

考虑需求相关的可修复系统备件配置模型*

周伟, 蒋平, 刘亚杰, 郭波

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 对于一个拥有多台相同设备的可修复系统来说, 一种备件的需求以及其对应的备件保障方案将影响着系统的可工作设备数量, 从而影响着设备其他备件的需求, 故假设备件需求相互独立且与系统自身备件保障方案无关而开展备件配置研究是不合理的。在考虑备件需求相关以及备件的保障方案对备件需求的影响的前提下, 利用马尔可夫理论描述了备件需求规律, 针对不串件拼修和串件拼修两种情况分别给出了可用度的计算方法, 并在此基础上以备件配置费用作为优化目标, 以可用度作为约束构建备件优化配置模型, 给出了边际分析求解模型的方法。通过案例分析, 验证了模型的正确性。

关键词: 备件; 需求相关; 模型; 可用度; 拼修策略

中图分类号: TP301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)03-0068-06

A spares allocation model for repairable systems considering correlated spare demands

ZHOU Wei, JIANG Ping, LIU Yajie, GUO Bo

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For a repairable system consisting of multiple equipments of the same type, spare demand and its supply plan will affect the number of workable equipments, and hence exerts effects on the demand of other spares for the equipment. Therefore, the assumption that the spare demands are mutually independent and have no relation with the spare supply plan of the system is not correct. This study considers the correlated demands as well as the effects of the spare supply plan on the spare demand, and describes the spare demand law by the Markov process. Availability calculus methods are presented according to the two cases of cannibalization and non-cannibalization respectively. Based on the methods, a spare optimal allocation model is constructed by setting spare allocation cost as the optimization target and system availability as the constraints. The model is solved by marginal analysis. Finally, a case study is presented to illustrate the validity of the proposed model.

Key words: spare; correlated demands; model; availability; cannibalization policy

随着科技的进步, 各种系统越来越复杂, 如何保持系统稳定运行是一项重要工作, 一旦系统部件失效造成停机, 将会面临巨大的损失。维修保障部门必须储备相应的备件, 使得系统在发生故障后能够尽快修复, 然而备件储备的同时也会带来相应的库存费用、存储失效损失以及其他方面的费用, 所以需要备件库存量进行优化, 权衡缺货风险与备件配置费用。当前国内外对备件库存优化方面开展了大量的研究, 取得了较大进展。一方面, 研究者们不再将备件优化局限于单个备件配置等级或者备件配置层级, 在多层级多等级备件优化配置方面产生了以 METRIC 模型为代表的一系列研究成果, 并得到了较好的应用^[1-6]; 另一方面, 部分研究者开始关注备件配置与维修策略等相关因素的协同优化^[7-9]。但是这些研究都

是基于各类备件需求相互独立的基本前提, 它们假定备件的需求并不取决于当前工作设备的数量, 并没有意识到系统缺少备件未能及时修复造成系统停机时会影响到系统中的其他部件对备件的需求。当系统停机等待备件进行修复期间, 余下的部件停止工作直到相应的备件到来, 那就暗示着它们并没有备件需求直到系统修复。基于备件需求相互独立假设的备件需求预测往往会造成误差, 不能准确地描述实际的备件需求。例如, 因为未考虑备件需求相关的影响, 文献[10]中系统的备件短缺量被高估了 37.3%。考虑需求相关的可修复系统备件配置属于时变需求库存控制的一种, 当前研究时变需求库存控制文献尽管考虑了需求变化的特点, 但是他们的研究对象如生产库存量等并不会影响需求的到达^[11-15], 而对于考

* 收稿日期: 2011-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70971132)

作者简介: 周伟(1985—), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, E-mail: zhouwei_nudt@163.com;

郭波(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: guobo@nudt.edu.cn

考虑需求相关的可修复系统来说,它的备件库存量会通过影响工作设备数量反作用于备件需求。本文研究可修复系统备件配置时考虑了备件需求相关的影响,利用连续马尔可夫链的相关理论分析了可修复系统各类备件需求之间的关系,并以系统稳态可用度为约束,以备件配置费用为目标构建了备件优化配置模型。

1 模型建立

1.1 问题基本假设

现实生活中最典型的可修复系统由数台相同的设备以及其所属的维修保障机构共同构成,这些设备的备件统一由该维修保障机构的备件仓库保障^[16]。本文将针对此类典型的可修复系统,考虑其各种备件需求之间的关系来构建备件优化配置模型,现对模型提出如下假设:

(1)某使用单位有 K 台相同设备和一个备件仓库,每台设备包含 L 种部件,第 l 种部件的机用数为 n_l ,各部件均为关键部件,任意部件失效均会造成系统停机。

(2)部件在工作时间失效率相互独立,不考虑故障从属、故障级联的情况,部件 l 在工作期间的失效率为常数 λ_l ,部件在非工作时间不失效。

(3)部件失效后采用 $(s-1, s)$ 库存策略送修,在有备件的情况下换件维修时间忽略不计,部件 l 的修复率为常数 μ_l 。系统维修能力无限,部件均能修复,且修复如新。

(4)可修复系统为一个封闭系统,不考虑上级仓库备件支援的情况。

1.2 备件需求相关分析

可修件一般采用 $(s-1, s)$ 库存策略,即当设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,如果没有备件,则设备因备件供应延误导致停机,等待有故障件修复返回后设备重新开始运行。在这种策略下,存在一个经典的库存数量守恒函数^[1],即

$$s_l = OH_l + DI_l + BO_l \quad (1)$$

式中, s_l 为部件 l 的备件配置量, OH_l 为部件 l 的现有库存量, DI_l 为部件 l 的在修数, BO_l 为部件 l 的备件短缺量。可修复系统除了存在库存数量守恒函数,同时也存在部件守恒函数,因为对于一个封闭的库存系统来说,同种部件的总量是有限的,它们以可工作设备部件、停机设备上的可工作部件、可用储备部件(可用备件)以及在修件的形态存在,部件守恒函数表述为

$$S_l = WI_l + SI_l + DI_l + OH_l \quad (2)$$

其中 S_l 为系统中部件 l 的数量, WI_l 为处于工作设备上部件 l 的数量, SI_l 为停机待修设备上部件 l 的数量。由于部件只有在工作时才可能失效,所以备件需求到达决定于 WI_l 的数量。 WI_l 的数量取决于当前可工作设备数量 WE , 因为 $WI_l = n_l \times WE$, 任意一种部件短缺造成设备停机,均会影响工作设备数,从而影响系统中所有部件的备件需求,这就是备件需求相关的体现。

因为备件需求相关的存在,各时段可工作设备将会发生变化,系统备件需求到达并不是一个齐次泊松过程。可修复系统不可能任意时刻均处于完好状态,对于任意备件 $l, l=1, 2, \dots, L$, 其平均备件需求率必然要小于 $Kn_l\lambda_l$, 但是随着各备件库存数量的增加,工作设备数量增加,各类备件需求将增加,当各备件的配置数量趋向于无穷时,任意时刻期望工作设备数趋向于 K , 备件需求率趋向于 $Kn_l\lambda_l$, 此时备件需求服从强度为 $Kn_l\lambda_l$ 的齐次泊松过程,可修复系统备件需求率变化如图1所示。基于备件需求相互独立的备件需求预测方法割裂了各类备件需求之间的相互关系,并不能准确地描述备件需求,该类方法主要是通过帕尔姆定理来计算部件在修数^[1],但是帕尔姆定理的基本前提是备件需求服从一个稳定的齐次泊松过程,而这种基本假设由于备件需求相关的存在而并不成立。

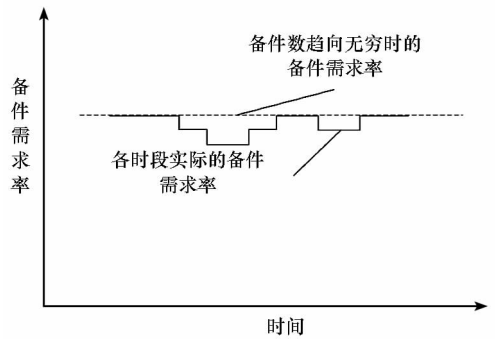


图1 备件需求率变化
Fig. 1 Spare demand change

1.3 系统稳态可用度

当前国内外主要选用备件满足率或者备件短缺量作为部件级的备件保障效能参数,而系统级主要选用可用度作为备件保障效能参数^[17]。可用度主要从保持系统稳定运行力度的角度评价备件保障效能。对于单台设备来说,可用度体现为任意时刻设备未因任何备件短缺而停机的概率。对于一个具备多台相同设备的系统来说,可用度体现为未因任何备件短缺而停机的设备数所占的

