doi:10.11887/j.cn.201804020 http://journal.nudt.edu.cn

装备寿命周期备件供应网络优化方法*

董骁雄,陈云翔,孟祥飞,王莉莉
(空军工程大学 装备管理与安全工程学院,陕西 西安 710051)

摘 要:针对现有备件供应优化方法未从寿命周期角度考虑备件供应优化问题,将寿命周期不同阶段的备件需求特征融入备件供应网络设计中,实施动态需求特征下的寿命周期整体优化。深入分析寿命周期不同阶段的备件需求特征;建立备件供应响应时间转移方程,在此基础上,构建使寿命周期备件保障效益最大的多目标混合整数规划模型。通过仿真案例证明了多种备件保障模式的组合能够显著提高寿命周期保障效益,寿命周期整体优化可以实施更高效的备件供应。

关键词:备件;寿命周期;供应网络;需求;优化方法
中图分类号:V215.7 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2018)04-127-07

Supply network optimization for spare parts of equipment based on the life cycle

DONG Xiaoxiong, *CHEN Yunxiang*, *MENG Xiangfei*, *WANG Lili*
(Equipment Management & Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: For the problem of the existing spare parts supply optimization method cannot consider the life cycle, the life cycle was merged into network design in stakes and it was optimized based on the dynamic characteristics of the spare parts demand. Firstly, the requirement characteristics of spare parts at different stages of life cycle were deeply analyzed. Secondly, the spare parts supply respond time transfer equation was built, and the programming model with the optimization goal of maximum support effectiveness throughout life cycle was established under constraint conditions. Simulation cases indicate that a combination of a variety of spare parts protection model can improve the effectiveness of the life cycle, and the overall optimization of the life cycle can be implemented with more efficient spare parts supply.

Key words: spare parts; life cycle; supply network; requirement; optimization method

备件供应是新装备部署的战略问题之一[1],对装备平时、战时保障都有深远影响。在当前武器装备日益复杂、更新换代速度不断加快,备件价格急剧攀升的背景下,科学的备件供应规划对提升装备完好率、任务成功性以及降低寿命周期费用具有重要意义[2]。

目前国内外学者针对备件的研究大多集中在备件需求确定和备件库存配置两方面。备件需求确定分为初始备件需求确定和后续备件需求确定,对于初始备件来说,因为缺乏装备的故障率信息,对于其需求的确定较为困难。目前常用的方法有:相似产品预计法、备件需求量概率分布预计法,备件保障概率法等[3-5],这些方法已经在工程中得到了应用。后续备件一般已积累了一定数量的实际使用数据,可以根据备件消耗的历史资料推测未来备件的需求量。目前常用的方法有时间序列法、回归预测法、智能预测法等[6-10]。在库存配置方面,国内外大多数研究都是基于可修复备份多级控制技术(Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control, METRIC)系列模型所展开的[11],例如,Levner[12]和 Samouei[13]等主要采用网络维修流程图的方法,以最小总库存和运输成本为目标,同时考虑各保障站点之间的依赖性和相互作用,对备件多层级库存问题进行了分析,文献[14]根据 METRIC 理论,结合"原位维修率""占空比""重测完好率"等重要维修参数,建立了具有多等级的维修供应体系、多层次结构备件的初始库存分配模型。

通过分析发现,现有文献均未从寿命周期角度整体分析备件供应优化问题,传统的备件供应研究中,初始备件和后续备件是按照飞机的寿命周期严格区分的,造成了实际工作中初始备件和

* **收稿日期**:2017-10-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(71601183)
作者简介:董骁雄(1990—),男,陕西西安人,博士研究生,E-mail:zzz_699699@126.com;
陈云翔(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:cyx87793@163.com

后续备件“供应脱节”的现象,进而导致装备部署后无法快速形成作战能力和保障能力。这其中一个重要原因就是保障模式和寿命周期不同阶段的备件需求特征不匹配,忽略了寿命周期各阶段间的关联性,从而进行阶段独立优化决策;而备件需求特征是随装备寿命周期阶段动态变化的,因此应进行寿命周期备件需求整体优化。针对上述情况,本文从寿命周期角度深入分析备件的阶段需求特征;在此基础上建立了基于寿命周期的备件供应优化模型;通过仿真算例为寿命周期备件供应优化提供理论支持。

