

doi: 10.7690/bgzdh.2020.12.002

## 基于重要度和库存限额的航空器材订货决策方法

郭峰<sup>1</sup>, 赵宏强<sup>1</sup>, 任剑<sup>1</sup>, 王庆斌<sup>2</sup>

(1. 海军航空大学青岛校区, 青岛 266041; 2. 海军研究院空中所, 北京 100161)

**摘要:** 为解决航空器材订货决策缺乏理论依据的问题, 提出一种利用器材重要度、库存限额开展航空器材订货决策方法。采用模糊综合评价法、层次分析法建立重要度评估模及库存限额模型, 利用器材的重要度、重要度等级和库存限额并以经费为约束条件建立 3 种器材订货模型。结果表明: 该方法能够为航空器材订货提供智能决策支持, 具有较高的推广应用价值。

**关键词:** 航空器材; 重要度; 重要度等级; 库存限额模型; 订货模型

**中图分类号:** E243 **文献标志码:** A

## Ordering Decision Method of Aviation Spare Parts Based on Importance and Inventory Quota

Guo Feng<sup>1</sup>, Zhao Hongqiang<sup>1</sup>, Ren Jian<sup>1</sup>, Wang Qingbin<sup>2</sup>

(1. Qingdao Branch, Navy Aviation University, Qingdao 266041, China;

2. Air Operations Research Institute of Naval Research Institute, Beijing 100161, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of lack of theoretical basis for the order decision of aviation spare parts, this paper put forward the research on the order decision method of aviation spare parts by spare parts importance and inventory quota. This paper established an importance evaluation and inventory quota models by the fuzzy comprehensive evaluation method and the analytic hierarchy process and established 3 kinds of spare parts ordering models by using the importance, the importance level and the inventory quota of spare parts. The results show that the method can provide intelligent decision support for aviation spare parts ordering, and has high promotion and application value.

**Keywords:** aviation spare parts; importance; importance level; inventory quota model; ordering model

### 0 引言

在航空器材筹措供应标准拟制、舰载机护航携带器材确定、航空装备维修保障计划制订等工作中需要确定哪些器材重要。这些器材的标准需要制订得高一些, 护航时不仅要携带多一些, 而且订货要多订一些。重要度、库存限额标准是订货决策支持系统实现智能决策的重要依据。目前, 我军还没有制订过航空器材的重要度制度, 相关的研究也比较少。杨仕美等于 2014 年阐述了航材备件的精确保障必须将装备的使用情况和备件库存控制问题结合起来, 有利于保障人员进行正确的决策, 但没有制订器材的重要度, 也没有按照采购的必要性等因素制订重要度等级, 其重要度权系数不能用于订货决策<sup>[1]</sup>。冯蕴雯于 2018 年依据重要度代码和分类代码将备件项目分成不同重要度的消耗件、周转件和可修件, 并对不同重要度和不同种类的备件分别进行库存优化配置; 研究了重要度对民机备件库存配置的影响, 但是所用重要度是飞机制造厂直接提供的,

没有提供重要度的制订方法<sup>[2]</sup>。文献[3]考虑了器材成本、供应难易、重要性、所属雷达 4 个因素, 但是没有考虑陆基、舰基、驻岛和演习 4 种典型任务因素; 实际上, 同一个机型可能有多种任务, 而在保障过程中器材在不同任务中的重要性是有区别的。文献[4]没有考虑库存限额标准, 事实上库存限额标准在制订时考虑了上述因素; 也没有考虑制订器材的重要度, 只通过重要性程度的定性判断来分析对订货的影响, 无法为订货提供更直接、更智能的决策支持。周家萱等于 2019 年建立了基于粗糙集全局离散和粒子群算法的启发式航材订货模型<sup>[5]</sup>, 李崇明于 2016 年建立了时寿件和可修件的采购模型<sup>[6]</sup>, 张瑞昌等于 2004 年建立了消耗性航材备件订货模型并提出器材消耗服从泊松分布<sup>[7]</sup>, 石丽娜等于 2004 年建立了基于泊松分布的航材周转件库存量数学模型<sup>[8]</sup>, GJB 8257—2014《通用雷达装备维修器材筹措供应标准编制要求》提出指数寿命件需求在期望均值大于 0.051 时用泊松分布计算<sup>[9]</sup>, GJB