百分比。备件管理人员往往更加关注系统的可用度,而并不是单项备件的满足程度。下文将给出考虑备件需求相关的可用度计算模型。由于维修人员是否采用串件拼修策略会直接影响到由于备件短缺造成的系统停机数量,从而反作用于备件的需求,故将针对不串件拼修和串件拼修两种情况研究备件需求的动态特性,并给出可用度计算公式。为了便于描述系统状态变化,定义函数:

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} x - y, & x > y \\ 0, & x \leq y \end{cases} \quad (3)$$

(1) 不串件拼修策略

在不执行串件拼修策略的情况下,系统的任意部件缺货均会造成系统停机,即同一台设备上最多有一个部件失效,所以各备件短缺总量不会超过系统数,因为当备件短缺数总量为 K 时,所有的系统均已停机,将不会产生备件需求,即任意时刻工作系统数量与备件短缺量之间的关系如下

$$WE = K - \sum_{k=1}^K BO_k \quad (4)$$

由于工作系统数量 $WE \geq 0$,根据式(4)可以得出

$$\sum_{k=1}^K BO_k \leq K \quad (5)$$

由于当 $DI_l \leq s_l$ 时, $BO_l = 0$,当 $DI_l > s_l$ 时, $BO_l =$

$$q_{ij}^{(1)} = \begin{cases} (K - \sum_{h=1}^L \varphi(DI_h^{(i)}, s_h))n_i\lambda_l, & j = DI_l^{(R^+(i,l))}, l = 1, 2, \dots, L \\ \mu_l DI_l^{(i)}, & j = DI_l^{(R^-(i,l))}, l = 1, 2, \dots, L \\ - \sum_{l=1, DI_l^{(R^+(i,l))} \neq 0}^L (K - \sum_{h=1}^L \varphi(DI_h^{(i)}, s_h))n_i\lambda_l - \sum_{l=1, DI_l^{(R^-(i,l))} \neq 0}^L \mu_l DI_l^{(i)}, & i = j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

由于连续不可约马尔可夫系统的稳态分布必然存在,记不考虑串件拼修的平稳分布为 $\pi_1 = [\pi_1^{(1)}, \pi_1^{(2)}, \dots, \pi_1^{(|J_1|)}]$,则有

$$\begin{cases} \pi_1 Q_1 = 0 \\ \sum_{i=1}^{|J_1|} \pi_1^{(i)} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可以求解出稳态分布 $\pi_1 = [\pi_1^{(1)}, \pi_1^{(2)}, \dots, \pi_1^{(|J_1|)}]$ 。不执行串件拼修策略时,对于备件配置方案 S ,系统的稳态可用度为

$$A(S) = \frac{K - \sum_{i=1}^{|J_1|} \sum_{l=1}^L \pi_1^{(i)} \varphi(DI_l^{(i)}, s_l)}{K} \quad (10)$$

(2) 串件拼修策略

考虑串件拼修的情况,即将所有的备件空缺集中于停机设备上,记 $\lceil X \rceil$ 为不小于 X 的最小整数,所以任意时刻工作设备数量与备件短缺量之

$DI_l - s_l$,所以有 BO_l 与 DI_l 的关系如式(6):

$$BO_l = \varphi(DI_l, s_l), \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (6)$$

所以备件在修数满足如下关系

$$\sum_{l=1}^L \varphi(DI_l, s_l) \leq K \quad (7)$$

定义满足式(7)的所有部件在修数组组合成了系统的可行状态集,记为 J_1 , $|J_1|$ 表示集合 J_1 中元素的个数。集合 J_1 中第 j 种部件在修数组组合 $(DI_1^{(j)}, DI_2^{(j)}, \dots, DI_k^{(j)})$ 为系统的第 j 种状态,记为状态 $DI^{(j)}$ 。 $R^+(j, l)$ 为状态 $DI^{(j)}$ 的第 l 种部件在修数 $DI_l^{(j)}$ 加 1,而其他部件在修数不变所代表的状态编号,如果该状态不存在,则记 $R^+(j, l) = 0$; $R^-(j, l)$ 为状态 $DI^{(j)}$ 的第 l 种部件在修数 $DI_l^{(j)}$ 减 1,而其他部件在修数不变所代表状态的编号,如果该状态不存在,则记 $R^-(j, l) = 0$ 。

