

# 舰船特装器材多目标优化配置方法

董琪<sup>1</sup>, 徐廷学<sup>2</sup>, 赵建忠<sup>2</sup>, 丛林虎<sup>1</sup>

1. 海军航空工程学院研究生管理大队, 烟台 264001
2. 海军航空工程学院兵器科学与技术系, 烟台 264001

**摘要** 针对舰船海上执行任务期间随舰特装器材的保障问题,研究了特装器材的多目标优化配置方法。结合舰船特装器材保障的实际特点,以器材的体积、质量、费用为约束条件,以保障概率和利用率为优化目标,建立多目标多约束特装器材优化配置模型,并改进多目标粒子群算法,保证全局范围粒子多样性,避免算法过快收敛,以求得全局最优解。通过实例对比改进粒子群算法与标准算法的计算结果,分析不同指标权重比组合下的最优配置方案、不同约束条件下的多目标变化趋势,证明了改进粒子群算法的稳定性和多目标优化模型的实用性。

**关键词** 舰船特装器材;优化配置;保障概率;多目标优化

**中图分类号** TP391

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.19.016

## Multi-objective optimization configuration for special equipment materials on warship

DONG Qi<sup>1</sup>, XU Tingxue<sup>2</sup>, ZHAO Jianzhong<sup>2</sup>, CONG Linhu<sup>1</sup>

1. Graduate Students' Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China
2. Department of Ordnance Science and Technology, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China

**Abstract** This paper studies the multi-objective optimization configuration of special equipment materials on warships during the mission at sea. Considering the configuration characteristics of special equipment materials on warships, we establish a multi-objective and multi-constraint model with the fill rate and utilization rate as the optimization target, and volume, mass, and cost as the constraints. The multi-objective Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is designed and improved, guaranteeing diversity of particles at the global scope and avoiding excessively fast convergence, to obtain globally optimal solution. We further compare the calculation results between the improved algorithm and standard algorithm, analyzing the optimal configuration under different weight ratio and tendencies under different constraints. The results demonstrate the stability of the improved algorithm and practicability of the multi-objective model.

**Keywords** special equipment materials; optimization configuration; fill rate; multi-objective optimization

舰船特装器材是指维修保障舰载系统装备及其主要设备所需的元器件、零件、部件、原材料或消耗材料等的统称。目前,特装器材的保障正由“粗放型”、“单一型”保障向“靠前”、“精确化”保障转变,为确保舰船装备出航训练或执行任务顺利开展,要在舰船上配备因舰载系统、设备故障而需替换的特装器材。因此,合理的特装器材配置是抢修是否顺

利,任务是否按计划执行的重要保证。

针对舰船装备的保障特点,舰船上特装器材的储备空间、舰船载荷、排水量等与后方仓库相比均有较大限制,因此研究随舰特装器材配置时,应考虑这些因素,并将其作为约束条件。保障指标是评估特装器材配置效果的重要依据,不同的保障指标从不同的角度反映了特装器材保障的效果。

收稿日期: 2015-04-02; 修回日期: 2015-06-28

基金项目: 中国航天科技集团一院预研项目(2014-KYFX-0071)

作者简介: 董琪, 博士研究生, 研究方向为装备综合保障理论与技术, 电子邮箱: lance0627@163.com

引用格式: 董琪, 徐廷学, 赵建忠, 等. 舰船特装器材多目标优化配置方法[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 96-101.

王乃超等<sup>[1]</sup>以装备的平均等待备件时间作为目标函数,以备件的体积、质量为约束条件,建立并求解了多约束优化模型;阮旻智等<sup>[2]</sup>在王乃超的基础上增加了费用约束条件,并以装备可用度为优化目标,利用拉格朗日松弛方法优化了舰船装备携行备件保障方案;刘勇等<sup>[3]</sup>以设备可靠度为目标函数,建立并求解了多约束优化模型;张志华等<sup>[4]</sup>、费广玉等<sup>[5]</sup>研究了以单项备件满足率为优化目标的随舰备件配置方法。Zhang等<sup>[6]</sup>利用离散时间仿真方法将备件保障概率、备件利用率作为优化目标研究了备件配置方案,分析了目标与执行任务次数的统计关系,但没有考虑备件质量及费用约束问题。