1 寿命周期不同阶段的备件需求特征分析

在整个寿命周期中,备件供应大体上要经历3个阶段[15]:初始阶段、后续阶段、停产和(或)改进阶段。初始阶段缺少使用数据,装备处于可靠性增长期,所以国外也有文献称为保证期,其时间跨度最长可达5年。到后续阶段,装备逐渐达到可靠性成熟期,一般来说,这时使用方也具备了建制保障能力。改进与停产大都由于技术发展所致,文献[15]称为技术半衰期,典型值2~10年(本文所述寿命周期暂不考虑停产和改进阶段)。寿命周期不同阶段的备件需求具有明显的阶段动态变化特征:

1)初始阶段(保证期内),备件需求变动大。此时新部署的装备处于早期失效期,具体表现就是故障率略高。该阶段缺乏装备的故障率信息,对于备件需求的确定较为困难,备件供应主要参照相似装备情况和新装备故障特点,以经验为主。为了降低风险且适应需求变化,备件供应品种数量往往较大,采用供应商统一订购的订单式保障模式,以满足初始阶段的使用需求,如图1所示。

2)后续阶段(保证期外),装备经过初始阶段,逐渐进入偶然失效期,故障率相比初始阶段会逐渐降低。此阶段备件需求变动性逐渐减小,备件供应逐步进入稳定期,在已经掌握设备运行情况和备件消耗规律的情况下,可系统建立仓库,利用运输和仓储规模降低保障成本。采用库存式保障模式,以满足初始阶段的使用需求,如图1所示。

在寿命周期中,因为每个阶段备件需求特征的不同,使得各阶段保障模式存在显著差异;因为阶段的连续性而必须考虑各阶段之间的联系。基于寿命周期的备件供应网络优化,就是根据寿命周期不同阶段的备件需求特征建立相应的备件保障模式,将备件需求量和每条路径上的备件物流量设为连续决策变量,以寿命周期备件保障效益最大为目标函数,在一定的约束条件下优化寿命周期各阶段的备件需求量、存储量和运输量。

2 模型假设与参数设定

2.1 模型假设

1)寿命周期的初始阶段和后续阶段均由若干个小周期构成;

2)各备件供应商的供应能力已知;

3)基层单位每隔时间 t 产生一次备件需求,各基层单位产生备件需求的时间间隔已知;

4)仓库的初始和末期库存为0。

2.2 参数设定

参数设定包括基础参数、能力参数、需求参数、费用参数、时间参数、0-1变量、决策变量,如表1~7所示。

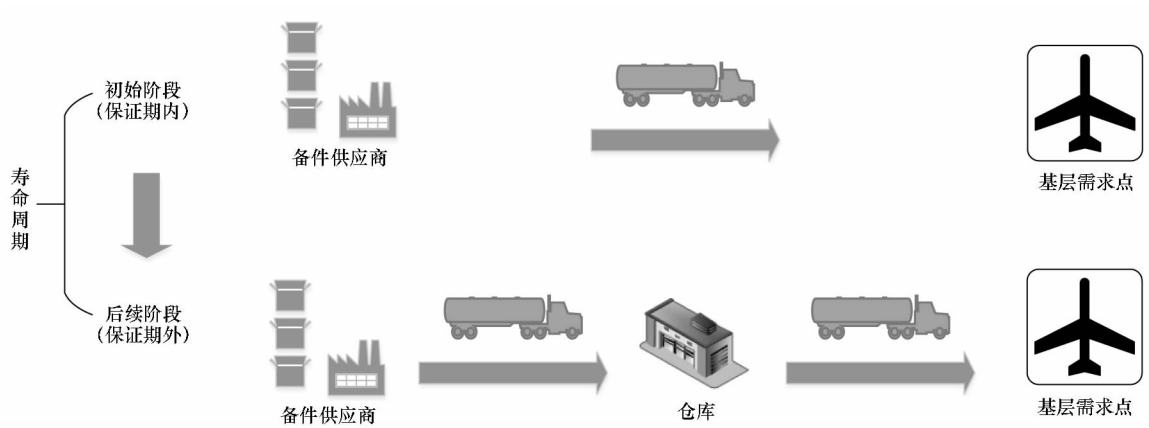


图1 寿命周期不同阶段备件供应网络图

Fig. 1 Network diagram of spare parts for different stages of life cycle

表 1　基础参数

Tab. 1　Basic parameters

符号	意义
I	备件基层需求点集合,$I=\{1,\cdots,i,\cdots,a\}$
J	仓库集合,$J=\{1,\cdots,j,\cdots,b\}$
K	备件供应商集合,$K=\{1,\cdots,k,\cdots,c\}$
N	寿命周期内阶段集合,$N=\{1,2\}$
T_n	阶段内周期集合,$T_n=\{1,\cdots,t,\cdots,t_n\}$
T^L	寿命周期内所有周期集合