收稿日期: 2020-08-26; 修回日期: 2020-09-19

基金项目: 海军装备部重点科研课题资助

作者简介: 郭峰(1981—), 男, 安徽人, 硕士, 讲师, 从事预测方法与技术、库存优化、决策支持系统研究。E-mail: gf536149@163.com。

4355—2002《备件供应规划要求》提出当期期望均值不大于 5 时采用泊松分布计算<sup>[10]</sup>, GJB 3914—1999《电子对抗装备随机备件概算》认为器材需求服从泊松分布计算而未考虑期望均值对需求分布的影响<sup>[11]</sup>。

为满足现代战争条件下精确器材保障的要求, 急需开展综合运用重要度和库存限额进行航空器材订货决策方法的研究。笔者从重要度评估模型、重要度等级制订方法、库存限额模型、订货模型等方面详细阐述基于重要度和库存限额的航空器材订货决策方法。

## 1 重要度评估模型

拟采用模糊综合评价法、层次分析法等系统综合评价方法确定器材的重要度, 具体方法是: 确定评价因素集、评价等级集, 进行单因素分析, 建立评价矩阵, 采用层次分析法计算各因素的权重, 根据评价矩阵和权向量进行模糊合成, 确定最适合该器材的重要度。

### 1.1 确定评价因素集

从实践工作中发现, 对筹措工作影响比较显著的因素主要包括:

1) 对飞行任务的影响: 若器材对飞机任务的影响很大, 则其故障且器材短缺时将导致飞机无法飞行或任务系统设备无法正常工作, 使正常的训练任务科目无法完成, 此类器材应优先筹措。

2) 筹措难易: 若器材订货周期或修理周期很长, 应该优先订货。

3) 器材消耗量: 若器材的消耗量较大、更换频率高, 其筹措理应给予高度重视。

4) 单价: 单价直接对器材的筹措费用产生影响。因为保障经费的限制, 消耗同样多的数量, 单价较低的器材可适当增加订货, 但单价较高的器材就不允许随意增加。

上述因素常常交织在一起。例如: 有的器材对飞行任务影响较大, 价格非常高, 消耗量较小, 筹措周期较长; 有的器材价格较低, 对飞行任务影响不大, 消耗量较大, 筹措周期短。因此, 必须综合考虑才能反映器材的重要度。

根据上述分析, 可以确定评价因素集为  $U=\{u_1, u_2, u_3, u_4\}=\{\text{对飞行任务影响, 筹措难易, 器材消耗量, 单价}\}$ 。

## 1.2 确定评价等级集并进行单因素分析

### 1.2.1 确定评价等级集

设评价等级集为  $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}=\{\text{很高、较高、一般、较低、低}\}$ 。

1) 对飞行任务影响因素的评价方法。

由部队专家针对器材对飞行任务的影响程度评分得到, 影响越大, 等级越高。

2) 筹措难易因素的评价方法。

由部队专家针对器材筹措的难易程度评分得到, 越难筹措, 等级越高。

3) 器材消耗量因素的评价方法。

初步按照消耗 40 个、20 个、10 个、1 个, 把消耗量分为 5 级, 依次对应评价等级  $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5$ , 原则上以专家评分为准。分级方法可根据实际情况适当调整。对于无消耗的器材, 可以根据器材的 MTBF 或 MTTF 估计其消耗量。设单机安装数为  $N$ , 装备实力为  $M$ , 年飞行小时数为  $t$ , 即为  $(N \cdot M \cdot t) / \text{MTBF}$  或  $(N \cdot M \cdot t) / \text{MTTF}$ 。

4) 器材单价因素的评价方法。

初步按照 500 万元、50 万元、5 万元、0.5 万元把单价分为 5 级, 依次对应评价等级  $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5$ , 原则上以专家评分为准。分级方法可根据实际情况适当调整。

最终的评价结果还需要部队专家根据器材可靠性、存在潜在故障等情况进行修正。

### 1.2.2 单因素分析

对评价因素集中的每个因素  $u_i (i=1, 2, 3, 4)$ , 分析其对于评价等级集  $v_j (j=1, 2, 3, 4, 5)$  的隶属度  $r_{ij}$ , 则第  $i$  个因素的单因素评价结果为:

$$r_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5}), \quad r_i > 0 \text{ 且 } \sum_{j=1}^5 r_{ij} = 1.$$

