log\{1 - E_{\mathrm{BO}_i}(s_i)/(NZ_i)\} \cong -\sum_{i=1}^{I} E_{\mathrm{BO}_i}(s_i)/N$$

由上式知,系统各部件EBO值的和最小,对应着系统的最大供应可用度,因此在规划备件供应时,可根据部件级的备件短缺量合理权衡系统可用度的大小,而不需要统计诸如 T_{MTBF},T_{MSD} 等时间因素的影响.

1.4.3 EFR同供应可用度 A_s 的关系

文献[1-3]仅指出EFR可通过备件短缺量的变化同可用度相关联,而未明确EFR同供应可用度有直接的函数关系;但目前国内有研究[4]表明可以通过部件级的备件满足率得到系统级的备件满足率,进而在系统一级通过式(4)同可用度相关联:

$$\left.\begin{aligned} R_{\mathrm{FR}} &= \sum_{i=1}^{I} R_{\mathrm{EFR}_i}(s_i) \times (m_i T) \Big/ \sum_{i=1}^{I} (m_i T) \\ T_{\mathrm{MSD}} &= (1 - R_{\mathrm{FR}}) \times T_{\mathrm{MSRT}} \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

式中,R_{FR} 为系统级备件满足率;$R_{\mathrm{EFR}i}(s_i)$ 为可修单元 i 的备件满足率;m_i 为可修单元 i 的需求率,通常用故障概率代替;I 为系统包含的所有可修单元;T_{MSRT} 为平均供应延误时间.

由式(5)和式(7)可知,系统各部件的EFR值越大,则系统可用度越大,但在实际使用中,并没有 R_{FR} 这个参数,没有相应的实际物理意义,该公式的正确性并没有经过外场的实际使用数据作为检验;另外,在计算系统使用可用度时,还必须得到供应延误时间和平均故障间隔时间的数据,因此应用时有一定难度.

2 案例分析

某系统由LRU(Line Replaceable Unit)1和LRU2构成,它们同等重要,其中LRU1的故障率为0.002/h,单价为5万元,LRU2的故障率为0.008/h,单价为1万元,周转时间均为500 h,在20万元的经费预算下,该如何规划备件策略?在$(s-1,s)$的库存策略下,考虑备件费用,结合边际效应分析法[3],分别以BO和FR为约束,给出备件供应策略,并对结果进行分析.

按EBO进行规划,结果如表1所示,在20万元的费用预算下,备2个LRU1和7个LRU2,总费用为17万元;按EFR进行规划,结果如表2所示,在20万元的费用预算下,备3个LRU1和5个LRU2,总费用为20万元.不仅规划过程有较大区别,两种约束下的备件规划问题是否都适用边际效应分析法也值得探讨.

表1 结合EBO的边际分析结果

s	LRU1		LRU2	
	$E_{\mathrm{BO}}(s)$	$[E_{\mathrm{BO}}(s-1)-E_{\mathrm{BO}}(s)]/c$	$E_{\mathrm{BO}}(s)$	$[E_{\mathrm{BO}}(s-1)-E_{\mathrm{BO}}(s)]/c$
0	1		4	
1	0.3679	0.1264	3.0183	0.9817
2	0.1036	0.0529	2.1099	0.9084
3	0.0233	0.0161	1.3480	0.7619
4	0.0043	0.0038	0.7815	0.5665
5	0.0007	0.0007	0.4103	0.3712
6	0.0001	0.0001	0.1954	0.2149
7	0		0.0848	0.1106
8	0		0.0336	0.0512
9	0		0.0123	0.0213
10	0		0.0041	0.0082

表1中,共经历9次调整,*LRU*1和*LRU*2的*EBO*变化量同单价的比值均成递减的趋势(即第

3 列和第 5 列所示),符合边际效应分析中凸函数的前提,故在备件规划的过程中,可以得到较优的结果;表 2 中,共经历 8 次调整,其中 *LRU*2 的 *EFR* 变化量同单价的比值并不是单调变化的,为先增后减(第 5 列所示),即 *EFR* 的变化函数不是凸函数,在边际效应法寻优过程中可能会出现偏差,因此需要寻找更为适用的方法或在边际效应法的基础上进行修正,显然在某些情况下,*EFR* 不适用边际效应分析法.