可修复系统部件的失效率与修复率均为常数,系统状态互通,且状态有限,其构成一个连续不可约马尔可夫链。记该连续不可约马尔可夫链的最小生成元矩阵为 $Q_1 = [q_{ij}^{(1)}], i = 1, 2, \dots, |J_1|, j = 1, 2, \dots, |J_1|$ 。最小生成元矩阵 Q_1 的矩阵系数为

间的关系如下

$$WE = K - \lceil \max(\frac{BO_1}{n_1}, \frac{BO_2}{n_2}, \dots, \frac{BO_L}{n_L}) \rceil \quad (11)$$

由于工作系统数量 $WE \geq 0$,根据式(11)可以得出

$$\lceil \max(\frac{BO_1}{n_1}, \frac{BO_2}{n_2}, \dots, \frac{BO_L}{n_L}) \rceil \leq K \quad (12)$$

对于部件 l ,当 $BO_l = (K - 1)n_l + 1$,即代表所有的设备上均存在部件 l 短缺的情况,此时所有设备均已停机。由于假设设备的部件失效相互独立,即不可能多个部件同时失效。对于部件 $l, BO_l = (K - 1)n_l + 1$ 成立时,则对于部件 $l', l' \neq l$,必有 $BO_{l'} < (K - 1)n_{l'} + 1$ 。故有各部件的期望短缺量满足以下关系

$$\sum_{l=1}^L \varphi(BO_l, (K - 1)n_l) \leq 1 \quad (13)$$

对于部件 $l, BO_l = \varphi(DI_l, s_l)$,故根据式(13)

可以得到各备件在修数满足如下关系

$$\sum_{i=1}^L \varphi(DI_{i,s_i} + (K-1)n_i) \leq 1 \quad (14)$$

满足式(14)的所有部件在修数组构成了系统的可行状态集,记为 J_2 。 $|J_2|, DI^{(j)}, R^+(j, l), R^-(j, l)$ 定义同上文所述,可修复系统各部件

$$q_{ij}^{(2)} = \begin{cases} (K - \lceil \max(\frac{\varphi(DI_1^{(i)}, s_1)}{n_1}, \frac{\varphi(DI_2^{(i)}, s_2)}{n_2}, \dots, \frac{\varphi(DI_L^{(i)}, s_L)}{n_L}) \rceil) n_i \lambda_i, & j = DI_l^{(R^+(i,l))}, l = 1, 2, \dots, L \\ \mu_l DI_l^{(i)}, & j = DI_l^{(R^-(i,l))}, l = 1, 2, \dots, L \\ - \sum_{\substack{l=1, \\ DI_l^{(R^+(i,l))} \neq 0}}^L (K - \lceil \max(\frac{\varphi(DI_1^{(i)}, s_1)}{n_1}, \frac{\varphi(DI_2^{(i)}, s_2)}{n_2}, \dots, \frac{\varphi(DI_L^{(i)}, s_L)}{n_L}) \rceil) n_i \lambda_i - \sum_{\substack{l=1, \\ DI_l^{(R^-(i,l))} \neq 0}}^L \mu_l DI_l^{(i)}, & i = j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

记执行串件拼修策略时可修复系统的稳态分布为 $\pi_2 = [\pi_2^{(1)}, \pi_2^{(2)}, \dots, \pi_2^{(|J_2|)}]$, 则有

$$\begin{cases} \pi_2 Q_2 = 0 \\ \sum_{i=1}^{|J_2|} \pi_2^{(i)} = 1 \end{cases} \quad (16)$$

求解式(16)可以求出稳态分布 π_2 。在考虑串件拼修时,对于备件配置方案 S ,此时系统的稳态可用度为

$$A(S) = 1 - \frac{1}{K} \sum_{i=1}^{|J_2|} \pi_2^{(i)} \lceil \max(\frac{\varphi(DI_1^{(i)}, s_1)}{n_1}, \frac{\varphi(DI_2^{(i)}, s_2)}{n_2}, \dots, \frac{\varphi(DI_L^{(i)}, s_L)}{n_L}) \rceil \quad (17)$$

1.4 优化模型与模型求解

上文分别给出了考虑备件需求相关的情况下执行串件拼修与不串件拼修策略时系统稳态可用度的计算方法,故可以构建备件优化配置模型如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & C(S) = \sum_{l=1}^L c_l s_l \\ \text{s.t.} \quad & A(S) \geq \bar{A}, \quad s_l > 0, s_l \in \mathbf{Z}, l = 1, 2, \dots, L \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $C(S)$ 为备件方案 S 的单位时间配置费用, c_l 为部件 l 的单位时间配置费用, \bar{A} 为系统可用度约束, \mathbf{Z} 为整数集。下面将给出利用边际分析方法求解模型的过程。