实施方法: 对飞行任务影响、筹措难易 2 个因素对于评价等级集的隶属度, 由部队专家根据经验评价。为便于实施, 器材消耗量、单价 2 个因素对于评价等级集的隶属度可以先定一个初值, 例如  $r_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5}) = (0.3, 0.25, 0.2, 0.15, 0.1)$ , 然后再由专家根据实际情况进行调整。

## 1.3 建立模糊评价矩阵

模糊等价矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{41} & r_{42} & \cdots & r_{45} \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.4 确定权向量

笔者运用层次分析法确定各因素的权重。

1.4.1 构建递阶层次结构

目标：确定器材的重要度  $A$ 。

准则：保障陆基任务  $B_1$ ，保障舰基任务  $B_2$ ，保障驻岛任务  $B_3$ ，保障演习任务  $B_4$ 。

方案：对飞行任务影响  $C_1$ 、筹措难易  $C_2$ 、消耗量  $C_3$ 、单价  $C_4$ 。

递阶层次结构如图 1 所示。

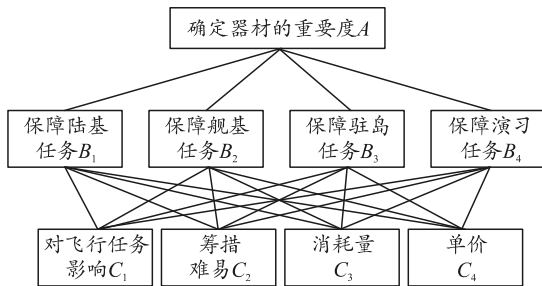


图 1 确定器材的重要度的层次模型

1.4.2 建立判断矩阵

准则层中 4 个准则相对于目标层的判断矩阵

$$A = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} \end{bmatrix} \quad (2)$$

方案层相对于准则  $B_i(i=1,2,3,4)$  的判断矩阵

$$B_i = \begin{bmatrix} C_{i1} & C_{i2} & C_{i3} & C_{i4} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.4.3 层次单排序及一致性检验

计算与准则层、目标层的每个元素相关的紧邻的下层元素之间的相对权重，即计算判断矩阵的最大特征根及其相应的特征向量，具体方法包括方根法、和法、最小二乘法等。特征向量即为权重向量，应作归一化处理。

通过判断矩阵的最大特征根来检验判断的一致性。设  $\lambda_{max}$  为判断矩阵的最大特征根， $m$  为判断矩阵的阶数，则

$$CI = (\lambda_{max} - m) / (m - 1) \quad (4)$$

式中  $CI$  是度量判断矩阵偏离一致性的指标。 $\lambda_{max}=m$  时， $CI=0$ ，表示完全一致； $CI$  越偏离 0，表明判断矩阵的一致性越差。

设  $CR$  为随机一致性比率， $RI$  为平均随机一致性指标，则

$$CR = CI / RI \quad (5)$$

当  $CR < 0.1$  时，认为判断矩阵具有满意的一致性；如果  $CR > 0.1$ ，需调整判断矩阵，使之具有满意的一致性。

1~9 阶判断矩阵的  $RI$  值如表 1 所示。

表 1 判断矩阵的  $RI$  值

|      |   |   |      |     |      |      |      |      |      |
|------|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|
| 阶数   | 1 | 2 | 3    | 4   | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| $RI$ | 0 | 0 | 0.58 | 0.9 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 |

1.4.4 层次总排序及一致性检验

层次总排序是聚合各层权重以得到合成权重向量，即计算最低层因素相对于最高层的相对权重。合成权重向量表示方案层中各元素相对于决策目标的权重排序。

设与目标层相关的准则层元素  $B_i$  之间的相对权重为  $b_i(i=1,2,3)$ ，与准则层的第  $i$  个元素相关的方案层元素  $C_j$  之间的相对权重为  $c_j^i(j=1,2,3,4)$ ，则方案层中各元素对于目标层的综合相对重要性排序值

$$c_j = \sum_{i=1}^3 b_i c_j^i \quad (6)$$

设  $CI_i$  为以  $B_i$  为准则、方案层相关元素相比较组成的判断矩阵的一致性指标， $RI_i$  为以  $B_i$  为准则、方案层相关元素相比较组成的判断矩阵的平均随机一致性指标，则