针对多目标优化的研究,绝大多数文献更侧重于对优化算法的研究,特别是启发式算法。Reyes等<sup>[7]</sup>、Kumar等<sup>[8]</sup>在标准粒子群算法的基础上,从动态适应、容易陷入局部极值、收敛速度等方面对其改进,提高了算法解决多目标优化的能力;叶洪涛等<sup>[9]</sup>、郭俊等<sup>[10]</sup>利用差分进化算法对多目标模型进行求解,具有更优越的近似解分布及性能。以上研究虽然提高了优化算法的效率,但未给出实际应用案例,仅通过选择一些测试函数对算法进行验证,实际应用价值有待检验。

本研究以舰船特装器材随舰配置问题为背景,构建特装器材随舰配置多目标多约束优化模型,并对经典粒子群算法进行改进,求解不同目标权重比条件下的最优配置方案。

## 1 多目标优化模型构建

### 1.1 问题分析与基本假设

舰船装备在出航训练或执行任务期间,若舰载系统、设备等出现故障时,舰上维修保障人员立即对故障部分进行换件维修,一般不对故障件进行维修。因此,随舰特装器材均可视为不可修件。若舰上器材仓库存有故障设备的替换件,则进行换件维修;若该设备无库存,则需等待舰船训练或执行任务完毕后回港维修。因此,舰上携带的特装器材均为容易更换的、影响任务成功的器材。

评估特装器材配置效能的指标有装备可用度、备件保障概率、平均备件等待时间等。由于舰上仓库的特殊性,一般器材的补充需等到任务结束之后,导致平均备件等待时间约等于任务时间。而可用度作为优化目标的不足,文献[4]已做出说明。备件保障概率从定义出发,将该指标定得越高,舰船携带的特装器材就越多,通常多于备件需求,一定程度上造成资源浪费,也影响其他器材的储备量。因此,针对该问题,本文将备件保障概率作为优化目标的同时,也将备件利用率作为优化目标,以提高特装器材的供应保障效能。

为简化和说明问题,以电子类特装器材为研究对象,并做出如下假设:

1) 舰船特装器材均为现场更换单元(liner replaceable unit, LRU),LRU的故障率为 $\lambda_i$ ,且服从泊松分布, $i$ 为舰上特装器材编号( $i=1, 2, \dots, I$ )。

2) 第 $i$ 项特装器材的保障概率为 $P_i$ ,利用率为 $R_i$ ;整个

舰船系统特装器材的保障概率为 $P_s$ ,利用率为 $R_s$ 。

3) 第 $i$ 项特装器材的体积为 $V_i$ ,质量为 $m_i$ ,单位配置费用为 $C_i$ 。

4) 舰上的维修活动均为故障维修,不考虑预防性维修。

5) 第 $i$ 项特装器材的舰上库存量为 $S_i$ 。

6) 配置方案总约束条件分别为 $V_s$ 、 $m_s$ 、 $C_s$ 。

### 1.2 目标函数

特装器材保障概率反映的是,在给定任务时间内特装器材能够满足任务时间需求的能力,其值与特装器材的库存量及其故障率紧密相关。由于特装器材寿命服从指数分布,因此第 $i$ 项特装器材的保障概率 $P_i$ 的计算公式为

$$P_i = \sum_{l=0}^{S_i} \frac{(N_i \lambda_i t_i)^l}{l!} \exp(-N_i \lambda_i t_i) \quad (1)$$

式中, $N_i$ 为第 $i$ 项特装器材的机用数; $t_i$ 为第 $i$ 项特装器材的供应周期。

通常情况下,计算特装器材系统保障概率是将各项器材作为串联系统考虑,由于舰船特装器材种类可达上万项,若按串联系统处理,即使各项特装器材的保障概率均达到要求,系统保障概率计算结果仍然较低,这与实际不符。因此,可从保障概率的定义出发,得到舰船装备的特装器材系统保障概率统计量<sup>[11]</sup>为

$$\hat{P}_s = \frac{\sum_{i=1}^I S'_i}{\sum_{i=1}^I n_i} \quad (2)$$

式中, $S'_i$ 为第 $i$ 项特装器材的实际消耗数; $n_i$ 为第 $i$ 项特装器材在保障周期内因故障而维修换件的次数。

由式(2)及更新过程理论,特装器材系统保障概率为

$$P_s = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^I \lambda_i} P_i \quad (3)$$

