任意寿命分布的多部件系统备件配置优化算法

龙 军 康 锐 马 麟 程海龙

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

摘 要: 针对部件服从任意寿命分布的多部件系统,提出了基于蒙特卡罗仿真-边际效益分析的备件配置优化算法,采用蒙特卡罗仿真方法计算备件供应效能值,在此基础上引入边际效益分析法确定备件的优化配置. 算例中以供应延误时间为供应效能目标值,以费用为约束条件,得到了由若干指数寿命件、正态寿命件和威布尔寿命件组成的多部件系统的备件优化配置清单,并对算法进行了比较验证,结果表明该算法对于解决复杂系统的备件优化配置问题具有良好的适用性.

关 键 词: 蒙特卡罗仿真;边际效益分析;备件配置优化

中图分类号: TN 956

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)06-0698-03

Algorithm for spares optimization of system with multi-items with different life distributions

Long Jun Kang Rui Ma Lin Cheng Hailong

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

Abstract: Focusing on the system with multi-items with different life distributions, the Monte Carlo simulation-marginal analysis based algorithm for spares optimization was presented. The Monte Carlo simulation was used in calculating spares supply performance. Based on the spares supply performance, the marginal analysis was introduced in identifying the optimum spares configuration. In the case of spares optimization of system with multi-items whose life respectively submit to exponential, normal and weibull distribution, the optimum spares list was acquired with mean supply down time being as spare supply performance measure and cost being as constraint. The algorithm was validated by comparison. The result shows the algorithm's applicability in spares optimization of complex system.

Key words: Monte Carlo simulation; marginal analysis; spares optimization

备件配置优化,即为装备确定备件品种和数量最合理的配置,以在有限的资源约束条件下实现最大的备件供应效能,或者以最小的资源实现要求的供应效能水平. 美军自上世纪50年代开始重视备件问题至今,提出了一系列的用于备件评估和优化的模型,包括以METRIC(Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control)为基础的Mod-METRIC, Vari-METRIC, Dyna-METRIC模型,飞机持续性模型(ASM, Aircraft Sustainability Model),飞机可用度模型(AAM, Aircraft Availability Model),以及以战备完好性为中心备件库存模型(ACIM, Availability Centered Inventory Model)等[1],并将Vari-METRIC实现了商业化. 瑞典的OPUS从上世纪60年代发展至今也成为比较成熟的商业软件[2],但综观这些模型和软件,为简化备件优化的计算,均假定单位时间内备件的需求数服从泊松分布,即部件的寿命服从指数分布,忽略了装备系统内部件寿命分布类型的多样性和复杂性. 国内学者从上世纪90年代开始关注备件问题并取得了大量的研究成果,文献[3]研究了多部件系统的备件配置优化问题,但其前提也是部件寿命均服从指数分布;文献[4]研究了任意

收稿日期: 2006-08-03

作者简介: 龙 军(1980-),男,湖南常德人,博士生, longjun212@163.com

寿命分布的多部件系统备件供应效能的评估,但没有解决备件配置优化的问题;文献[5-8]研究了任意寿命分布的备件需求量仿真优化问题,但仅局限于单部件系统.本文针对任意寿命分布的多部件系统特点,提出了基于蒙特卡罗仿真-边际效益分析的算法,为解决该类系统的备件配置优化问题提供了通用的方法.

1　蒙特卡罗仿真-边际效益分析法

基于蒙特卡罗仿真-边际效益分析的备件配置优化算法的基本思路为,首先根据备件供应流程建立仿真模型,采用蒙特卡罗仿真方法计算任意寿命分布多部件系统的备件供应效能值,如供应延误时间、满足率等,在此基础上针对给定的经费约束或供应效能目标值,采用边际效益分析法,确定最优的备件品种与数量组合.

1.1　计算备件供应效能值的蒙特卡罗仿真法

将备件供应系统的运作流程进行适当简化,假定某装备由 n 个部件组成,不同的部件其寿命服从不同的概率分布,在装备使用现场的备件库中每个部件的备件库存量分别为 s_{0i} ($i=0,1,\cdots,n$),采用 $(s,s-1)$ 的库存策略,即当装备上某部件出现故障后,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,可假定每个故障件的送修周期 t_i 为固定值或服从某一分布.