$$CR = \sum_{i=1}^3 b_i CI_i / \sum_{i=1}^3 b_i RI_i \quad (7)$$

当  $CR < 0.1$  时，认为判断矩阵具有满意的一致性；如果  $CR > 0.1$ ，需调整判断矩阵，使之具有满意的一致性。

1.5 模糊合成并确定器材的重要度

式(6)中的  $c_j$  为各因素的权重，则权重向量为  $c = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ 。将权重向量  $c$ 、模糊评价矩阵  $R$  合成为模糊综合评价结果向量  $S$ ， $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$ ，即可得出

$$S = c \times R \quad (8)$$

根据模糊综合评价结果向量  $S$ ，依据最大隶属原则，确定  $S_{max}$  作为器材的重要度。

## 2 重要度等级制订方法

### 2.1 分级方法

因为器材的保障经费有限,所以有必要对不同器材满足需求的程度予以区别考虑,即需要制定器材的重要度等级。

现有文献一般将器材的重要度等级分为优先级、次优级和末级三级,分别记为第 1、2、3 等。优先级器材是必须购买的,优先满足需求量;次优级器材是在满足优先级器材后,尽可能满足需求;末级器材是满足其他等级器材需求后尽可能满足,允许暂时短缺。但是,现有文献完全根据重要度排序分段制订重要度等级,这种方法与重要度等级要求按满足需求的程度划分的原则不符。

笔者认为,必须围绕不同航空装备维修器材保障的实际需要,分析并找到能够反映器材满足需求程度的因素,然后根据这些因素制订器材的重要度等级。

实际上,重要度等级与重要度所需考虑的因素不同,所以不能完全根据重要度制订重要度等级。下面通过几个例子对此进行说明:

1) 作动筒是比较重要的器材,根据重要度评估模型所计算的重要度相同或相近。其中,有些作动筒故障多,是必须要满足需求的,其重要度等级应定为优先级;但是,也有很多作动筒没有发生过故障或故障很少,这样的作动筒只需要尽量满足需求即可,其等级可定为次优级。虽然作动筒是重要的器材,但是如果都定为优先级,显然是不符合实际保障要求的。

2) 与其他油滤、气滤相比,高压液压油滤的性能要求更高,也更加精密,故障也更多。所以在保障高压液压油滤时,一般要求必须满足需求,其重要度等级应定为优先级。而其他过滤器只需要尽量满足需求即可,其重要度等级可定为次优级。

3) 雷达罩是很重要的器材,根据重要度评估模型所计算的重要度会比较高,但因为过去没有发生过故障或者故障极少,所以只需尽量满足即可,其重要度等级定为次优级比较合适。

通过以上分析可见:不同器材的重要度不能完全反映出其满足需求的程度,重要度等级完全依据重要度排序划分是不合理的。实际上,从器材保障的角度考虑,器材的重要度等级比重要度更加重要,因为它根据满足需求的程度将器材划分为 3 类,分清了订货主次、突出了保障重点,这对确保周转库

存结构整体的合理性是非常重要的。

下面对重要度等级的制订原则和逻辑决断步骤进行详细阐述。

### 2.2 制订原则

笔者根据航空装备维修器材的保障特点与要求,提出了重要度等级制订的主要原则,具体详述如下:

#### 1) 属于必须满足需求的器材:

① 重要的部附件:该类器材对飞行安全、飞行任务科目完成比较重要,包括动部件(如起落架、机轮等)、工作系统附件(如液压泵、舵机、座舱压力调节器等)、任务系统器材(如电台、雷达等)等。

② 耗损故障多的器材:该类器材只要有飞行任务就必有消耗,例如轮胎、动盘、静盘、压紧盘、刹车装置等。

③ 定检消耗的器材:每年定检时会大量消耗一些零件,如密封垫(圈)、螺钉等。

④ 批次到寿的橡胶件:软管、软油箱、橡胶圈等橡胶件的消耗具有批次大量的特点,必须满足其需求。轮胎一般要求分批采购、批次装机,以避免大量到寿报废而造成经费浪费,消耗一般是因磨损造成的。

#### 2) 属于尽量满足需求的器材:

① 故障离散程度大的器材:例如,某型调压器年度消耗最少时为 0 件而最多时为 8 件等;

② 故障率很低的成件:例如,某型液压作动筒近 4 年仅消耗 1 件,某型充气活门近 4 年共消耗 3 件且每年最多消耗 1 件等。

#### 3) 属于允许暂时短缺的器材:

① 过去无故障但有潜在故障的器材;