特装器材利用率是指在规定的保障周期内,实际使用的器材数与实际库存数之比。因此,特装器材利用率为

$$R_i = \frac{S'_i}{S_i} \quad (4)$$

由于定义得到的利用率模型(4)需由大量的统计数据得出,在实际应用时存在难度,故在此基础上通过引入期望短缺数,利用条件概率构建利用率模型。

将式(4)变形为

$$R_i = 1 - \frac{|S_i - S'_i|}{S_i} \quad (5)$$

考虑特装器材随舰保障过程中可能出现器材供应充足和供应短缺两种情况,即

$$\begin{cases} S_i - S'_i > 0, & S_i > S'_i \\ S_i - S'_i \leq 0, & S_i \leq S'_i \end{cases} \quad (6)$$

当 $S_i < S'_i$ 时,说明器材短缺,此时可利用系统达到稳态

时,  $S_i - S'_i$  的稳态值为第  $i$  项特装器材期望短缺数  $EBO_i$ 。其表达式为

$$EBO_i = \sum_{x=S_i+1}^{\infty} (x-S_i)P_i(x) = \sum_{x=S_i}^{\infty} (x-S_i) \frac{(N_i \lambda_i t_i)^x}{x!} \exp(-N_i \lambda_i t_i) \quad (7)$$

于是, 得到单项器材在供应短缺时的利用率为

$$R_i^1 = 1 - \frac{EBO_i}{S_i} \quad (8)$$

此时, 系统利用率  $R_s^1$  为

$$R_s^1 = \frac{\sum_{i=1}^l \lambda_i R_i^1}{\sum_{i=1}^l \lambda_i} \quad (9)$$

当  $S_i > S'_i$  时, 表示器材供应充足。此时的器材利用率可根据待收器材数量求得, 即

$$R_i^2 = 1 - \frac{E[X_i]}{S_i} = 1 - \frac{\lambda_i t_i}{S_i} \quad (10)$$

由式(9), 同理得到特装器材的系统利用率  $R_s^2$ 。

由条件概率得到特装器材的系统利用率  $R_s$  的模型, 即

$$R_s = (1 - P_s) \cdot R_s^1 + P_s R_s^2 \quad (12)$$

### 1.3 约束条件

考虑舰船仓库的携带能力、空间、经费限制, 可将这些约束问题进行量化处理, 在空间、质量、费用约束下通过确定特装器材种类的合理搭配, 使系统备件保障概率和利用率达到最优。

舰上仓库配置的特装器材所占用空间必须不超过舰上仓库的总空间  $V_s$ , 即

$$\sum_{i=1}^l S_i V_i \leq V_s \quad (13)$$

舰上仓库配置特装器材的总质量必须不大于舰上规定的仓库质量指标  $m_s$ , 即

$$\sum_{i=1}^l S_i m_i \leq m_s \quad (14)$$

舰上仓库配置特装器材的总配置费用必须不超过事先给定的保障经费指标  $C_s$ , 即

$$\sum_{i=1}^l S_i C_i \leq C_s \quad (15)$$

### 1.4 优化模型建立

考虑到存储空间、载荷、费用的限制, 并以此作为模型的约束条件, 以特装器材系统保障概率和利用率为优化目标, 建立随舰特装器材优化配置模型

$$\begin{cases} \max (P_s, R_s) \\ \text{st} \begin{cases} \sum_{i=1}^l S_i V_i \leq V_s \\ \sum_{i=1}^l S_i m_i \leq m_s \\ \sum_{i=1}^l S_i C_i \leq C_s \\ S_i \in N^+ \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

