

# 基于模糊原理和蚁群算法的备件配置优化研究

张倩<sup>1,2</sup>, 陈桂明<sup>1</sup>, 颜宁<sup>2</sup>, 苏保忠<sup>3</sup>

(1. 第二炮兵工程大学 装备管理教研室, 陕西 西安 710025;  
2. 装备研究院, 北京 100085; 3. 96117 部队, 山东 莱芜 271100)

**摘要:**根据装备维修备件实际特点, 针对备件重要性评价不易、建立备件配置模型较难等问题, 提出运用模糊原理和蚁群算法建立备件重要性评价模型和备件数量配置模型, 对装备维修备件配置进行定量研究。通过计算三角模糊数优势度构造模糊判断互补矩阵, 量化备件间重要性程度, 并构造蚁群算法计算模型计算备件配置数, 获取最优配置方案。研究表明, 使用三角模糊数进行备件间重要性评价, 可以改善判断柔性, 蚁群算法计算模型配置结果符合实际, 决策结果可为决策者提供技术支持, 有利于提高装备维修保障力量配置效率, 充分发挥备件资源的作用。

**关键词:**三角模糊数; 蚁群算法; 备件配置; 费用

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2013)03-0045-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.03.012

## Optimizing Spare Parts Research Based on Fuzzy Theory and Ant Colony Algorithm

ZHANG Qian<sup>1,2</sup>, CHEN Gui-ming<sup>1</sup>, YAN Ning<sup>2</sup>, SU Bao-zhong<sup>3</sup>

(1. Institution of Equipment Management Teaching and Research, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;  
2. Equipment Research Institute, Beijing 100085, China; 3. 96117 Troops, Laiwu 271100, China)

**Abstract:** Based on the character of maintenance spare parts, in view of the problems of difficultly evaluating the importance of maintenance spare parts and building the model of spare parts support, fuzzy theory and ant colony algorithm were applied to build the model for studying the importance and optimizing support of spare parts, research the allocation work quantificationally. Triangular fuzzy number can be used to construct the complementary judgment matrix based on the analysis of dominance degree which quantifies the importance of spare parts. The ant algorithm model of spare parts support can calculate the best configure scheme. The results show that triangular fuzzy number is fit to evaluate the importance of spare parts and it can improve the evaluation effect. And the allocation result by ant algorithm model satisfies the fact, it provides technique support for decision-making. It is benefit to advance the maintenance support efficiency and exert the function of maintenance resources adequately.

**Key words:** triangular fuzzy number; ant colony algorithm; spare parts support; fee

## 0 引言

备件是装备维修中的核心资源。备件的储量配置直接影响军事作战、维修费、存储费等, 因此, 必须确定合理的备件配置, 使其同时达到作战和经费要求<sup>[1,2]</sup>。

利用智能算法研究装备备件配置已有较多研究成果<sup>[3~6]</sup>, 但往往存在下列某些缺陷: 没有考虑群组评价; 忽视个人判断存在一定的模糊性; 算法结果不稳定, 易陷于局部最优解。本研究以最大作战效益为根

本要求, 根据三角模糊数结构特点, 使用模糊原理建立备件重要性评价模型, 运用蚁群算法确定最优备件配置方案。

## 1 备件配置目标模型

备件总采购资金为  $C$ , 需采购  $n$  类备件, 其中, 第  $i$  类的需求最大值  $r_i$ , 计划采购  $x_i$  件, 单价为  $p_i$ , 带来军事效益因子为  $b_i$ 。优化目标是以军事作战效益最大, 建立数学模型如下:

$$\text{目标函数: } \max \sum_{i=1}^n b_i x_i$$

$$\text{约束条件: } \sum_{i=1}^n p_i x_i \leq C,$$

收稿日期: 2012-07-03; 修回日期: 2012-10-09

基金项目: "十二五" 国防预研重点资助项目 (2011222023)