表 2　能力参数

Tab. 2　Ability parameters

符号	意义
A_{kt}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 的备件供应能力
B_{jt}^n	阶段 n 周期 t 仓库 j 仓储能力

表 3　需求参数

Tab. 3　Demand parameters

符号	意义
D_{it}^n	阶段 n 周期 t 基层 i 的备件需求量

表 4　费用参数

Tab. 4　Cost parameters

符号	意义
v_{kt}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 单位备件制造成本
r_{kt}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 备件制造固定成本
r_{jt}^n	阶段 n 周期 t 仓库 j 运行成本
h_{jt}^n	阶段 n 周期 t 仓库 j 单位备件存储成本
r_{kit}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 到基层单位 i 固定运输成本
r_{kjt}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 到仓库 j 固定运输成本
v_{kit}^n	阶段 n 周期 t 单位备件由供应商 k 到基层 i 运输成本
v_{kjt}^n	阶段 n 周期 t 单位备件由供应商 k 到仓库 j 运输成本
r_{jit}^n	阶段 n 周期 t 仓库 j 到基层单位 i 固定运输成本
v_{jit}^n	阶段 n 周期 t 单位备件由仓库 j 到基层单位 i 运输成本

表 5　时间参数

Tab. 5　Time parameters

符号	意义
l_{kt}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 单位备件制造时间
l_{kit}^n	阶段 n 周期 t 备件由供应商 k 到基层 i 运输时间
l_{kjt}^n	阶段 n 周期 t 备件由供应商 k 到仓库 j 运输时间
l_{jit}^n	阶段 n 周期 t 备件由仓库 j 到基层 i 运输时间
$l_{i(t,t+1)}^n$	阶段 n 相邻周期 t、$t+1$ 基层 i 订货时间间隔
$l_{i(t_n,1)}^{n,n+1}$	阶段 n 最后一个周期与 $n+1$ 阶段第一个周期基层单位 i 订货时间间隔
α_{it}^n	阶段 n 周期 t 基层单位 i 对备件要求的交货时间
β_{kt}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 响应时间

表 6　0 - 1 变量

Tab. 6　0 - 1 parameters

符号	意义
X_{kt}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 是否生产
Y_{kit}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 到基层 i 是否运输
Z_{kjt}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 到仓库 j 是否运输
U_{jt}^n	阶段 n 周期 t 仓库 j 是否启用
F_{jit}^n	阶段 n 周期 t 仓库 j 到基层单位 i 是否运输

表 7　决策变量

Tab. 7 Decision variables

符号	意义
x_{kt}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 备件制造量
τ_{kt}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 备件制造时间
y_{kit}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 到基层单位 i 运输量
x_{kit}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 到基层单位 i 运输时间
z_{kjt}^n	阶段 n 周期 t 供应商 k 到仓库 j 运输量
f_{jit}^n	阶段 n 周期 t 仓库 j 到基层单位 i 运输量
u_{jt}^n	阶段 n 周期 t 仓库 j 备件存储量
ζ_{it}^n	阶段 n 周期 t 基层单位 i 的缺货量

3　基于寿命周期的备件供应优化模型

因为寿命周期每个阶段的备件需求特征不同,使得各阶段优化结构存在显著差异,首先构建

单阶段优化模型;其次通过备件供应响应时间连接各单阶段模型,建立互相联系的两阶段动态优化模型,目标函数为实现寿命周期内保障效益最大(备件满足率最高,备件成本最低)。

3.1 初始阶段模型

初始阶段:采用供应商直接保障基层单位的订单式备件保障模式,备件保障成本包括供应商生产成本和运输成本。

1)目标函数:

$$\begin{cases}\max\ obj_{11} = \sum\limits_{t\in T_1}\sum\limits_{i\in I}(D_{it}^1 - \zeta_{it}^1)\\ \min\ obj_{12} = \sum\limits_{t\in T_1}\sum\limits_{k\in K}(r_{kt}^1 X_{kt}^1 + v_{kt}^1 x_{kt}^1) + \\ \qquad\qquad \sum\limits_{t\in T_1}\sum\limits_{k\in K}\sum\limits_{i\in I}(r_{kit}^1 Y_{kit}^1 + v_{kit}^1 y_{kit}^1)\end{cases} \tag{1}$$