## 2 模型求解算法

### 2.1 粒子群多目标优化算法

特装器材种类繁多, 上述模型属于大规模、多变量、非线性的 NP 难题, 采用智能算法可提高求解效率。常见的多目标优化算法包括多目标遗传算法、多目标粒子群算法、多目标差分进化算法、多目标免疫算法等<sup>[12,13]</sup>。在这些算法中, 多目标粒子群算法因其求解速度快而得到广泛应用, 由于随舰特装器材的优化配置涉及到成千上万种器材, 运算量较大, 算法收敛速度快则确保优化配置的时效性。但由于粒子群算法容易陷入局部最优, 因此, 通过对标准多目标粒子群算法速度、种群动态性等方面进行改进, 保证全局范围内粒子的多样性, 提高搜索全局最优解的能力, 避免算法过快收敛。

### 2.2 算法改进与模型求解

由于篇幅有限, 多目标标准粒子群算法的原理和求解步骤<sup>[13,14]</sup>不再赘述, 在标准算法基础上进行改进。

1) 构造适应度函数。多目标粒子群优化形式为令目标函数最小化, 通过优化得到保障概率和利用率同时最大的方案, 是一个理想解, 往往不存在。实际应用中可通过目标加权法实现配置方案优劣排序, 因此将多目标函数变形为

$$\min F = 1 / \max (\rho_1 P_s + \rho_2 R_s) \quad (17)$$

式中,  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  分别为特装器材保障概率和利用率的权重。

2) 种群更新的改进。标准算法中, 种群粒子更新受到速度的影响, 速度由粒子个体、群体位置、惯性权重决定。为使粒子活动实现动态调整, 在优化初期, 将  $\omega$  赋予较大值, 提高粒子活动范围, 增加全局搜索能力; 当进入优化后期, 粒子在全局最优解附近搜索时, 需要减小  $\omega$  值, 提高粒子在最优解附近的局部搜索能力。因此, 对粒子速度公式中的惯性权重作如下改进:

$$\omega = \omega_s - (\omega_s - \omega_e) \frac{I_k}{I_{\max}} \quad (18)$$

式中,  $\omega_s$  为初始化惯性因子;  $\omega_e$  为后期调整后的惯性因子;  $I_k$  为当前迭代次数;  $I_{\max}$  为最大迭代次数。

3) 动态粒子群生成。通过对决策空间内的种群量进行动态调整, 使得种群数量不至于过多或过少而影响粒子运动的稳定性, 进而影响算法收敛速度。设定粒子群之间距离的最大值  $d_{\max}$ , 在标准粒子群生成的基础上, 将距离大于  $d_{\max}$  的群体之间插入一个新的种群, 且种群内粒子的位置由下式决定, 即

$$X_{\text{new}}^{mn} = \text{floor} \left( \frac{X_a^{mn} + X_b^{mn}}{2} + c_1^{(-1)\text{round}(0.5+c_2)} \frac{|X_a^{mn} - X_b^{mn}|}{2} \right) \quad (19)$$

式中,  $X_{\text{new}}^{mn}$  为新生成种群第  $m$  个粒子的  $n$  维分量;  $X_a^{mn}$ 、 $X_b^{mn}$  为相邻距离大于  $d_{\max}$  的两个种群第  $m$  个粒子的  $n$  维分量;  $c_1$ 、 $c_2$  为速度更新参数;  $\text{round}(\cdot)$  为四舍五入取整函数,  $\text{floor}(\cdot)$  为向下取整函数。

4) 粒子越界修正。若定义域内种群内粒子越界, 则通过引入调整因子, 并将其代入粒子更新公式, 与下一时刻的速

度值相乘,以改变粒子运动方向,保证决策空间内粒子的多样性。调整因子取值由下式确定,即

$$\rho = \frac{2}{\gamma^2 + 2} \quad (20)$$

式中,  $\rho$  为调整因子;  $\gamma$  为调整次数。  $\gamma$  的取值可根据修正后下一时刻的粒子的位置而定,当  $\gamma \in [0,2]$  时,若下一时刻粒子仍越界,则调整使得  $\gamma \geq 3$ , 因为粒子下一时刻的运动方向即为相反方向。

结合以上改进措施,利用基于改进的多目标粒子群算法通过 Matlab 软件<sup>[15]</sup>对模型(16)进行优化求解,算法求解流程如图1所示。

### 3 案例分析

以某舰船装备中某设备为例,其中该设备的特装器材清单包含 100 多种器材,由于文章篇幅限制及保密要求,文中不能列出所有的器材参数和名称,但对该类问题的分析方法是相同的。以 12 种关重特装器材的配置方案为例,在表 1 相关数据的基础上,研究随舰特装器材配置优化方案。