作者简介: 张倩 (1984-), 女, 博士研究生, 助工, 研究方向为装备维修保障。

其中,  $0 \leq x_i \leq r_i (i = 1, 2, \dots, n)$   
这是一个整数优化和典型的组合优化问题。

2 基于模糊原理的备件重要性评价模型

2.1 根据专家组评分计算模糊互反矩阵

专家对不同备件军事效益的认识具有主观性,为减少评价误差,文中采用 2 个措施保障评价正确:

- (1)采用模糊原理。为了增强判断的柔性使判断过程更加合理,以模糊数等不确定形式代替刚性的确定数值,表示专家对备件间相对重要性的比较结果<sup>[7]</sup>;
- (2)成立专家组,由多名专家对不同备件的军事效益重要性进行评价,分别计算备件军事效益因子,最后取平均值。

文中使用三角模糊数  $\tilde{a}$  来标定相对重要性。若三角模糊数  $\tilde{a} = (a^l, a^m, a^u)$ , 其中  $0 < a^l \leq a^m \leq a^u$ , 则称  $a^l$  和  $a^u$  分别称为  $\tilde{a}$  的下界和上界,  $a^m$  为  $\tilde{a}$  的中值。 $\tilde{a}$  的隶属函数如式(1)所示。

$$\mu_{\tilde{a}}(x) = \begin{cases} \frac{x - a^l}{a^m - a^l} a^m \leq x \leq a^u \\ \frac{x - a^l}{a^m - a^l} a^l \leq x < a^m \\ 0 \quad x > a^u, x < a^l \end{cases} \quad (1)$$

对任意 2 个模糊数  $\tilde{a} = (a^l, a^m, a^u)$  和  $\tilde{b} = (b^l, b^m, b^u)$ , 其运算规则有<sup>[8]</sup>:

- 1)  $\tilde{a} \oplus \tilde{b} = (a^l + b^l, a^m + b^m, a^u + b^u)$
- 2)  $\tilde{a} \otimes \tilde{b} = (a^l b^l, a^m b^m, a^u b^u)$
- 3)  $\frac{\tilde{a}}{\tilde{b}} = (\frac{a^l}{b^u}, \frac{a^m}{b^m}, \frac{a^u}{b^l})$
- 4)  $\tilde{a}^{-1} = (\frac{1}{a^u}, \frac{1}{a^m}, \frac{1}{a^l})$

5) 当且仅当  $a^l = b^l, a^m = b^m, a^u = b^u$  时, 才为  $\tilde{a} = \tilde{b}$   
使用表 1 所示的互反标度表示因素间重要性两两

比较判断的结果, 其对应的三角模糊数  $\tilde{a}_{ij}$  定义为:  $\tilde{1} = (1, 1, 2); \tilde{x} = (x - 1, x, x + 1), x = 2, 3, \dots, 8; \tilde{9} = (8, 9, 9)$ 。通过专家打分和计算, 得到三角模糊判断互反矩阵  $\tilde{a} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$ 。

2.2 转换模糊互反矩阵为模糊互补矩阵

由于判断矩阵的某一行元素集中反映出相应备件间两两比较的偏好, 因次该行所有元素的集结将反映相应备件相对于其他备件的重要度。求取各行数据和

$\bar{a}_i$ , 将  $\bar{a}_i$  规范化, 得到各备件的模糊综合程度值  $\tilde{s}_i$ , 其计算公式见式(2)和(3):

$$\tilde{a}_i = \tilde{a}_{i1} + \tilde{a}_{i2} + \dots + \tilde{a}_{in} = (\sum_{j=1}^n a_{ij}^l, \sum_{j=1}^n a_{ij}^m, \sum_{j=1}^n a_{ij}^u) \quad (2)$$

$$\tilde{s}_i = \tilde{a}_i (\tilde{a}_1 + \tilde{a}_2 + \dots + \tilde{a}_n)^{-1} = \left( \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}^l}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^l}, \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}^m}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^m}, \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}^u}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^u} \right), i \in N \quad (3)$$

利用三角模糊数可能度和优势度概念对任意两个备件的模糊综合程序值  $\tilde{s}_i$  和  $\tilde{s}_j$  进行相互比较<sup>[9]</sup>。

