

doi: 10.7690/bgzdh.2022.04.008

# 基于灰色关联度的备件模型确定方法

任 喜<sup>1</sup>, 张晓斐<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 92493 部队, 辽宁 葫芦岛 125000; 2. 中国人民解放军 92635 部队, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 为准确、合理并有效地确定装备备件品种, 提出一种基于灰色关联模型确定备件种类的方法。从影响确定备件品种的经济性、维修性、关键性、故障率以及订购周期等因素着手, 对部件及其元器件进行分析。实例分析结果证明: 该方法可解决备件品种的确定问题, 提高决策的科学性和准确性, 验证了模型的有效性。

**关键词:** 灰色关联模型; 备件; 确定方法; 多目标决策

**中图分类号:** TJ760.7 **文献标志码:** A

## Determination Method of Spare Parts Model Based on Grey Correlation Degree

Ren Xi<sup>1</sup>, Zhang Xiaofei<sup>2</sup>

(1. No. 92493 Unit of PLA, Huludao 125000, China; 2. No. 92635 Unit of PLA, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** In order to accurately, reasonably and effectively determine the type of equipment spare parts, a method based on grey relational model is proposed. Starting from the factors affecting the determination of spare parts, such as economy, maintainability, criticality, failure rate and order cycle, the parts and their components are analyzed. The example analysis results show that the method can solve the problem of determining the variety of spare parts, improve the scientificity and accuracy of decision-making, and verify the effectiveness of the model.

**Keywords:** grey correlation model; spare parts; determination method; multi-objective decision

### 0 引言

备件配置标准制定的前提是确定装备备件品种, 备件品种确定得是否准确、合理直接影响部队的战斗力。若不能有效确定备件品种, 会造成装备部件故障, 无法准时进行换件维修, 影响装备的使用; 若确定的备件品类繁多, 又会造成经费的浪费。如何在两者之间做好权衡, 是一个亟待解决的问题。

现有备件品种评价指标经常使用定性指标, 并通过经验判断来进行相关指标的分析。由于该方法具有主观性, 导致备件品种确定问题存在很大的误差, 既不能有效保障装备的备件满足率, 又占用了大量的人力、物力资源, 难以满足未来保障任务的要求; 因此, 笔者提出一种基于灰色关联模型确定备件种类的方法。

### 1 备件品种的评价指标

现有的备件品种评价指标的弊端主要是主观因素过大, 导致部分备件在仓库中长期闲置; 同时, 常用的备件储备不足甚至没有列入备件配备计划, 造成资源浪费, 极大地降低了装备可用度, 影响装备效能的有效发挥。

为了对装备进行客观评价, 建立如图 1 所示的客观评价指标体系。

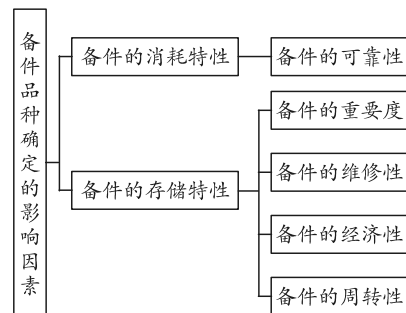


图 1 备件品种确定的影响因素

装备备件品种确定的因素主要有维修性、故障率、重要度、经济性、及订货周期。由此建立如下指标集:

$$U = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5) \quad (1)$$

其中:  $u_1$  为重要度;  $u_2$  为故障率;  $u_3$  为经济性;  $u_4$  为维修性;  $u_5$  为订货周期。

下面分别对各指标进行量化分析:

1) 重要度。

通过故障树分析法, 使用概率分析装备各部件对系统性能的影响程度。

概率重要度  $\Delta g_i(t)$  的定义为:

收稿日期: 2021-12-10; 修回日期: 2022-01-28

作者简介: 任 喜(1984—), 男, 安徽人, 博士, 工程师, 从事装备计量保障研究。E-mail: renxi126@163.com。

$$\Delta g_i(t) = \frac{\partial g |(\bar{F}(t))}{\partial F_i(t)} = \frac{\partial F_s(t)}{\partial F_i(t)} \quad (2)$$

上式为系统不可靠水平变化随着第  $i$  个部件不可靠水平变化的程度。

$$P(t) = g |(\bar{F}(t)) = F_s(t) \quad (3)$$

通过全概率公式可得：

$$P(t) = P(X_i(t)=1) \times P(T|X_i(t)=1) + P(X_i(t)=0) \times P(T|X_i(t)=0) = F_i(t)g(1, \bar{F}(t)) - (1 - F_i(t))g(0, \bar{F}(t)) \quad (4)$$

代入式(2)得：

$$\Delta g_i(t) = g(1, \bar{F}(t)) - (1 - F_i(t))g(0, \bar{F}(t)) = E[\Phi(1, \bar{X}(t)) - \Phi(0, \bar{X}(t))] = P\{\Phi(1, \bar{X}(t)) - \Phi(0, \bar{X}(t)) = 1\} \quad (5)$$