本文将选用边际分析法对构建的备件优化配置模型进行求解,边际效应分析是一种渐进的优化技术,用于分配短缺资源来获得最大效益。它可以被认为是通过对边际单元的效益和费用的权衡分析,以达到对有效资源的合理利用。备件边际效

在修数组状态变化构成一个不可约连续马尔可夫链。记该连续不可约马尔可夫链的最小生成元矩阵为 $Q_2 = [q_{ij}^{(2)}], i = 1, 2, \dots, |J_2|, j = 1, 2, \dots, |J_2|$ 。最小生成元矩阵 Q_2 的矩阵系数为

应分析算法是一种在一定约束条件下依次进行迭代,直到系统满足最终目标值为止的优化算法。在每一轮的迭代过程中,关键是要根据优化效益分析,确定当前最需要调整的控制变量,以最有效地提高边际效益^[1]。

利用边际分析方法求解备件配置方案时,需要确定合理的备件初始配置方案,因为直接以各备件配置量为零作为初始解开始迭代无疑会有较大计算量,下面将给出备件初始配置方案的计算方法。考虑其他备件的配置数量趋向于无穷,设备停机均由部件 l 引起的情况,记 $\pi_l^{(j)}(s_l)$ 为该情况下部件 l 的备件配置量为 s_l 时 $DI_l = j$ 的稳态概率。考虑不执行串件拼修的情况,部件 l 满足系统可用度约束的最小备件数为

$$s_l^{(\min)} = \min \{s_l \mid \frac{K - \sum_{j=0}^{s+K} \pi_l^{(j)}(s) \varphi(j, s)}{K} \geq \bar{A}\} \quad (19)$$

考虑执行串件拼修的情况,部件 l 满足系统可用度约束的最小备件数为

$$s_l^{(\min)} = \min \{s_l \mid \frac{K - \sum_{j=0}^{s+(K-1)n_l+1} \pi_l^{(j)}(s) \lceil \frac{\varphi(j, s)}{n_l} \rceil}{K} \geq \bar{A}\} \quad (20)$$

如果系统满足可用度约束,则必有 $s_l \geq s_l^{(\min)}$,故可以取部件 l 优化前的初始配置量为 $s_l^{(\min)}$,利用边际分析方法求解本文模型的步骤如下:

步骤1 确定系统中 L 类备件的初始配置量,即 $s_l = s_l^{(\min)}$,计算初始备件配置方案下的系统可用度,如果满足约束,则初始备件配置方案即为最优的备件配置方案,否则转到步骤2;

步骤2 确定需要调整的备件种类,即寻找

最大的边际增量效益 $\delta_l(s_l | S)$ 计算公式为

$$\delta_l(s_l | S) = \begin{cases} \frac{A_l^+(S) - A(S)}{c_l}, & A_l^+(S) \leq \bar{A} \\ \frac{\bar{A} - A(S)}{c_l}, & A_l^+(S) > \bar{A} \end{cases} \quad (21)$$

其中 $A_l^+(S)$ 表示在现有的备件配置方案下, 部件 l 的备件配置数量增加 1 件后系统的可用度;

步骤 3 当 L 类备件的 $\delta_l(s_l | S)$ ($l = 1, 2, \dots, L$) 值都确定后, 将 $\delta_l(s_l | S)$ 最大的部件所对应的备件数量加 1, 即 $s_{l_0} = s_{l_0} + 1, l_0 = \max\{l | \delta_l(s_l | S)\}$, 进入步骤 4;

步骤 4 计算调整后的备件方案对应的系统可用度, 满足系统可用度约束, 则迭代完成, 当前的备件配置方案即为最优的备件配置方案, 否则, 转入步骤 2。

2 案例分析

某维修保障机构负责保障某型设备 25 台, 该

种设备由 $X1, X2$ 两类部件构成, $X1, X2$ 的工作失效时间和修复时间均服从指数分布, 故障率 λ_1, λ_2 分别为 $0.0004h^{-1}, 0.0003h^{-1}$, 修复率 μ_1, μ_2 分别为 $0.0025h^{-1}, 0.0025h^{-1}$, 机用数 n_1, n_2 分别为 1, 2, 其单位时间配置费用分别为 10 元/h 与 12 元/h。系统的可用度约束为 0.92。下面将利用本文的备件优化模型针对串件拼修和不串件拼修两种情况确定满足可用度约束的最优备件配置方案。