由多目标粒子群算法程序对式(16)进行求解,算法参数设置为:种群规模为 100,迭代次数为 200,初始惯性权重  $\omega = 0.6$ ,速度更新参数  $c_1$ 、 $c_2$  分别设为 1.3 和 1.5,通过将两指标设置为不同的比例,每种比例条件仿真 50 次,得到 11 组比例的改进粒子群算法(IPA)与标准粒子群算法(PA)的适应度值对比结果(表 2)。

表 2 结果表明,改进算法所得的各组最大值及均值均好于标准算法所得结果,说明改进算法在一定程度上克服了标准算法容易陷入局部最优的缺点,且算法更加稳定。当  $\rho_1 = 1$

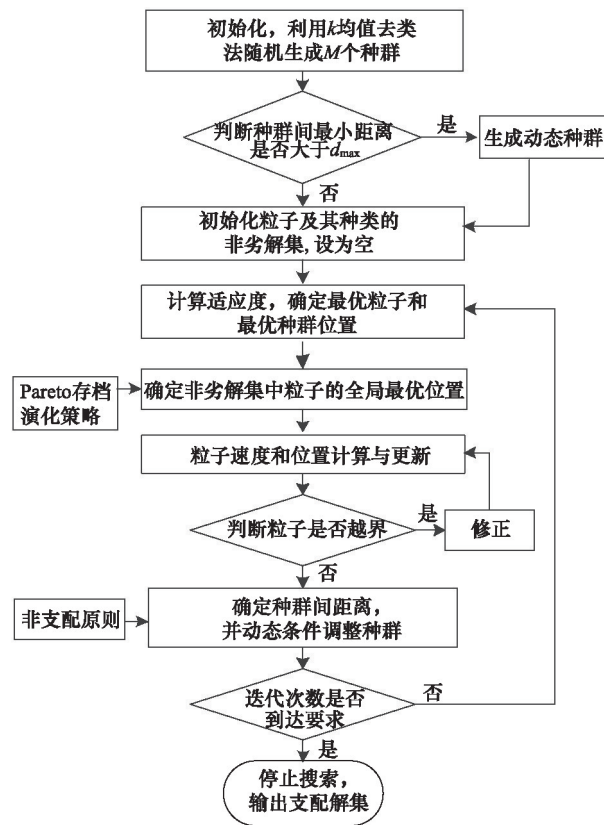


图1 算法求解流程

Fig. 1 Flow chart of algorithm solution

时,模型为保障概率的单目标优化,将本文数据采用文献[2]的拉格朗日松弛算法求解,得到单目标多约束条件下最优配

表 1 特装器材相关参数

Table1 Parameters of special equipment materials

器材名称	故障率/ d <sup>-1</sup>	装机数	体积/ m <sup>3</sup>	质量/ kg	费用/ 万元	周转时间/ d	体积约束/ m <sup>3</sup>	质量约束/ kg	费用约束/ 万元
LRU <sub>1</sub>	0.0647	1	0.49	19.6	1.4	15	20	680	110
LRU <sub>2</sub>	0.0420	2	0.82	27.3	3.1	15	20	680	110
LRU <sub>3</sub>	0.0467	1	0.64	21.4	2.5	15	20	680	110
LRU <sub>4</sub>	0.0569	1	0.75	23.8	1.5	15	20	680	110
LRU <sub>5</sub>	0.0521	2	0.38	16.7	3.7	15	20	680	110
LRU <sub>6</sub>	0.0486	1	0.56	20.1	4.2	15	20	680	110
LRU <sub>7</sub>	0.0785	1	0.87	22.4	3.5	15	20	680	110
LRU <sub>8</sub>	0.0664	1	0.68	25.7	4.7	15	20	680	110
LRU <sub>9</sub>	0.0539	1	0.55	19.4	2.2	15	20	680	110
LRU <sub>10</sub>	0.0415	2	0.69	20.9	1.9	15	20	680	110
LRU <sub>11</sub>	0.0714	1	0.74	23.6	5.6	15	20	680	110
LRU <sub>12</sub>	0.0489	2	0.42	21.1	4.5	15	20	680	110