② 标准件。

上述原则只适用于国产器材。对于进口器材,考虑到当前的国际形势,需按照装备寿命周期的保障需要尽量多采购,其重要度等级均应定为优先级。

### 2.3 逻辑决断步骤

笔者利用逻辑决断分析方法,按照器材满足的程度从高到低的顺序,依次对器材逐项进行分析,最终确定器材的重要度等级,分析过程如图 2 所示,具体步骤如下:

1) 分析是否必须满足需求:根据是否重要的部附件、是否耗损故障多的器材、是否定检消耗的器材、是否批次到寿的橡胶件完成来区分,如果是,

则属于优先级，否，则需要继续分析下一因素；

2) 分析是否尽量满足需求：根据是否故障的离散程度大的器材、是否故障率很低的器材来区分，如果是，则属于次优级，否，则需要继续分析下一因素；

3) 分析是允许暂时短缺：按照是否过去无故障但有潜在故障、是否标准件来区分，如果是，则为末级，否，则不采购。

笔者认为，应由经验丰富的参与一线保障的各专业人员，围绕不同航空装备维修器材保障特点与要求，制订不同器材的重要度等级。

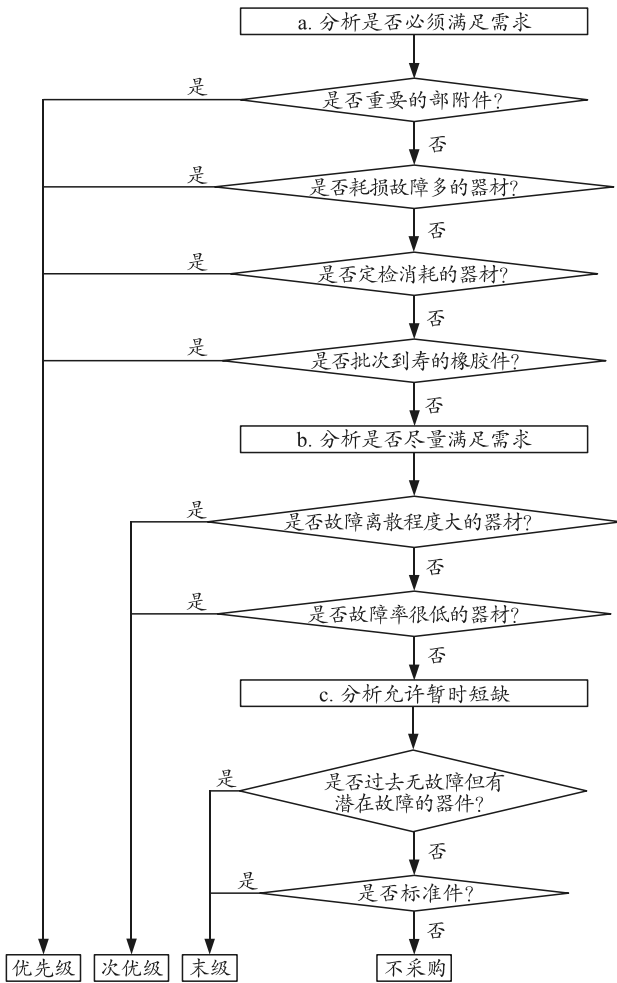


图 2 器材重要度等级逻辑决断

### 3 库存限额模型

设：Z 为现有装备实力，n' 为单装年消耗量，s' 为单装年周转量，n̂ 为年消耗量预测值，ŝ 为年周转量预测值，ξ 为年消耗量和周转量预测值的修正系数，则年消耗量 n̂ 和周转量 ŝ 分别为

$$\hat{n} = n'Z\xi, \quad \hat{s} = s'Z\xi. \quad (9)$$

设：S<sub>L</sub> 为库存下限，S<sub>U</sub> 为库存上限，则库存限

额基本模型为

$$[s_L, s_U] = [\hat{s}, \hat{s} + \hat{n}]. \quad (10)$$

实际订货时，器材现有数和订货数之和应在库存限额内。

设：s<sub>1</sub> 为年故障周转量，s<sub>2</sub> 为年到寿周转量，s<sub>3</sub> 为任务携行量，则年周转量 ŝ 的计算模型为