表 2　结合 EFR 的边际效应分析结果

s	LRU1		LRU2	
	$E_{FR}(s)$	$[E_{FR}(s-1)-E_{FR}(s)]/c$	$E_{FR}(s)$	$[E_{FR}(s-1)-E_{FR}(s)]/c$
0	0		0	
1	0.3679	0.0736	0.0183	0.0183
2	0.7358	0.0736	0.0916	0.0733
3	0.9197	0.0368	0.2381	0.1485
4	0.9810	0.0123	0.4335	0.1954
5	0.9963	0.0031	0.6288	0.1953
6	0.9994	0.0006	0.7851	0.1563
7	0.9999	0.0001	0.8893	0.1042
8	1	0	0.9489	0.0596
9	1	0	0.9786	0.0297
10	1	0	0.9919	0.0133

根据以上分析,*FR* 在费用约束下的调整结果未必最优,且其对应的系统可用度需要其它的时间参数,因此结合式(5)～式(7),仅给出 *BO* 约束下的系统供应可用度的变化图 2.

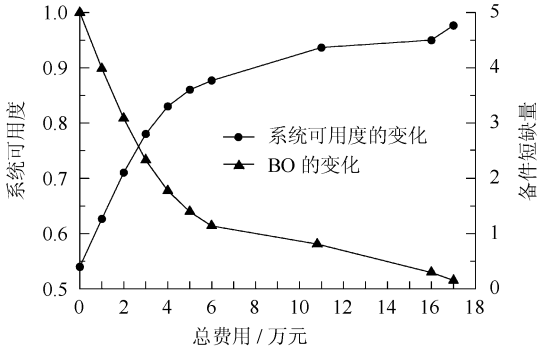


图 2　EBO 的费效图

3　结　论

备件满足率和备件短缺量是紧密相关的两个参数,究其区别根源在于 S_{DI} 值同库存量 s 的大小关系,当 $S_{DI}<s$,即站点有备件可用,能够满足需求;反之,则会产生备件短缺.二者均为保障效能参数的重要组成元素,其中备件满足率是备件供应这一单一要素的度量,用于衡量供应管理水平;而备件短缺量则不仅可以衡量备件供应的优劣,还因其与维修率有关,因而同系统级维修保障顶层参数相联系,层次高于满足率.备件短缺量较满足率复杂,因其还包含短缺持续时间问题,故在库存管理中较难统计,但备件短缺量同系统可用度直接相关,可在 METRIC 模型基础上采用边际效应分析法,考虑费用的影响;而备件满足率同系统可用度的关系则较为间接,在某些情况下还需斟酌是否可用边际效应法寻优.因而,备件短缺量在完成供应规划目标上优于备件满足率,它更适于根据系统战备完好性要求和费用约束条件,确定备件数量;而备件满足率易于衡量备件供应中管理水平的优劣.

参考文献(References)

[1] Rezaei J. Economic order quantity model with backorder for imperfect quality items [C]//Proceedings of the Engineering Management Conference. Washington DC: IEEE Press, 2005,9(2):466－470

[2] Christopher M Adams. Inventory optimization techniques, system vs. item level inventory analysis [M]. Raytheon Company: IEEE,2004:55－59

[3] Craig C Sherbrooke. Optimal inventory modeling of systems [M]. Boston/ Dordrecht/ London: Kluwer Academic Publishers,2004: 24－25,30－33

[4] 杨秉喜,李金国,张义芳,等. GJB4355《备件供应规划要求》实施指南[M].北京:总装备部技术基础管理中心,2006:46－47, 50－51

Yang Bingxi, Li Jinguo, Zhang Yifang, et al. GJB4355 Spares provisioning requirements implementing manual [M]. Beijing: General Armament Department of Technique Base Management Central,2006:46－47, 50－51(in Chinese)

[5] 道格拉斯·奥斯本. 备件管理[M]. 贺步杰译. 北京:蓝天出版社,2005:203－204

Douglas K O. Spares Management [M]. Translated by He Bujie. Beijing: Lantian Press,2005:203－204(in Chinese)

(责任编辑:娄　嘉)