仿真策略采用事件调度法,装备系统状态的改变只可能由两类事件引起:"部件发生故障事件"、"故障件修复返回事件".首先设定各部件的初始库存量 s_{0i} 和送修周期 t_i (如果假定为固定值),根据不同部件寿命分布特征随机抽取部件的寿命值,推进仿真钟 T_{sim},触发发生故障事件,故障件送修并对送修周期 t_i 进行随机抽样 (如果假定故障件送修周期 t_i 服从某一分布),按照设定的流程继续推进仿真钟,直至设定的仿真终止时间 T_{stop},结束一次仿真,计算得出此次仿真的备件供应效能值 $m_{\mathrm{sp}i}$ (本文中的算例均使用供应延误时间作为备件供应效能参数).独立地进行次仿真,统计每一次仿真的供应效能值 $m_{\mathrm{sp}1}, m_{\mathrm{sp}2}, \cdots, m_{\mathrm{sp}i}, \cdots, m_{\mathrm{sp}L}$,取均值即得到一定库存条件下备件供应系统的近似效能值.换句话说,通过上述的蒙特卡罗仿真方法,即可完成对一定库存条件下任意寿命分布的多部件系统备件供应能力的预先评估.

1.2　优化备件配置的边际效益分析法

如前所述,备件优化的根本目标在于实现备件订购经费与备件供应效能之间的最佳平衡.其数学模型通常可以表述为

$$\max(\text{or}\min) \quad m_{\mathrm{sp}} = \frac{1}{L}\sum_{j=1}^{L} m_{\mathrm{sp}j}$$
$$c_i(s_i - s_{0i}) \le C \tag{1}$$

或者

$$\min \quad c_i(s_i - s_{0i})$$
$$m_{\mathrm{sp}} = \frac{1}{L}\sum_{j=1}^{L} m_{\mathrm{sp}j} \ge (\text{or} \le) M_{\mathrm{sp}} \tag{2}$$

其中,C 为总的备件经费;s_{0i} 为第 i 项部件的备件初始库存量;s_i 为订购备件后第 i 项部件的备件库存量;M_{sp} 为指定的备件供应效能目标值;$m_{\mathrm{sp}j}$ 为第 j 次仿真所得的备件供应效能值.

以式 (1)中的模型为例,在一定经费约束下使供应延误时间最小.根据边际效益递减规律,有

$$\left| m_{\mathrm{sp}}\left(s_i = s_i + 1\right) - m_{\mathrm{sp}}\left(s_i = s_i\right) \right| \ge \left| m_{\mathrm{sp}}\left(s_i = s_i + 2\right) - m_{\mathrm{sp}}\left(s_i = s_i + 1\right) \right| \tag{3}$$

在原有的库存基础上,计算供应效能值 m_{sp},分别使各个备件在原有库存基础上增加 1,计算 $m_{\mathrm{sp}}\left(s = s_i + 1\right)$,并得到边际效益值 v_i,如式 (4)、式 (5)所示.

$$\partial_i = m_{\mathrm{sp}}\left(s_i = s_i + 1\right) - m_{\mathrm{sp}}\left(s_i = s_i\right) \tag{4}$$
$$v_i = \partial_i / c_i \tag{5}$$

对 v_i 进行排序,选取最大的一项 v_k,使第 k 项备件的库存量增加 1,同时备件经费相应地减去 c_k,对以上步骤进行反复迭代直至备件经费超过经费约束,得到优化的备件配置.对于给定供应效能值目标,通过备件优化配置以求最小的经费投入,其方法也类似.

1.3　结果处理

由于部件寿命抽样的随机性,在进行 L 次仿真得到的备件供应效能值基础上计算得到备件的优化配置,每次计算得到备件配置也肯定有所差别,有必要进行若干次的优化计算.如果进行 M 次优化计算,每次优化计算得到备件库存配置为 s_{ij} ($i=0,1,\cdots,n$; $j=0,1,\cdots,M$),剔出其中的重复值按从大到小的顺序排成 $s_{i1}^*, s_{i2}^*, \cdots, s_{ik}^*, \cdots, s_{iq}^*$,并记 f_k 为 s_{ik}^* 在序列 s_{ij} 中出现的次数,各部件备件配置量的分布见表 1.

表 1　各部件备件配置量的分布

库存配置结果	s_{i1}^*	s_{i2}^*	s_{i3}^*	…	s_{ik}^*	…	s_{iq}^*
结果出现次数	f_1	f_2	f_3	…	f_k	…	f_q

在 f_k 序列中取最大值,将其对应的 s_{ik}^* 作为第 i 项备件的库存量,若出现 f_k 相同的情况,则可根

据实际情况进行适当的选择和调整.

2 算 例

算例 1 假定某系统由 3个部件组成,其寿命分别服从为 $\lambda = 8.3 \times 10^{-3}$ /h, $\lambda = 5.8 \times 10^{-3}$ /h, $\lambda = 4.6 \times 10^{-3}$ /h的指数分布,备件价格分别为 546元、985元、834元,初始库存均为 0,故障件送修周期均为720 h,系统工作时间 1 a,求备件经费为1万元时的最佳备件配置方案.

计算供应效能值的仿真次数 $L = 5\ 000$,优化计算次数 $M = 100$,得到 3个部件的备件配置为 (7, 3, 3).