$$\hat{s} = s_1 + s_2 + s_3. \quad (11)$$

1) 年故障周转量计算模型。

设：s̄ 为年均故障数；T<sub>1</sub> 为修理周期，T<sub>2</sub> 为供货周期，d。则年故障周转量 ŝ<sub>1</sub> 的计算模型为：

$$\hat{s}_1 = \left\{ s \left[ P(x \leq s) = \sum_{x=0}^s P(X=x | \bar{s}T_1T_2) \right] \right\}; \quad (12)$$

$$\text{s.t. } P(x \leq s) \geq 90\% > P(x \leq s-1)$$

$$P(X=x | \bar{s}T_1T_2) = (\bar{s}T_1T_2)^x e^{-\bar{s}T_1T_2} / x!. \quad (13)$$

式中：s ≥ 1；x = 0, 1, 2, ...。

2) 年到寿周转量计算模型。

到寿周转量的预测是以最早到寿的寿命为依据，在一个修理周期内到寿最多的即为其实际周转量。模型建立的关键包括：① 确定该器材最早到寿的寿命；② 将各种寿命指标转化为日历年限。到寿的可修器材中报废的很少，可以忽略不计。

该项器材有 K 件到寿，则其到寿更新时间 t<sub>ds<sub>k</sub></sub> 的分布情况为：

$$t_{ds_k} = \min_{j=1,2,\dots,5} (t_{sy_{kj}} / t_{rw_j}). \quad (14)$$

其中，t<sub>rw<sub>j</sub></sub> ≥ t<sub>sy<sub>kj</sub></sub> > 0, k = 1, 2, ..., K。

设 x<sub>kl</sub> =  $\begin{cases} 1 & t_l \in [t_k, t_k + T) \\ 0 & t_l \notin [t_k, t_k + T) \end{cases}$ , l = 1, 2, ..., K, T 表示

该项器材的修理周期，则其到寿周转量

$$s_2 = \max_{k=1,2,\dots,K} \left( \sum_{l=1}^K x_{kl} \right). \quad (15)$$

3) 年任务携行量。

任务携行量 S<sub>3</sub> 以一年中同一时间任务出动携带器材数量的最大值为准，由专家根据任务方向、平时故障率确定。在确定携带器材的项目和数量时原则上就低不就高，以避免任务方向太多时本场无法保障。

### 4 订货模型

设：

1) I 为采购器材项数。

2) m 为重要度等级数，各等级备件分别记入集

合  $X^j$ , 各集合中器材项数为  $k_j$ , 且  $\sum_{j=1}^m k_j = I$ ,  $j=1,2,\dots,m$ 。

3)  $X_i^j$  为第  $j$  重要度等级集合内第  $i$  项器材的现有数, 包括库存数、送修数、在修数、欠交数,  $i=1,2,\dots,k_j$ 。

4)  $x_i^j$  为第  $j$  重要度等级集合内第  $i$  项器材需采购的数量,  $i=1,2,\dots,k_j$ 。

5)  $[a_i^j, b_i^j]$  为第  $j$  重要度等级集合内第  $i$  项器材的库存限额,  $i=1,2,\dots,k_j$ 。

6)  $c_i^j$  为第  $j$  重要度等级集合内第  $i$  项器材的采购单价(单位: 万元),  $i=1,2,\dots,k_j$ 。

7)  $f$  为预计购置费用, 万元,  $f = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{k_j} c_i^j x_i^j$ 。

8)  $C$  为当年下发的购置经费, 万元。

9)  $C_0$  为当年的购置经费需求, 万元。

航空装备维修器材的周转库存一般可按以下要求控制<sup>[12]</sup>: 第 1 等级器材的库存按“库存限额上限”控制, 第 2 等级器材的库存按“库存限额上下限的平均值”控制, 第 3 等级器材的库存按“库存限额下限”控制。要使周转库存结构达到库存限额标准的要求, 需要的采购经费应达到  $C_0$ , 其计算公式为:

$$C_0 = c_i^1(b_i^1 - X_i^1) + c_i^2((a_i^2 + b_i^2)/2 - X_i^2) + c_i^3(a_i^3 - X_i^3),$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} X_i^1 < b_i^1, i=1,2,\dots,k_1 \\ X_i^2 < (a_i^2 + b_i^2)/2, i=1,2,\dots,k_2 \\ X_i^3 < a_i^3, i=1,2,\dots,k_3 \end{cases} \quad (16)$$