决策者可对上述两个目标函数进行综合考虑,那么问题重新定义为备件保障效益最大(备件满足率最高,备件成本最低):

$$\max\ G_1 = \max[obj_{11}/obj_{12}]$$

2)约束条件:

① 备件供应响应时间满足基层单位使用要求

$$\beta_{kt}^1 \leqslant \alpha_{it}^1, \forall k,i, \forall t \in T_1 \tag{2}$$

② 备件供应运输量守恒

$$\sum_{i\in I} Y_{kit}^1 y_{kit}^1 = x_{kt}^1, \forall k, \forall t \in T_1 \tag{3}$$

$$\sum_{k\in K} Y_{kit}^1 y_{kit}^1 = D_{it}^1 - \zeta_{it}^1, \forall i, \forall t \in T_1 \tag{4}$$

③ 备件供应能力约束

$$x_{kt}^1 \leqslant X_{kt}^1 A_{kt}^1, \forall k, \forall t \in T_1 \tag{5}$$

④ 变量取值范围约束

$$x_{kt}^1, y_{kit}^1, \zeta_{it}^1 \geqslant 0, \forall k,i, \forall t \in T_1 \tag{6}$$

3.2 后续阶段模型

后续阶段:采用供应商、仓库和基层单位构成的库存式备件保障模式,备件保障成本包括供应商生产成本,仓库运行成本及存储成本,运输成本。

1)目标函数:后续阶段备件保障效益最大(备件满足率最高,备件成本最低)。

$$\begin{cases}\max\ obj_{21} = \sum\limits_{t\in T_1}\sum\limits_{i\in I}(D_{it}^2 - \zeta_{it}^2)\\ \min\ obj_{22} = [\sum\limits_{t\in T_2}\sum\limits_{k\in K}(r_{kt}^2 X_{kt}^2 + v_{kt}^2 x_{kt}^2) + \\ \sum\limits_{t\in T_2}\sum\limits_{k\in K}\sum\limits_{i\in I}(r_{kjt}^2 Z_{kjt}^2 + v_{kjt}^2 Z_{kt}^2) + \sum\limits_{t\in T_2}\sum\limits_{j\in J}(r_{jt}^2 U_{kt}^2 + z_{kjt}^2 v_{kjt}^2) + \\ \sum\limits_{t\in T_2}\sum\limits_{j\in J} h_{jt}^2 u_{jt}^2 + \sum\limits_{t\in T_2}\sum\limits_{j\in J}\sum\limits_{i\in I}(r_{jit}^2 F_{jit}^2 + v_{jit}^2 f_{jit}^2)]\end{cases} \tag{7}$$

同理,目标函数可重新定义为:

$$\max\ G_2 = \max[obj_{21}/obj_{22}]$$

2)约束条件:

① 备件供应响应时间满足基层单位要求

$$\beta_{kt}^2 \leqslant \alpha_{it}^2, \forall k,i, \forall t \in T_2 \tag{8}$$

② 备件生产、运输、存储和需求守恒

$$x_{kt}^2 = \sum_{i\in I} Z_{kjt}^2 z_{kjt}^2, \forall k, \forall t \in T_2 \tag{9}$$

$$u_{jt}^2 = \sum_{k\in K} Z_{kjt}^2 z_{kjt}^2 - \sum_{i\in I} F_{jit}^2 f_{jit}^2 + u_{j,(t-1)}^2, \forall j, \forall t \in T_2 \tag{10}$$

$$\sum_{j\in J} F_{jit}^2 f_{jit}^2 = D_{it}^2 - \zeta_{it}^2, \forall i, \forall t \in T_2 \tag{11}$$

③ 仓库的初始库存和末期库存为0

$$\begin{cases}u_{j1}^2 = 0\\ u_{jt_2}^2 = 0\end{cases} \tag{12}$$

④ 备件供应能力约束

$$x_{kt}^2 \leqslant X_{kt}^2 A_{kt}^2, \forall k, \forall t \in T_2 \tag{13}$$

$$\sum_{k\in K} Z_{kjt}^2 z_{kjt}^2 + u_{j,(t-1)}^2 \leqslant U_{jt}^2 B_{jt}^2, \forall j, \forall t \in T_2 \tag{14}$$