通过以上分析，即可得到部件重要度的量化指标值。

2) 故障率。

部件备件数量主要由故障率大小决定，故障率高的部件通常需要配置备件，备件配置的数量与装备的战备完好性等指标有关。

故障率的计算公式为：

$$\lambda = \frac{MTTR}{MTBF + MTTR} \quad (6)$$

其中：MTBF 为平均故障间隔时间；MTTR 为平均修理时间，这里平均修理时间包括停机等待时间加上维修时间。

实际情况是很多部件没有上述数据，可以通过部件故障统计，计算系统各部件的故障率。

$$\lambda = \frac{n_i}{n} \quad (7)$$

式中： $n$  为装备部件的总数量； $n_i$  为任务期间部件故障的数量。

3) 经济性。

备件配置要考虑费用的节约，在实现同等保障水平情况下，昂贵的备件尽量少配备或者不配备；将备件价格划分为高中低 3 类，即 ABC 分类法，一般用备件的单价描述。

4) 维修性。

维修性是对备件要求的一项重要指标。维修性越好，故障的修复时间越短。维修性主要通过装备的 MTTR 指标来描述，通过对各部件的 MTTR 进行归一化分析，得到各部件的维修性指标参数。

5) 订货周期。

影响订货周期的因素有很多，主要包括厂家库存、生产周期以及备件的消耗情况。根据订货周期的不同，订货周期可以分为快、中、慢 3 类。实际工作中，主要通过天数来衡量。

对装备备件品种确定，主要是通过建立备件权重集。确定权重本身有很多不同方法，概括起来主要分为主观和客观赋权法：主观赋权法是根据决策者的主观信息进行赋权；客观赋权法根据原始数据之间的内在逻辑关系通过统计方法来确定权值。笔者选用主客观赋权法，并在结合层次分析法的基础上，建立指标权重集。

2 基于灰色关联模型的指标权重的确定

系统之间的关联程度通常用关联度表征。作为衡量各参数间关联程度的有效方法，灰色关联度分析 (grey relational analysis, GRA) 根据参数间发展趋势的相似或相异程度。与最优解的相似性定序偏好的方法称为优劣解距离法 (technique for order preference by similarity to solution, TOPSIS)，在多目标决策领域有大量应用<sup>[1-2]</sup>，由 C.L.Hwang 和 K.S.Yoon 首次提出，以与正最优解和负最优解的远近程度作为评价各因素有效程度<sup>[3]</sup>。若参量既接近正最优解，又远离负最优解，那么此时的参量即为最优解。灰色关联定权法能克服主客观赋权上的一些缺点，与 TOPSIS 法结合使用，对提高利用 TOPSIS 法进行决策的科学性和准确性是一种有益的探索。

基于 GRA-TOPSIS 法的计算流程如图 2 所示。

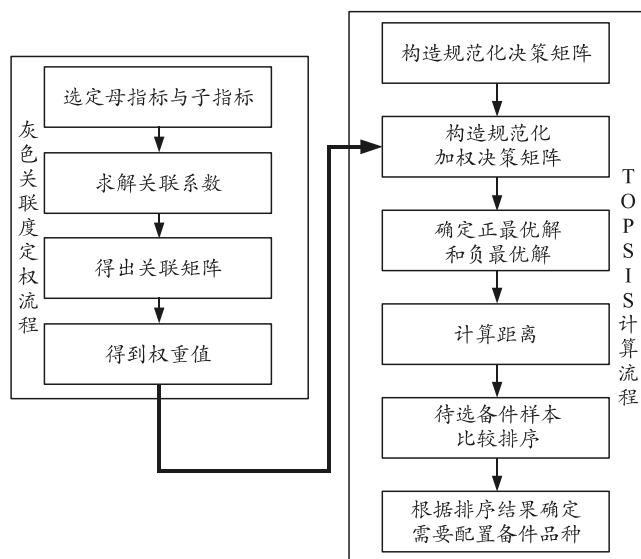


图 2 基于 GRA-TOPSIS 法的计算流程

其主要步骤为<sup>[4]</sup>：

Step1: 规范化决策矩阵  $Y_{ij}$  通过标准化决策矩阵  $X$  得到: 决策矩阵由各影响因素经过指标计算得到的值, 并进行无量纲化。

Step2: 构造规范化加权决策矩阵:

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} = (w_j y_{ij})_{m \times n} \quad (8)$$

式中  $w_j$  为第  $j$  个目标的权。

主观法与客观法是确定指标权重  $w_j$  的主要方法, 确定指标权重  $w_j$  后, 才可以实现决策过程。在分析主观法与客观法的基础上, 提出一种基于灰色关联度的指标权重确定方法。