通过式 (19) 和式 (20) 可以计算出不串件拼修与串件拼修两种情况下系统的备件初始配置方案均为 $s_1^{(min)} = 2, s_2^{(min)} = 4$ 。利用边际分析法可以得出不执行串件拼修策略时满足备件短缺量约束的最优备件配置方案为 $s_1 = 4, s_2 = 5$, 此时系统的可用度为 0.9281, 系统备件配置费用为 10 元/h。利用边际分析法可以得出执行串件拼修策略时满足备件短缺量约束的最优备件配置方案为 $s_1 = 3, s_2 = 4$, 此时系统的可用度为 0.9287, 系统备件配置费用为 7.8 元/h。不串件拼修与串件拼修两种情况下边际分析过程分别如表 1、表 2 所示。

表 1 不执行串件拼修情况下边际效益分析过程

Tab. 1 Process of marginal analysis in the case of non-cannibalization

循环次数	s_1	s_2	$\delta_1(s_1 S)$	$\delta_2(s_2 S)$	最优备件追加对象	$A(S)$ (当前可用度)	$A(s_{l_0} + 1 S)$ (本次循环结束可用度)
1	2	4	0.0211	0.0156	X1	0.8717	0.8928
2	3	4	0.0151	0.0165	X2	0.8928	0.9126
3	3	5	0.0074	0.0062	X1	0.9126	0.9287

表 2 执行串件拼修情况下边际效益分析过程

Tab. 2 Process of marginal analysis in the case of cannibalization

循环次数	s_1	s_2	$\delta_1(s_1 S)$	$\delta_2(s_2 S)$	最优备件追加对象	$A(S)$ (当前可用度)	$A(s_{l_0} + 1 S)$ (本次循环结束可用度)
1	2	4	0.0092	0.0048	X1	0.9108	0.9281

图 2 给出了不执行串件拼修策略与执行串件拼修策略下系统各部件的备件配置量与系统可用度之间的关系, 图 3 给出了不执行串件拼修策略与执行串件拼修策略下利用本文的模型求解的备件配置费用与可用度之间的关系。不难发现, 在相同的备件配置方案下, 系统在执行串件拼修策略情况下与不执行串件拼修策略的情况相比具有更高的可用度水平, 尤其在备件配置量较少的情况下。串件拼修策略的执行可以较大幅度地提高系统可用度, 降低系统备件配置费用, 故对于备件配置费用较高且具备串件拼修条件的系统应尽可能执行串件拼修策略。

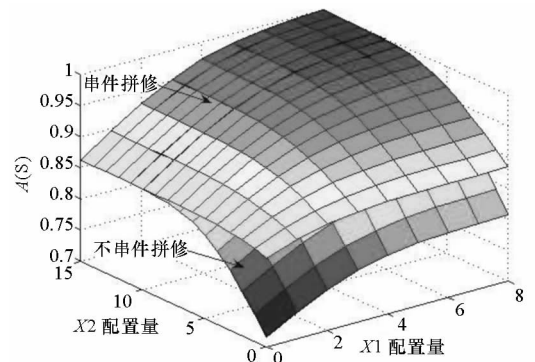


图 2 $X1, X2$ 备件配置量与系统可用度关系
Fig. 2 Relation between spare allocation of $X1, X2$ and system availability