⑤变量取值范围约束

$$x_{kt}^2, z_{kjt}^2, f_{jit}^2, u_{jt}^2, \zeta_{it}^2 \geqslant 0, \forall k,j,i, \forall t \in T_2 \tag{15}$$

3.3 寿命周期优化模型建立与求解

3.3.1 混合保障模式下的备件供应寿命周期优化模型

备件供应响应时间贯穿整个备件供应寿命周期,具有连续动态性,初始阶段模型中的式(2)和后续阶段模型中的式(8)分别给出了各阶段的响应时间表达式,但未考虑寿命周期各阶段之间的联系。鉴于此,通过阶段备件需求响应点建立动态阶段响应时间,在此基础上构建寿命周期备件供应优化模型,如图2所示。

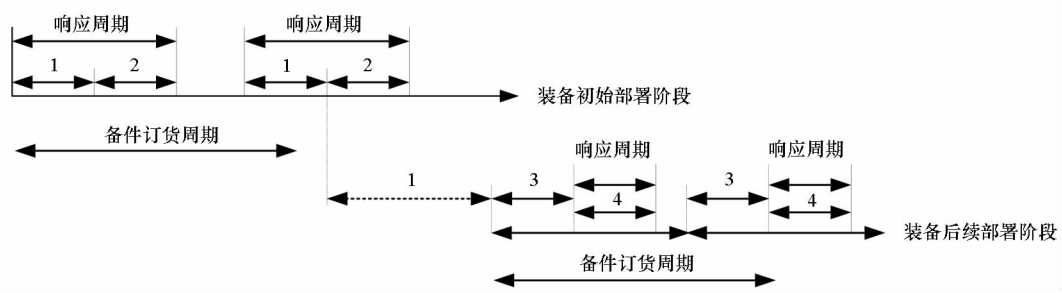
初始阶段基层单位备件需求响应点为备件供应商,响应时间包括备件生产时间及运输时间,则式(2)可转化为:

$$\tau_{kt}^1 + Y_{kit}^1 x_{kit}^1 \leqslant \alpha_{it}^1, \forall k,i, \forall t \in T_1 \tag{16}$$

后续阶段基层单位备件需求响应点为仓库,响应时间为运输时间,条件是有备件从供应商运到仓库,备件生产时间分为两部分:$t=1$ 时,表示经初始阶段进入后续阶段,$t>1$ 时为后续阶段内的周期数。则式(8)可转化为:

$$\tau_{k1}^2 + Z_{kj1}^2 l_{kj1}^2 \leqslant l_{i(t_1,1)}^{1,2} - \tau_{k1}^1, \forall k,j,i, \forall t = 1 \tag{17}$$

$$\tau_{kt}^2 + Z_{kjt}^2 l_{kjt}^2 \leqslant l_{i(t-1,t)}^2 + \sum_{t=1}^{t-1}[(l_{i(t-1,t)}^2 - \tau_{k1}^2)\prod_{t'=t}^{t-1} X_{kt'}^3] - \tau_{k(t-1)}^2$$
$$\forall k,j,i, \forall t \in T_2; \forall t > 1 \tag{18}$$



注:1 为备件生产时间,2 为供应商到基层单位需求点时间,3 为备件由供应商到仓库运输时间,4 为备件由仓库到基层单位需求点运输时间。

图 2　备件寿命周期不同阶段响应时间

Fig. 2　Spare parts response time for different stage of life cycle

$$F_{jit}^{3} l_{jit}^{3} \leqslant \alpha_{it}^{3}, \forall k,j,i, \forall t \in T_2 \tag{19}$$

综上可得寿命周期备件供应优化模型,目标函数见式(20),约束条件包括初始阶段和后续阶段的非时间约束以及式(16)~(18)。

$$\max\ G = \max\ (G_1 + G_2) \tag{20}$$

3.3.2　订单式保障模式下的寿命周期优化模型

订单式保障模式下的寿命周期优化即寿命周期都使用订单式保障模式,目标函数为:

$$\max\ G = \max\ G_1 \tag{21}$$

约束条件包括式(16)和式(3)~(6),且 $T_1 = T^L$。

3.3.3　库存式保障模式下的寿命周期优化模型

库存式保障模式下的应寿命周期优化即寿命周期都使用库存式保障模式,目标函数为:

$$\max\ G = \max\ G_2 \tag{22}$$

时间约束为:

$$F_{jit}^{2} l_{jit}^{2} \leqslant \alpha_{it}^{2}, \forall k,j,i, \forall t \in T_2 \tag{23}$$

$$\tau_{k1}^{2} + Z_{kj1}^{2} l_{kj1}^{2} + F_{ji1}^{2} l_{ji1}^{2} \leqslant \alpha_{it}^{2}, \forall k,j,i;t = 1 \tag{24}$$

$$\tau_{kt}^{2} + Z_{kjt}^{2} l_{kjt}^{2} \leqslant l_{i(t-1,t)}^{2} + \sum_{t=1}^{t-1} \left[(l_{i(t-1,t)}^{2} - \tau_{k(t-1)}^{2}) \prod_{t'=t}^{t-1} X_{kt'}^{2} \right] - \tau_{k(t-1)}^{2}$$
$$\forall k,j,i, \forall t \in T_2; \forall t > 1 \tag{25}$$

式(9)~(15)、式(23)~(25)联立组成库存式保障模式下的备件寿命周期优化模型中的约束条件,且 $T_2 = T^L$。

4　实例分析

某新装备部署部队,构建备件供应网络,包括 2 个备选备件供应商,3 个仓库和 3 个基层单位(I_1、I_2、I_3)需求点组成。初始阶段、后续阶段各阶段订购备件时间间隔分别为(50 h,30 h),假设初始阶段、后续阶段各包含 2 个小周期,初始阶段、后续阶段各阶段周期交付备件提前期分别为(40 h,35 h)、(25 h,20 h)。与模型相关的其他参数如表 8~13 所示。

表 8　备件供应商参数

Tab. 8　Spares parts supplier parameters

参数	供应商 1	供应商 2
运营成本	400 万元	700 万元
初始阶段制造能力	3000 个	5000 个
后续阶段制造能力	21 000 个	30 000 个
初始阶段单位备件制造成本	0.1 万元/个	0.09 万元/个
后续阶段单位备件制造成本	0.09 万元/个	0.08 万元/个
初始阶段单位备件制造效率	1.2 h/100 个	1.0 h/100 个
后续阶段单位备件制造效率	0.8 h/100 个	0.6 h/100 个

表 9　仓库参数

Tab. 9　Warehouse parameters

参数	仓库 1	仓库 2	仓库 3
运营成本	100 万元	90 万元	60 万元
单位存储成本	30 元/个	25 元/个	20 元/个
存储能力	50 000 个	30 000 个	10 000 个

表 10　寿命周期各阶段备件需求量

Tab. 10　Spares demand data for different stage of life cycle

周期	初始阶段			后续阶段		
	I_1	I_2	I_3	I_1	I_2	I_3
1	500	750	3000	2400	4500	4000
2	900	1200	3600	3000	7500	6000

表 11 供应商 K 到基层单位 I 的运输成本、单位运输成本、运输时间

Tab. 11 Fixed transport costs, unit transport cost and transport schedule of suppliers I to the primary units K

阶段		I_1	I_2	I_3
初始	K_1	36 000/25/29	45 600/40/21	18 000/38/10
阶段	K_2	55 200/44/24	55 200/44/24	55 200/44/24

表 12 供应商 K 到仓库 J 的运输成本、单位运输成本、运输时间

Tab. 12 Fixed transport costs, unit transport cost and transport schedule of primary units K to the warehouse J

阶段		I_1	I_2	I_3
后续	K_1	16 500/49/5	20 900/42/3	17 600/30/7
阶段	K_2	253 600/50/7	55 200/44/24	55 200/44/24

表 13 仓库 J 到基层单位 I 的运输成本、单位运输成本、运输时间

Tab. 13 Transport fixed costs, unit transport cost and transport schedule of warehouse J to the suppliers I

阶段		I_1	I_2	I_3
后续	K_1	36 000/25/29	45 600/40/21	18 000/38/10
阶段	K_2	55 200/44/24	55 200/44/24	55 200/44/24

4.1 寿命周期优化结果

上述模型均为 0 和 1 混合整数规划模型，可利用 Lingo 软件编程求解。结构变量优化结果见表 14。

表 14 结构变量 X_{kt}^n，U_{jt}^n 优化结果

Tab. 14 Optimization results of structural variables

X_{11}^1	X_{21}^1	X_{12}^1	X_{22}^1	X_{11}^3	X_{21}^3	X_{12}^3
1	1	1	1	1	1	1
X_{22}^3	U_{21}^3	U_{31}^3	U_{12}^3	U_{22}^3	U_{32}^3	其他
1	1	1	1	1	1	0