1) 如果  $C=C_0$ , 则 3 个等级器材的订货模型分别为:

$$x_i^1 = \begin{cases} 0 & X_i^1 \geq b_i^1, i=1,2,\dots,k_1 \\ b_i^1 - X_i^1 & X_i^1 < b_i^1, i=1,2,\dots,k_1 \end{cases},$$

$$x_i^2 = \begin{cases} 0 & X_i^2 \geq \frac{a_i^2 + b_i^2}{2}, i=1,2,\dots,k_2 \\ \frac{a_i^2 + b_i^2}{2} - X_i^2 & X_i^2 < \frac{a_i^2 + b_i^2}{2}, i=1,2,\dots,k_2 \end{cases},$$

$$x_i^3 = \begin{cases} 0 & X_i^3 \geq a_i^3, i=1,2,\dots,k_3 \\ a_i^3 - X_i^3 & X_i^3 < a_i^3, i=1,2,\dots,k_3 \end{cases} \quad (17)$$

2) 如果  $C < C_0$ , 则按重要度等级、重要度排序从高到低排序, 按式(17)订货数计算结果, 优先补充排在前面的器材的库存。其中: 第 1、2 等级器材的库存周转量必须保证不能低于库存限额的下限  $a_i^j$ , 亦即最低周转量; 第 3 等级的器材的库存周转

量可以低于库存限额的下限  $a_i^j$ , 与库存限额标准的下限相比不足的差额允许在下一年度补充。其订货优化模型为:

$$\max f = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{k_j} c_i^j x_i^j,$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} f \leq C \\ a_i^1 \leq x_i^1 + X_i^1 \leq b_i^1 \\ a_i^2 \leq x_i^2 + X_i^2 \leq (a_i^2 + b_i^2)/2 \\ x_i^3 + X_i^3 \leq a_i^3 \end{cases} \quad (18)$$

需要说明的是:  $C < C_0$  也表明当前上级下拨的保障经费不能满足实际保障需要, 应至少再申请一部分经费, 即  $f-C$ 。

3) 如果  $C > C_0$ , 说明器材保障经费比较充裕, 可以在式(17)计算订货数的基础上, 将多余的经费进一步优化配置, 即以航材保障良好率最大为目标函数建立订货优化模型, 采用边际分析或者动态规划法求解。

在建立订货优化模型时, 需要考虑周转库存的组成——包括故障需求、到寿需求、携行需求。后 2 种需求均为确定性需求, 在制订库存限额标准时, 其预测值能够基本满足实际需要。而故障需求主要是随机性需求, 是本模型的优化对象。对于其他 2 种需求, 本模型不予考虑。另外, 过去无消耗器材和标准件的库存量一般足够两三年消耗, 所以其库存没有必要进一步优化。

订货优化模型建立方法如下:

设:  $Z$  为计划装备实力;  $L$  为按上述原则筛选出的进一步优化的器材的项数; 在这  $L$  项器材中, 第 1、2、3 等级器材的年故障周转量优化前的初始值, 分别为  $b_i^1$ 、 $(a_i^2 + b_i^2)/2$ 、 $a_i^3$  中排除到寿周转量、任务携行需求之后的值;  $l$  为这  $L$  项器材按照重要度等级、重要度从高到低排列的序号,  $l=1,2,\dots,L$ ;  $s_l$  为第  $l$  项器材的年故障周转量,  $s = \{s_1, s_2, \dots, s_L\}$ ;  $EBO(s_l)$  为第  $l$  项器材年故障周转量为  $s_l$  时的短缺数,  $EBO(s_l) = \sum_{x=s_l+1}^{\infty} (x-s_l)P(X=x|\bar{s}T_1T_2)$ ;  $n_l$  为第  $l$  项器材的单机安装数;  $c_l$  为第  $l$  项器材的单价;  $x_{l0}$  为根据式(17)计算第  $l$  项器材的订货数, 亦即优化前的初始订货数;  $x_l$  为第  $l$  项器材优化后的订货数;  $a$  为要求达到的航材保障良好率水平;  $A(s)$  为各器材故障周转量为  $s$  时达到的航材保障良好率。则订货优化模型为:

$$\left. \begin{aligned} \max A(s) &= \prod_{i=1}^L \{1 - \text{EBO}(s_i)/zn_i\}^{n_i} \times 100\% \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^L c_i(x_i - x_{i0}) &\leq C - f \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