置方案为(3,2,2,3,3,2,4,2,3,2,2,3),且最大保障概率为0.9462,与本文的结果相同,验证了本文模型和算法的正确性。当 $\rho_2 = 1$ 时,系统利用率作为单优化指标的最优配置方案为(3,1,

2,2,5,2,4,3,3,2,3,2),其最大利用率值为0.6752。在表2基础上,得到11组权重比例的最优配置方案及相关参数(表3)。

表2 不同目标权重下IPA与PA计算结果对比

Table 2 Comparison of calculation results of IPA and PA under different target weight

适应度	$\rho_2 = 1$		0.1:0.9		0.2:0.8		0.3:0.7		0.4:0.6		0.5:0.5	
	IPA	PA	IPA	PA	IPA	PA	IPA	PA	IPA	PA	IPA	PA
最大值	0.6752	0.6526	0.6932	0.6856	0.7175	0.7080	0.7403	0.7327	0.7730	0.7583	0.8068	0.7938
最小值	0.5580	0.5412	0.6153	0.6111	0.6376	0.6326	0.6593	0.6552	0.6877	0.6821	0.7300	0.7245
平均值	0.6141	0.6006	0.6527	0.6486	0.6759	0.6698	0.6984	0.6923	0.7282	0.7209	0.7671	0.7614
适应度	0.6:0.4		0.7:0.3		0.8:0.2		0.9:0.1		$\rho_1 = 1$			
	IPA	PA	IPA	PA	IPA	PA	IPA	PA	IPA	PA		
最大值	0.8128	0.8094	0.8482	0.8445	0.8756	0.8702	0.9188	0.9103	0.9462	0.9383		
最小值	0.7687	0.7599	0.7891	0.7839	0.8202	0.8155	0.8624	0.8542	0.9264	0.9121		
平均值	0.7928	0.7886	0.8250	0.8217	0.8506	0.8442	0.8874	0.8765	0.9308	0.9237		

表3 不同权重比下的特装器材最优配置方案

Table 3 Optimal configuration of special equipment materials under different weight ratio

权重比 $\rho_1: \rho_2$	最优配置方案	体积/ $m^3$	载荷/ kg	费用/ 万元	保障概率	利用率	适应度
$\rho_2 = 1$	(3,1,2,2,5,2,4,3,3,2,3,2)	19.7	679.9	106.5	0.9383	0.6752	0.6752
0.1:0.9	(2,2,2,2,2,3,3,2,4,3,4,2)	19.9	673.4	102.8	0.9329	0.6666	0.6932
0.2:0.8	(3,3,3,2,4,2,4,2,2,2,2,2)	19.6	670.5	99	0.9424	0.6613	0.7175
0.3:0.7	(4,1,2,3,3,3,3,2,3,1,3,3)	18.9	662.1	100.6	0.9265	0.6605	0.7403
0.4:0.6	(2,2,2,3,3,2,3,3,2,2,2,5)	19.1	675.9	104.5	0.9448	0.6585	0.7730
0.5:0.5	(3,1,2,2,5,2,4,3,3,2,3,2)	19.7	679.9	106.5	0.9383	0.6752	0.8068
0.6:0.4	(2,2,4,3,3,3,2,2,2,1,3,4)	19.0	672.3	104.7	0.9263	0.6425	0.8128
0.7:0.3	(2,2,2,3,3,4,4,3,1,2,2,3)	19.7	676.9	105.2	0.9345	0.6468	0.8482
0.8:0.2	(3,2,1,3,4,1,2,2,3,2,5,3)	19.2	670.6	104.7	0.9297	0.6323	0.8756
0.9:0.1	(3,2,2,3,3,2,4,2,3,2,2,3)	19.5	669.9	97.9	0.9462	0.6717	0.9188
$\rho_1 = 1$	(3,2,2,3,3,2,4,2,3,2,2,3)	19.5	669.9	97.9	0.9462	0.6717	0.9462