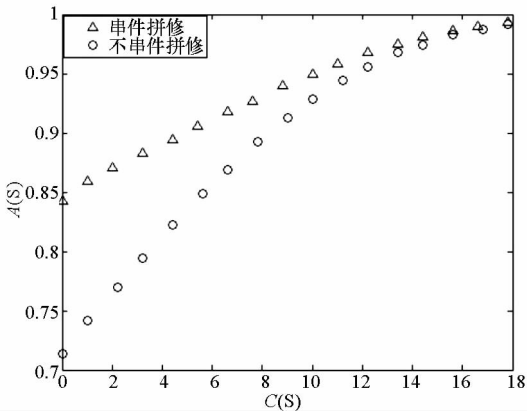


图3 系统总费用与系统可用度之间的关系

Fig.3 Relation between total cost and system availability

3 结论

基于备件需求相互独立假设的备件需求预测往往会造成较大的误差,不能准确地预测系统实际的备件需求。本文以包含多台相同设备以及一个备件仓库的可修复库存系统作为研究对象,分析了系统中各种备件需求的相关性以及传统的基于备件需求相互独立的备件配置理论的不足之处。本文选取可用度作为系统的备件保障效能参数,然后利用连续马尔可夫链的相关理论,描述了系统各状态之间的转移规律,针对不串件拼修和串件拼修两种情况分别给出了系统稳态可用度的计算方法,然后以稳态可用度作为约束,以备件配置费用作为优化目标给出了备件优化配置模型以及模型的边际分析求解方法。最后通过案例分析,验证了该模型的可行性。本文在建模时将系统失效与维修假设为指数分布,对于工作寿命与维修时间不服从指数分布的情况,可以用 PH (phase-type distributions) 分布进行拟合,仍然可以按照本文的建模的基本思路构建优化模型,因为 PH 分布具有指数分布无记忆性的基本性质且任何分布总可以选择一个适当的 PH 分布把它拟合到任意精确的程度^[18]。

参考文献 (References)

[1] Sherbrooke C C. Optimal inventory modeling of systems: multi-echelon techniques [M]. 2nd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.

[2] Perlman Y, Mehrez A, Kaspi M. Setting expediting repair policy in a multi-echelon repairable item inventory system with limited repair capacity [J]. Journal of the Operational Research Society, 2001, (52): 198-209.

[3] Al-Rifai M H, Rossetti M D. An efficient heuristic optimization algorithm for a two-echelon (R, Q) inventory system [J]. International Journal of Production Economics, 2007, 109(1/2): 195-213.

[4] 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.

[5] Topan E, Bayındır Z P, Tan T. An exact solution procedure for multi-item two-echelon spare parts inventory control problem with batch ordering in the central warehouse [J]. Operations Research Letters, 2010, 38(5): 454-461.

[6] Caggiano K E, Jackson P L, Muckstadt J A, et al. Efficient computation of time-based customer service levels in a multi-item, multi-echelon supply chain: A practical approach for inventory optimization [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 199(3): 744-749.

[7] de Smidt-Destombes K S, van der Heijden M C, van Harten A. On the availability of a k-out-of-N system given limited spares and repair capacity under a condition based maintenance strategy [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 83(3): 287-300.

[8] de Smidt-Destombes K S, van der Heijden M C, van Harten A. On the interaction between maintenance, spare part inventories and repair capacity for a k-out-of-N system with wear-out [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(1): 182-200.

[9] de Smidt-Destombes K S, van der Heijden M C, van Harten A. Joint optimisation of spare part inventory, maintenance frequency and repair capacity for k-out-of-N systems [J]. International Journal of Production Economics, 2009, 118(1): 260-268.

[10] Kaplan A J. Incorporating redundancy considerations into stockage models [J]. Naval Research Logistics, 1989, 36(5): 625-638.

[11] Balkhi Z T, Benkherouf L. On an inventory model for deteriorating items with stock dependent and time-varying demand rates [J]. Computers & Operations Research, 2004, 31(2): 223-240.

[12] Dye C Y, Chang H J, Teng J T. A deteriorating inventory model with time-varying demand and shortage-dependent partial backlogging [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 172(2): 417-429.

[13] Sakaguchi M. Inventory model for an inventory system with time-varying demand rate [J]. International Journal of Production Economics, 2009, 122(1): 269-275.

[14] Zhou Y W. A multi-warehouse inventory model for items with time-varying demand and shortages [J]. Computers & Operations Research, 2003, 30(14): 2115-2134.

[15] 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.

[16] 陈童, 黄卓, 郭波. 基于 PH 分布和 MAP 的备件(s, S)库存模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(6): 107-114.

CHEN Tong, HUANG Zhuo, GUO Bo. Spare parts (s, S) inventories system based on Phase-type distribution and Markovian arrival process [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2009, 29(6): 107-114. (in Chinese)

[17] 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, 24(5): 580-583.

CHENG Hailong, KANG Rui, WEI Yi, et al. Comparison analysis of fill rate and backorder [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 24(5): 580-583. (in Chinese)

[18] Asmussen S, Bladt M. Point processes with finite-dimensional conditional probabilities [J]. Stochastic Processes and Their Applications, 1999, 82(1): 127-142.