算例 2 某系统由 3个指数寿命件、4个正态寿命件和 2个威布尔寿命件组成,其相应的特性数据如表 2所示. 初始库存均为 0,故障件送修周期均为 720 h,系统工作时间为 1 a,求备件经费为10万元时的最佳备件配置方案.

计算供应效能值的仿真次数 $L = 2\ 000$,优化计算次数 $M = 100$,得到备件配置为 (5, 2, 1, 5, 2, 10, 2, 2, 11).

表 2 某系统组成部件的相关特性数据

部件序号	寿命类型	特征参数	单价/元
LRU1	指数分布	$\lambda = 2.5 \times 10^{-3}$ h^{-1}	2 270
LRU2	指数分布	$\lambda = 2 \times 10^{-3}$ h^{-1}	5 630
LRU3	指数分布	$\lambda = 1 \times 10^{-4}$ h^{-1}	8 120
LRU4	正态分布	$\mu = 300$ h, $\sigma^2 = 50$	2 300
LRU5	正态分布	$\mu = 680$ h, $\sigma^2 = 90$	5 600
LRU6	正态分布	$\mu = 530$ h, $\sigma^2 = 85$	1 200
LRU7	正态分布	$\mu = 450$ h, $\sigma^2 = 25$	8 500
LRU8	威布尔分布	$\alpha = 1.5$, $\beta = 200$ h	9 260
LRU9	威布尔分布	$\alpha = 1.8$, $\beta = 120$ h	1 180

3 算法验证

采用解析的方法[2]可对算例 1进行计算,从而检验本文算法的适用性.

仿真次数 $L = 5000$,优化计算次数 $M = 100$得到表 3所示的结果. 结果表明,本文算法的结果与解析算法的结果基本吻合,本文算法进行备件配置优化是适用的.

表 3 检验算例 1的备件配置计算结果

算法	备件经费		
	1万元	2万元	3万元
本文算法	(7, 3, 3)	(11, 8, 7)	(16, 12, 11)
解析算法	(7, 3, 3)	(13, 7, 6)	(20, 11, 9)

4 结 束 语

任意寿命分布的多部件系统备件配置优化是备件供应保障研究领域中不可回避的问题,本文提出了基于蒙特卡罗仿真 边际效益分析的备件配置优化算法,较好地解决了该问题. 该方法可作为解决任意寿命分布的多部件多层级多维修级别的备件供应系统优化问题的基础算法. 同时,该方法对于包括维修设备、维修设施、人力人员等在内的装备综合保障系统的整体优化也提供了一个新的思路.

参考文献 (References)

[1] Sherbrooke C C. Optimal inventory modeling of systems[M]. Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 2004: 38

[2] Adams Christopher M. Inventory optimization techniques, system vs item level inventory analysis[C]//Proc Annu Reliab Maintainability Symb. Piscataway, NJ: IEEE, 2004: 55 - 59

[3] 何亚群,谭雪锋,金福禄. 基于可用度的飞机可修件需求分析[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(6): 848 - 849
He Yaqun, Tan Xuefeng, Jin Fulu. Demand analysis of aircraft repairable spares based on availability[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(6): 848 - 849 (in Chinese)

[4] 杨宇航,赵建民,李志,等. 备件管理系统仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 981 - 986, 991
Yang Yunhang, Zhao Jianmin, Li Zhi, et al. Research on spares management system with simulation[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(5): 981 - 986, 991 (in Chinese)

[5] 高大化,马月娜,张涛,等. 面向任务的备件携行量仿真优化方法[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2005(3): 10 - 14
Gao Dahua, Ma Yuena, Zhang Tao, et al. Simulation-based method of optimization quantity of spare parts in oriented-mission [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2005(3): 10 - 14 (in Chinese)

[6] 周江华,肖刚,孙国基. N: K系统可靠度及备件量的仿真计算方法[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(2): 159 - 162
Zhou Jianghua, Xiao Gang, Sun Guoji. Simulation-based method for computation reliability and optimum quantity of N: $K(m)$ cross-strapping standby system [J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(2): 159 - 162 (in Chinese)

[7] 周江华,肖刚,苗育红. 备件供应规划中的最优储备问题分析[J]. 机械强度, 2004, 26(3): 270-273
Zhou Jianghua, Xiao Gang, Miao Yuhong. Analysis of optimal spares supply programming[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(3): 270 - 273 (in Chinese)

[8] 冯申,杨自春. 以可用度为中心的舰艇单部件系统备件配置的 Monte-Carlo仿真方法[J]. 中国造船, 2005, 46(3): 117 - 120
Feng Shen, Yang Zichun. Availability-centered Monte-Carlo simulation method for spares configuration of single part system of naval vessels[J]. Chinese Shipbuilding, 2005, 46(3): 117 - 120 (in Chinese)

(责任编辑:娄 嘉)