不同优化目标的权重比,反映了决策者在根据不同出航任务要求时所考虑的侧重点不同。例如,重大军事任务要求舰船装备有较高的完好率和可用性,因此,选择配置方案时,可选择保障概率权重较高的最优配置方案(2,2,2,3,3,4,4,3,1,2,2,3)、(3,2,1,3,4,1,2,2,3,2,5,3)或(3,2,2,3,3,2,4,2,3,2,2,3),以降低器材短缺而带来任务失败的风险;针对非军事出航任务时,在不要求舰船装备较高的战备完好率的同时,更强调器材的利用效能,则可选择利用率权重较高的最优配置方案(3,3,3,2,4,2,4,2,2,2,2,2)、(4,1,2,3,3,3,3,2,3,1,3,3)或(2,2,2,3,3,2,3,3,2,2,2,5),在部分非关重器材短缺而造成某型功能失效的前提下,保证舰船装备的基本功能即可;当出现介于前两种情况

之间的任务时(如例行巡航值班),可将两指标并重考虑,选择方案(3,1,2,2,5,2,4,3,3,2,3,2)为最优配置方案。

图2、图3、图4分别为体积、质量、费用约束条件下,系统保障概率与利用率在部分可行方案下的变化趋势及不同权重比条件下的适应度。

由图2、图3、图4可看出,随着特装器材配置数量的增加,配置总体积、总质量、总费用与系统保障概率、利用率的关系。由于涉及多种特装器材,其体积、质量、费用各不相同,可通过以上分析,确定可接受的约束条件范围,当目标在约束条件范围内无法达到要求时,需适当放宽约束条件。

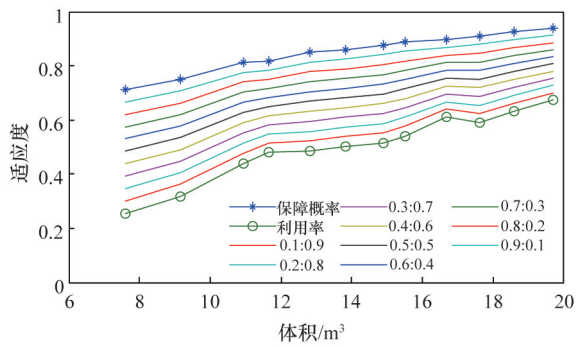


图2 体积约束下的保障概率、利用率与不同权重比下的适应度

Fig. 2 Tendency chart of fill rate, utilization rate and fitness value with different weight ratio under volume constraint

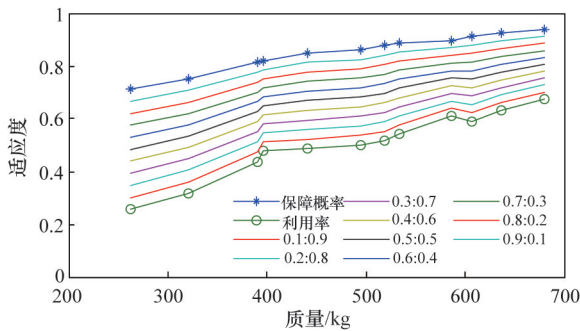


图3 质量约束下的保障概率、利用率与不同权重比下的适应度

Fig. 3 Tendency chart of fill rate, utilization rate and fitness value with different weight ratio under mass constraint

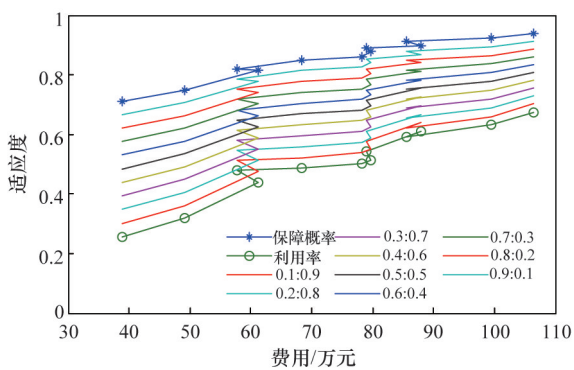


图4 配置费用约束下的保障率、利用率与不同权重比下的适应度

Fig. 4 Tendency chart of fill rate, utilization rate and fitness value with different weight ratio under cost constraint