4.2 对比分析

在上述条件下分别进行分阶段优化求解和单一保障模式下整体优化（订单式保障模式下的整体优化、库存式保障模式下的整体优化）求解，结构变量优化结果见表 15 ~ 17。

为证明寿命周期备件供应模型的优越性，从以下两方面对求解结果进行对比分析：

表 15 分阶段优化结构变量优化结果

Tab. 15 Optimization results of structural variables in stages

X_{11}^1	X_{21}^1	X_{12}^1	X_{22}^1	X_{11}^2	X_{21}^2	X_{12}^2
1	1	1	1	1	1	1
X_{22}^2	U_{21}^2	U_{31}^2	U_{12}^2	U_{22}^2	U_{32}^2	其他
1	1	1	1	1	1	0

表 16 订单式保障模式下的整体优化结构变量优化结果

Tab. 16 Optimization results of the overall optimization structure of the system under the guarantee mode

X_{11}^1	X_{21}^1	X_{12}^1	X_{22}^1	X_{13}^1	X_{23}^1
1	1	1	1	1	1
X_{14}^1	X_{24}^1	X_{15}^1	X_{25}^1	X_{16}^1	X_{26}^1
1	1	1	1	1	1

表 17 库存式保障模式下的整体优化结构变量优化结果

Tab. 17 Optimization results of the overall optimization structure under the inventory guarantee mode

X_{11}^2	X_{21}^2	X_{12}^2	U_{31}^2	U_{32}^2	X_{13}^2	X_{23}^2
1	1	1	1	1	1	1
X_{14}^2	X_{24}^2	U_{23}^2	U_{24}^2	U_{34}^3	X_{15}^2	X_{25}^2
1	1	1	1	1	1	0
X_{16}^2	X_{26}^2	U_{25}^2	U_{35}^2	U_{26}^2	U_{36}^2	其他
1	1	1	1	1	1	0

1）同寿命周期都采用一种备件保障模式的优化结果进行对比；

2）同一阶段优化结果进行对比。

对比结果见图 3 和图 4，图 3 显示了不同优化策略下备件保障效益的对比结果，图 4 显示了不同备件保障模式下备件保障效益的对比结果。

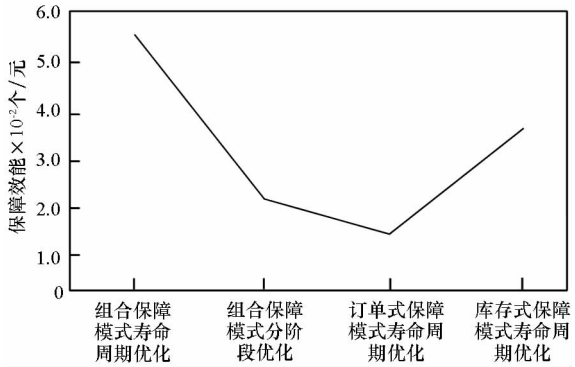


图 3 不同优化策略下备件保障效益的对比结果

Fig. 3 Comparison of the effectiveness of spare parts in different optimization strategies

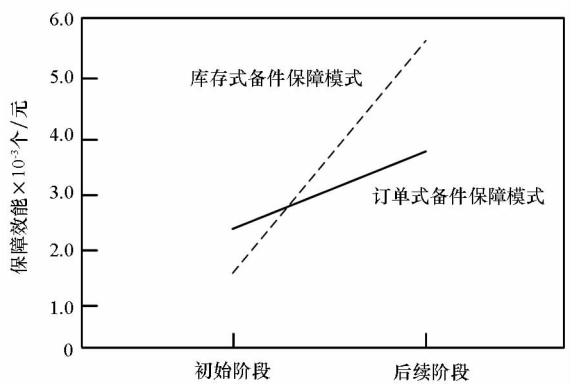


图 4　不同备件保障模式下保障效益的对比结果

Fig. 4　Comparison of the effectiveness of spare parts in different support model

1)从图 3 可以看出,组合保障模式的保障效益最高,订单式保障模式的保障效益最低。从图4可以看出,从同一保障模式在不同阶段其保障效益排序来看,库存式保障模式在初始阶段为最低,但在后续阶段库存式保障模式保障效益最高。由此可知,若想实现新装备部署后寿命周期备件保障效益最大化,其保障模式应随寿命周期的备件需求阶段特征动态变化。