设  $\tilde{a}$  和  $\tilde{b}$  是任意两个模糊数, 称  $V(\tilde{a} \geq \tilde{b}) = \sup_{x \geq y} (\min(\mu_{\tilde{a}}(x), \mu_{\tilde{b}}(y)))$  为  $\tilde{a} \geq \tilde{b}$  的可能度, 其计算公式见式(4)。其中,  $V(\tilde{a} \geq \tilde{b})$  是直接支持  $\tilde{a} \geq \tilde{b}$  的信息度量,  $1 - V(\tilde{b} \geq \tilde{a})$  是间接支持  $\tilde{a} \geq \tilde{b}$  的信息度量, 则二者的算术平均值, 即优势度  $P(\tilde{a} \geq \tilde{b})$  可用来衡量三角模数大小, 其计算公式见式(5)。

$$V(\tilde{a} \geq \tilde{b}) = \begin{cases} 1 & a^m \geq b^m \\ \frac{a^u - b^l}{(a^u - a^m) + (b^m - b^l)} & a^m < b^m \text{ 或 } a^u > b^l \\ 0 & a^u \leq b^l \end{cases} \quad (4)$$

$$P(\tilde{a} \geq \tilde{b}) = \frac{V(\tilde{a} \geq \tilde{b}) + 1 - V(\tilde{b} \geq \tilde{a})}{2} \quad (5)$$

因为优势度具有互补性质 ( $P(\tilde{a} \geq \tilde{b}) + P(\tilde{b} \geq \tilde{a}) = 1$ ), 可利用优势度来构造模糊互补矩阵, 即令  $r_{ij} = P(\tilde{a}_i \geq \tilde{a}_j) (i, j \in N)$ , 矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times n}$  称之为模糊数判断矩阵  $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$  对应的模糊互补优势度矩阵。

2.3 计算备件军事效益因子

按照式(6), 利用模糊互补优势度矩阵  $R$  计算备件的重要度权值, 即军事效益因子。

$$w_i = \frac{1}{n(n-1)} (\sum_{j=1}^n r_{ij} + \frac{n}{2} - 1) \quad (6)$$

依次计算专家组中不同专家的军事效益因子, 然后取平均值, 即得到各种备件的军事效益因子。

3 蚁群算法备件最优配置模型

3.1 蚁群算法的基本原理

蚁群算法是近年来由意大利学者 Dorigo 首先提出的一种新型的模拟进化算法<sup>[10]</sup>, 该算法模仿真实的蚁群行为。蚂蚁运动时, 将信息素留在经过的路径上, 且

表 1 模糊互反比较标度

$x_i$ 与 $x_j$ 重要性比较	同等重要	比较重要	明显重要	非常重要	极其重要	介于之间
$\tilde{a}_{ij}$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}$	$\tilde{5}$	$\tilde{7}$	$\tilde{9}$	$\tilde{2}, \tilde{4}, \tilde{6}, \tilde{8}$

注: 根据模糊标度的互反性, 则  $x_i$  和  $x_j$  重要性相比较的模糊比率  $\tilde{a}_{ji} = \tilde{a}_{ij}^{-1}$

相互间能够感知该物质的存在及强度,用以指导自己的运动方向。蚁群算法是一种通过类比组合优化和蚁群觅食行为而构造的算法,在各种组合优化问题求解中得到广泛而有效的应用<sup>[11~13]</sup>,如:背包问题、生产调度问题、旅行商问题(TSP)等,具有较强的鲁棒性、分布式计算、正反馈计算等优点。