#### 4 结论

针对舰船任务阶段特装器材配置方案优化问题进行研究,在考虑特装器材体积、质量、费用约束的基础上,将系统保障概率的单目标优化问题扩展到融合利用率在内的多目标优化,建立了多目标多约束下随舰特装器材优化模型。研究并改进了多目标粒子群算法,给出了求解优化模型步骤。

算例结果验证本文所研究模型及其算法的优点和实用性,为特装配置多属性决策提供了一种新的思路。

#### 参考文献(References)

- [1] 王乃超,康锐. 多约束条件下备件库存优化模型及分解算法[J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 247-251.  
Wang Naichao, Kang Rui. An optimization model for inventory spares under multi- constraints and its decomposition algorithm [J]. Acta Armamentar II, 2009, 30(2): 247-251.
- [2] 阮旻智,李庆民,张光宇,等. 多约束下舰船装备携行备件保障方案优化方法[J]. 兵工学报, 2013, 34(9): 1144-1149.  
Ruan Minzhi, Li Qingmin, Zhang Guangyu, et al. Optimization method of carrying spare parts support project for warship equipment under multi-constraints[J]. Acta Armamentar II, 2013, 34(9): 1144-1149.
- [3] 刘勇,盖强,赵翀,等. 多约束下舰船远航备件储量决策[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(11): 144-147.  
Liu Yong, Gai Qiang, Zhao Chong, et al. Research on spare parts storage decision for ships on sailing in multi-restraint[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(11): 144-147.
- [4] 张志华,费广玉,应新雅. 基于满足率的随舰备件配置方案 [J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(6): 73-77.  
Zhang Zhihua, Fei Guangyu, Ying Xinya. Configuration scheme for shipboard spares according to sufficient rate[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2014, 26(6): 73-77.
- [5] 费广玉,张志华,刘军,等. 舰船随舰备件配置方法[J]. 指挥控制与仿真, 2014, 36(3): 133-136.  
Fei Guangyu, Zhang Zhihua, Liu Jun, et al. Configuration method of spares on warship[J]. Command Control & Simulation, 2014, 36(3): 133-136.
- [6] Zhang Yongqiang, Xu Zongchang, Guo Jian. Shipborne spare parts support scheme based on multi- group and multi- objective particle swarm optimization[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(10): 2423-2429.
- [7] Reyes Sierra M, Coello C A C. Multi-objective particle swarm optimizers: a survey of the state-of-the-art[J]. International of Computational Intelligence Research, 2006, 2(3): 287-308.
- [8] Kumar R, Sharma D, Sadu A. A hybrid multi-agent based particle swarm optimization algorithm for economic power dispatch [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(1): 115-123.
- [9] 叶洪涛,罗飞,许玉格. 解决多目标优化问题的差分进化算法研究进展[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(7): 922-928.  
Ye Hongtao, Luo Fei, Xu Yuge. Differential evolution for solving multi-objective optimization problems: A survey of the state-of-the-art[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(7): 922-928.
- [10] 郭俊,桂卫华,陈晓方. 基于粗糙集理论与差分进化的混合多目标优化算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(5): 736-740.  
Guo Jun, Gui Weihua, Chen Xiaofang. A hybrid algorithm based on rough set theory and differential evolution for multi- objective optimization[J]. Control and Decision, 2013, 28(5): 736-740.
- [11] 赵建忠,李海军,叶文,等. 改进系统备件满足率约束下的备件优化配置建模[J]. 兵工学报, 2013, 34(9): 1187-1192.  
Zhao Jianzhong, Li Haijun, Ye Wen, et al. Optimization configuration modeling of spare parts under constraint of improved system spare part fill rate[J]. Acta Armamentar II, 2013, 34(9): 1187-1192.
- [12] 肖晓伟,肖迪,林锦国,等. 多目标优化问题的研究概述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 805-808.  
Xiao Xiaowei, Xiao Di, Lin Jinguo, et al. Overview on multi-objective optimization problem research[J]. Application Research of Computer, 2011, 28(3): 805-808.
- [13] 王丽萍,江波,邱飞岳. 基于决策偏好的多目标粒子群算法及其应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 140-148.  
Wang Liping, Jiang Bo, Qiu Feiyue. Multi-objective particle swarm optimization based on decision preferences and its application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 140-148.

(责任编辑 韩星明)