2)从图 3 可以看出,相比较于分阶段优化,寿命周期优化策略下的备件保障效益更高,由此证明了模型的优越性。

5　结论

1)考虑了寿命周期阶段备件需求特征,将其融入备件供应网络设计中,该方法可以实现寿命周期备件保障效益最大化,比传统的分阶段处理的方法更优。

2)单一备件保障模式无法实现寿命周期保障效益最大化,必定是多种备件保障模式的组合。备件保障模式随寿命周期的阶段特征动态变化,应采用寿命周期分阶段合理建库的备件保障模式。

3)实例分析中,寿命周期优化决策下的保障效益高于分阶段优化策略下的保障效益,说明寿命周期整体优化可以实施更高效的备件供应。

参考文献(References)

[1] Military and Government Specs & Standards. Integrated logistics support programs for equipment, subsystems & systems metric: DoD - STD - 1702 - 85[S]. USA: Naval Publications and Form Center, 1985: 11 - 15.

[2] 陈学楚, 张挣敏, 陈云翔, 等. 装备系统工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
CHEN Xuechu, ZHANG Zhengmin, CHEN Yunxiang, et al. Materiel systems engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. (in Chinese)

[3] 徐宗昌, 张永强, 呼凯凯, 等. 备件携行量研究方法综述[J]. 航空学报, 2016, 37(9): 2623 - 2633.
XU Zongchang, ZHANG Yongqiang, HU Kaikai, et al. Survey on amount configuration methods of carrying spare parts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(9): 2623 - 2633. (in Chinese)

[4] 董骁雄, 陈云翔, 项华春, 等. 基于 SST 和 Bayes 的初始备件需求确定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 44(2): 316 - 321.
DONG Xiaoxiong, CHEN Yunxiang, XIANG Huachun, et al. Determination method of initial spares requirement based on similarity system theory and Bayesian theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautic and Astronautic, 2017, 44(2): 316 - 321. (in Chinese)

[5] 董骁雄, 陈云翔, 王莉莉, 等. 基于备件保障概率的备件库存限额确定方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(3): 447 - 452.
DONG Xiaoxiong, CHEN Yunxiang, WANG Lili, et al. Inventory limitation method for spare parts based on equipment fill rate[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(3): 447 - 452. (in Chinese)

[6] Rosienkiewicz M, Chlebus E, Detyna J. A hybrid spares demand forecasting method dedicated to mining industry[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 49: 87 - 107.

[7] Guo F, Diao J, Zhao Q H, et al. A double-level combination approach for demand forecasting of repairable airplane spare parts based on turnover data[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 110: 92 - 108.

[8] Zhu Q, Liu S Y, Huang Z J, et al. Prediction model of spare parts consumption based on engineering analysis method[J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 711 - 716.

[9] Zhu S, Dekker R, Jaarsveld W V, et al. An improved method for forecasting spare parts demand using extreme value theory[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 261(1): 169 - 181.

[10] Kim T Y, Dekker R, Heij C. Spare part demand forecasting for consumer goods using installed base information[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 103: 201 - 215.

[11] Sherbrooke C C. Optimal inventory modeling of systems: multi-echelon technique[M]. 2nd ed. Boston, USA: Artech House, 2004.

[12] Levner E, Perlman Y, Cheng T C E, et al. A network approach to modeling the multi-echelon spare part inventory system with backorders and interval-valued demand[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 132(1): 43 - 51.

[13] Samouei P, Kheirkhah A S, Fattahi P. A network approach modeling of multi-echelon spare part inventory system with backorders and quantity discount[J]. Annals of Operations Research, 2015, 226(1): 551 - 563.

[14] 罗祎, 阮旻智, 袁志勇. 多级维修供应下可修复备件库存建模与优化[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(10): 2623 - 2625.
LUO Yi, RUAN Minzhi, YUAN Zhiyong. Modeling and optimization of repairable spare parts under the multi-echelon maintenance supply[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(10): 2623 - 2625. (in Chinese)

[15] 任敏. 备件供应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 179 - 182.
REN Min. Spare parts supply[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 179 - 182. (in Chinese)