3.2 基于蚁群算法求解模型

步骤1:参数初始化。初始化每个备件信息素  $\tau_i = \tau_0, \tau_0$  为一正数,文中取  $\tau_0 = 1$ 。蚂蚁初始个数为  $M$ 。 $n$  种备件对应的军事效益因子和最大采购量为  $(w_1, r_1), (w_2, r_2), \dots, (w_n, r_n)$ , 则  $n$  种备件的最大采购总量为:  
$$N = \sum_i^n r_i$$
,依次给每个备件编号。构造赋权邻接矩阵 Distance 和启发因子矩阵  $\eta$ ,均等于备件军事效益因子矩阵:

$$(w_{ij})_{N \times N} = \begin{bmatrix} \overbrace{w_1 \cdots w_1}^{r_1 \uparrow} & \overbrace{w_2 \cdots w_2}^{r_2 \uparrow} & \cdots & \overbrace{w_n \cdots w_n}^{r_n \uparrow} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \overbrace{w_1 \cdots w_1}^{r_1 \uparrow} & \overbrace{w_2 \cdots w_2}^{r_2 \uparrow} & \cdots & \overbrace{w_n \cdots w_n}^{r_n \uparrow} \end{bmatrix}$$

步骤2:将  $M$  只蚂蚁随机放到  $N$  个备件上。构造第  $m$  只蚂蚁在第  $t$  时刻可选备件的集合为  $S$ 。若该备件还未被选中,则继续参与到该蚂蚁的下次筛选。

步骤3:计算蚂蚁在该时刻未被选择的备件转移概率  $p_i(t)$ 。

$$p_i(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_i(t))^\alpha \cdot (\eta_i(t))^\beta}{\sum_{s \notin \text{tabu}(t)} (\tau_s(t))^\alpha \cdot (\eta_s(t))^\beta} & i \notin \text{tabu}(t), i \text{ 备件未被选择} \\ 0 & i \in \text{tabu}(t), i \text{ 备件已被选择} \end{cases} \quad (7)$$

步骤4:根据  $P_i(t)$ ,按照赌轮选择算法确定该蚂蚁在该时刻选择的备件。

步骤5:对选择的备件进行判断。如果选择该备件,将该备件标号加入该蚂蚁的禁忌表  $\text{tabu}_i$  中,若此时总资金不超过采购经费,表示采购该备件,同时转步骤2,继续该蚂蚁对剩余备件的搜索。若该备件的选择导致总资金超额,则不采购该备件,同时转步骤2,继续该蚂蚁对剩余备件的搜索。

步骤6:搜索完所有蚂蚁,本次迭代完成,计算该迭代中所有蚂蚁的最优解。若达到最大迭代次数 ( $NC = NC_{\max}$ ),则输出所有迭代次数中的最优解,否则转步骤7,同时  $NC = NC + 1$ 。

步骤7:更新每个备件的信息素,见式(8)、(9)、(10)。

$$\tau_i(t+1) = (1-\rho) \times \tau_i(t) + \Delta\tau_i, \rho \in (0,1) \quad (8)$$

$$\Delta\tau_i = \sum_{j=1}^m \Delta\tau_i^j, \rho \in (0,1) \quad (9)$$

$$\Delta\tau_i^j = \begin{cases} \frac{L_j}{Q}, & \text{若蚂蚁选择的备件包括 } i \\ 0, & \text{若蚂蚁选择的备件不包括 } i \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\rho$  是该备件的信息素蒸发系数; $\Delta\tau_i$  是本次迭代中备件上的信息素增量; $\Delta\tau_i^j$  是第  $j$  只蚂蚁在备件  $i$  上留下的信息素量; $Q$  为常数; $L_j$  是第  $j$  只蚂蚁在本次迭代中的解。

4 实例研究及结果分析

4.1 原始数据

共有6种待采购备件,最大采购费用为25万。6种备件最大采购数量为[3 4 5 3 4 4],其对应单价为[1.9 1.8 2 1.1 1.5 2](单位:万)。

由3名专家对6个备件的军事效益重要度进行两两比较判断,得三角模糊数互反判断矩阵分别为:

$$\begin{bmatrix} 1 & \tilde{2} & \tilde{3}^{-1} & \tilde{3} & \tilde{2} & \tilde{1} \\ \tilde{2}^{-1} & 1 & \tilde{3} & \tilde{2}^{-1} & \tilde{2}^{-1} & \tilde{3} \\ \tilde{3} & \tilde{3}^{-1} & 1 & \tilde{5}^{-1} & \tilde{6}^{-1} & \tilde{2}^{-1} \\ \tilde{3}^{-1} & \tilde{2} & \tilde{5} & 1 & \tilde{1} & \tilde{2} \\ \tilde{2}^{-1} & \tilde{2} & \tilde{6} & \tilde{1}^{-1} & 1 & \tilde{3} \\ \tilde{1}^{-1} & \tilde{3}^{-1} & \tilde{2} & \tilde{2}^{-1} & \tilde{3}^{-1} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \tilde{3} & \tilde{5}^{-1} & \tilde{4} & \tilde{1} & \tilde{2} \\ \tilde{3}^{-1} & 1 & \tilde{4} & \tilde{1} & \tilde{2} & \tilde{3} \\ \tilde{5} & \tilde{4}^{-1} & 1 & \tilde{5}^{-1} & \tilde{3}^{-1} & \tilde{5}^{-1} \\ \tilde{4}^{-1} & \tilde{1}^{-1} & \tilde{5} & 1 & \tilde{3} & \tilde{2} \\ \tilde{1}^{-1} & \tilde{2}^{-1} & \tilde{3} & \tilde{3}^{-1} & 1 & \tilde{1} \\ \tilde{2}^{-1} & \tilde{3}^{-1} & \tilde{5} & \tilde{2}^{-1} & \tilde{1}^{-1} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \tilde{2} & \tilde{1} & \tilde{5} & \tilde{2} & \tilde{1} \\ \tilde{2}^{-1} & 1 & \tilde{3} & \tilde{2}^{-1} & \tilde{2}^{-1} & \tilde{1} \\ \tilde{1}^{-1} & \tilde{3}^{-1} & 1 & \tilde{5}^{-1} & \tilde{3}^{-1} & \tilde{2}^{-1} \\ \tilde{5}^{-1} & \tilde{2} & \tilde{5} & 1 & \tilde{2} & \tilde{2} \\ \tilde{2}^{-1} & \tilde{2} & \tilde{3} & \tilde{2}^{-1} & 1 & \tilde{3} \\ \tilde{1}^{-1} & \tilde{1}^{-1} & \tilde{2} & \tilde{2}^{-1} & \tilde{3}^{-1} & 1 \end{bmatrix}$$

4.2 参数设定及优化结果

利用公式(2)~(6)将专家组三角模糊数互反判断矩阵转换为模糊互补矩阵,结果为:

0.5	0.5316	0.7213	0.4332	0.3696	0.7206
0.4684	0.5	0.6899	0.3966	0.3299	0.6895
0.2787	0.3101	0.5	0.1892	0.1180	0.5024
0.5668	0.6034	0.8108	0.5	0.4355	0.8093
0.6304	0.6701	0.8820	0.5645	0.5	0.8799
0.2794	0.3105	0.4796	0.1907	0.1201	0.5
0.5	0.5067	0.7268	0.4542	0.5624	0.6596
0.4933	0.5	0.7206	0.4469	0.5554	0.6529
0.2732	0.2794	0.5	0.2174	0.3406	0.4412
0.5458	0.5531	0.7826	0.5	0.6129	0.7134
0.4376	0.4446	0.6594	0.3871	0.5	0.5939
0.3404	0.3471	0.5588	0.2866	0.4061	0.5
0.5	0.6490	0.9158	0.4770	0.4984	0.7736
0.3510	0.5	0.7403	0.3301	0.3525	0.5959
0.0842	0.2597	0.5	0.0734	0.0960	0.3727
0.5230	0.6699	0.9266	0.5	0.5231	0.7924
0.5016	0.6475	0.9040	0.4769	0.5	0.7679
0.2264	0.4041	0.6273	0.1907	0.2321	0.5

通过式(7)得到 3 个专家换算的备件军事效益因子分别为:[0.1759 0.1691 0.1299 0.1909 0.2042 0.1299]、[0.1803 0.1790 0.1351 0.1903 0.1674 0.1480]、[0.1938 0.1623 0.1129 0.1978 0.1933 0.1399],对其平均取值得到最终的军事效益因子[0.1833 0.1701 0.1260 0.1930 0.1883 0.1393]。