当  $A(s) \geq a$  and  $A(s-1) < a$  时的周转量  $s$ , 即为符合实际要求的最优解,  $s \geq 1$ ; 根据工程经验,  $a$  一般为 95%, 不同机型的航材保障良好率水平可以根据各自机群规模、任务特点等情况进行调整。

## 5 结束语

1) 器材重要度制订时考虑的因素比较全面, 既考虑了影响筹措工作的因素, 又兼顾了航空装备所担负的不同的保障任务, 重要度评估方法成熟。笔者提出的重要度评估模型可推广应用于各型飞机维修器材重要度的制订工作。

2) 器材重要度等级有利于分级分类控制器材的周转库存, 使库存结构更加科学合理, 对进一步提高器材订货准确率、减少资源浪费具有重要作用。笔者提出的重要度等级的制订原则和逻辑决断步骤为器材重要度等级的制订提供了理论依据, 且便于理解和实施。

3) 笔者提出的订货模型考虑了库存限额标准、重要度、重要度等级、保障经费等因素, 能够降低航空装备维修保障计划制订的难度, 有效提高器材订货工作的效率, 为航空装备维修器材订货决策实现自动化、智能化提供参考。

4) 随着航空装备使用年限的增加, 应根据装备实力、任务时间、器材故障样本容量、加改装等因素, 及时修订器材的重要度、重要度等级以及库存

限额标准, 以确保其与部队保障实际相符, 为航空装备维修器材订货决策提供更准确的数据支持。

## 参考文献:

- [1] 杨仕美, 石忠义, 翟旭升, 等. 基于重要度的航材备件库存综合优化模型[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(8): 109-113.
  - [2] 冯蕴雯, 路成, 薛小锋, 等. 基于重要度的民机备件单级初始库存优化配置[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 146-154.
  - [3] 刘振国, 耿立杰, 王勇, 等. 库存器材重要性的模糊评判方法[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(14): 2214-2215.
  - [4] 吴佳康, 高辉, 袁园. 基于粗糙集理论的航材可修件订货预测[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(10): 170-173.
  - [5] 周家莹, 徐常凯. 基于粗糙集全局离散和粒子群算法的启发式航材订货模型[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(4): 33-38.
  - [6] 李崇明. 基于可靠性分析的航材采购模型研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016: 5-30.
  - [7] 张瑞昌, 赵嵩正. 消耗性航材备件订货模型的确定[J]. 军事运筹与系统工程, 2004, 18(4): 40-42.
  - [8] 石丽娜, 冯玉娥. 基于泊松分布的航材周转件库存量数学模型[J]. 上海工程技术大学学报, 2004, 18(2): 141-143.
  - [9] 通用雷达装备维修器材筹措供应标准编制要求: GJB 8257—2014[S].
  - [10] 备件供应规划要求: GJB 4355—2002[S].
  - [11] 电子对抗装备随机备件概算: GJB 3914—1999[S].
  - [12] 郭峰, 赵宏强, 王雷, 等. 航空装备维修器材筹措供应标准体系[J]. 兵工自动化, 2019, 38(6): 1-8.
- \*\*\*\*\*
- (上接第 4 页)
- [5] CHRISTOPHE C, PETER F, HEINRICH F. Robust Sparse Principal Component Analysis[J]. Technometrics, 2013(2): 51-55.
  - [6] 江卫东. 基于 AHP 和 BP 神经网络的企业 R&D 人员胜任力评价[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(6): 56-63.
  - [7] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988: 67-81.
  - [8] SWAIN R R, KHILAR P M. Composite fault diagnosis in wireless sensor networks using neural networks[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 95(3): 2507-2548.
  - [9] 张杰, 唐宏, 苏凯. 效能评估方法研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 5-9.
  - [10] 张德丰. MATLAB 神经网络编程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 102-118.
  - [11] CHEN L H, DENG N Y, ZHANG J Z. A Modified Quasi-Newton Method for Structured Optimization with Partial Information on the Hessian[J]. Computational Optimization and Applications, 2006, 35(9): 5-18.
  - [12] 李廷锋. 求解大规模无约束优化问题的修正 L-BFGS 方法[D]. 开封: 河南大学, 2008: 25-31.