采用蚁群算法求解,参数设置为: $M=20, \tau_0=1, \alpha=1, \beta=5, \rho=0.1, NC_{max}=100, Q=50$ 。为比较蚁群算法求解效果,文中也使用分支界定法来进行求解,通过计算,两种算法的求解结果均为[3 4 0 3 4 1],效益因子总和为 2.7018,总费用为 24.2 万。图 1 显示蚁群算法中不同迭代次数计算中效益因子总和值。由图可知,在绝大多数迭代计算中都能达到最优值,表明蚁群算法模型能够较快得到最优解。

5 结束语

文中提出运用模糊原理和蚁群原理建立备件重要性评价模型和备件数量配置模型。

(1)专家组利用三角模糊数进行备件间重要性评价,可以减小刚性数字带来的判断误差,改善判断柔性;

(2)通过计算三角模糊数优势度构造模糊判断互补矩阵,量化备件间重要性程度,得到备件军事效益因子;

(3)将军事效益因子设为赋权邻接矩阵和启发因子,构造蚁群算法计算备件最优配置模型,能够较快得

到最优配置解。

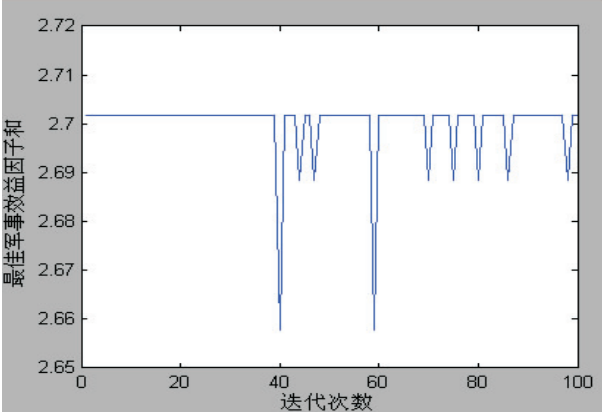


图 1 迭代计算中最佳军事效益因子和变化图

参考文献:

[1] 李 阳. 基于装备战备完好性的备件配置优化研究[D]. 成都:电子科技大学,2009.

[2] 刘新亮,张 涛,郭 波. 基于分布估算法的备件优化配置[J]. 系统工程理论与实践,2009(2):144-150.

[3] 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(2):121-125.

[4] 董博超,宋保维,梁庆卫,等. 基于马尔可夫模型的备件配置优化方法[J]. 系统工程,2011(9):128-130.

[5] 郑小丽,黎 放,狄 鹏. 整数规划 PSO 算法在备件优化配置中的应用研究[J]. 舰船电子工程,2009(3):138-140.

[6] 范 浩,贾希胜,贾云献,等. 基于遗传算法的备件两级优化建模与仿真研究[J]. 系统工程与电子技术,2006(1):152-154.

[7] 苏哲斌. 基于优势度分析的三角模糊数判断矩阵的排序方法[J]. 数学的实践与认识,2010(9):130-134.

[8] Kaufmann A, Gupta M M. Introduction to fuzzy arithmetic theory and applications[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

[9] 曹 东,李 平,周根贵. 基于三角模糊数和层次分析法的模型在导弹系统性能评价中的应用[J]. 兵工学报,2005(4):136-139.

[10] Dorigo M, Caro G D. Ant colony optimization; a new meta-heuristic[C]//Proceeding of the 1999 Congress on Evolutionary Computation. Washington DC, USA: IEEE Press, 1999.

[11] 贾瑞玉,邢 猛,徐庆鹏,等. 一种动态调整的蚁群聚类算法[J]. 计算机技术与发展,2009,19(2):145-147.

[12] 王丽红,倪志伟,高雅卓. 改进的蚁群算法求解多目标车间作业调度问题[J]. 计算机技术与发展,2008,18(10):49-52.

[13] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies[C]//Proc of First European Conf on Artificial Life. Paris, France: Elsevier, 1991:134-142.