该方法的首要问题是确定母指标和子指标<sup>[5]</sup>。通常母指标为对评价方案影响最重要的指标, 母指标记为  $X_0 = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})^T$ 。其他因素记为子指标, 子指标记为  $X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T, j = 1, 2, \dots, m$ 。然后分别初值化母指标和子指标, 具体方法为:  $x'_{i0} = x_{i0} / x_{10}, x'_{ij} = x_{ij} / x_{1j}$ ; 则有  $X'_0 = (x'_{i0}, x'_{20}, \dots, x'_{n0})^T, X'_j = (x'_{1j}, x'_{2j}, \dots, x'_{mj})^T$ 。初始化指标矩阵为<sup>[6]</sup>:

$$B = [X'_0, X'_j] \quad (9)$$

$X_0$  与  $X_j$  关联系数的计算公式为:

$$r_{ij} = \frac{\min_{1 \leq j \leq m} \min_{1 \leq i \leq n} |x'_{i0} - x'_{ij}| + \rho \max_{1 \leq j \leq m} \max_{1 \leq i \leq n} |x'_{i0} - x'_{ij}|}{|x'_{i0} - x'_{ij}| + \rho \max_{1 \leq j \leq m} \max_{1 \leq i \leq n} |x'_{i0} - x'_{ij}|} \quad (10)$$

式中  $\rho$  为分辨系数,  $\rho \in (0, \infty)$ 。  $\rho$  越小, 则分辨力就越大,  $\rho$  的取值在  $(0, 1)$  之间, 本文中  $\rho$  的取值为 0.5。则关联矩阵为:

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (11)$$

接着对矩阵  $R$  的列求平均:

$$r_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{ij} \quad (12)$$

对  $r_j$  归一化, 并给出各影响因素的权重公式为:

$$w_j = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^m r_j}, j = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

最终得到各因素权重向量  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 。

Step3: 确定正负最优解<sup>[7]</sup>:

$$Y^* = \left\{ \max_i y_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \right\}; \quad (14)$$

$$Y^- = \left\{ \min_i y_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \right\} \quad (15)$$

Step4: 计算距离。

任意解与正负最优解的距离为<sup>[8-10]</sup>:

$$d^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j^2 (y_{ij} - y_j^*)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

$$d^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j^2 (y_{ij} - y_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

求解各方案与最优解的相对接近度  $C_{ij}^*$ , 某一可行解对于最优解的  $C_{ij}^*$  定义为:

$$C_{ij}^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^*}, 0 \leq C_{ij}^* \leq 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

通过以上分析可知: 若  $X_i$  是最优解, 则相应的  $C_{ij}^* = 1$ ; 若  $X_i$  是负最优解, 则相应的  $C_{ij}^* = 0$ 。按照这一分析对所有方案排队。

Step5: 按  $n$  个待选备件样本进行比较排序。

Step6: 由决策者根据排序结果确定需要配置备件品种。

确定备件品种的目的是对全部待选备件的综合评价指标效果进行依次排序, 为后续的备件选取提供参考, 但无法替代最终决策<sup>[11]</sup>。

### 3 实例分析

某型装备由于列装时间短, 一些备件的配置方案有待进一步完善。以火控系统单板计算机、显示卡、时统板以及转换插件为例, 结合影响备件配置的主要因素, 分析是否需要设置备件的决策问题。现有几种待选备件的重要度、故障率、备件单价、平均故障维修时间以及订货周期如表 1 所示。

表 1 确定备件的影响因素指标

备件类型	重要度	故障率 $\times 10^3/h$	备件价格/元	维修性/h	订货周期/d
单板计算机	0.24	0.06	21 300	1.20	10.4
显示卡	0.34	6.20	11 900	12.70	31.7
时统板	0.48	0.90	1 400	24.90	62.4
转换插件	0.50	4.80	100	7.10	17.8

利用 GRA-TOPSIS 法分析的具体过程为:

1) 首先标准化处理初始矩阵, 处理后矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0.2169 & 0.0053 & 0.5981 & 0.0274 & 0.0843 \\ 0.1106 & 0.5202 & 0.3347 & 0.2798 & 0.2610 \\ 0.2950 & 0.0763 & 0.0396 & 0.5500 & 0.5060 \\ 0.3774 & 0.3981 & 0.0003 & 0.1429 & 0.1486 \end{bmatrix}^{\circ}$$

2) 计算矩阵的正负最优解, 其值为:

$$Y^* = [0.3774 \quad 0.5202 \quad 0.5981 \quad 0.5500 \quad 0.5060];$$

$$Y^- = [0.1106 \quad 0.0053 \quad 0.0003 \quad 0.0274 \quad 0.0843].$$

3) 根据备件的重要度当作母指标, 利用 GRA 得到各指标的权重:

$$w = [0.3862 \quad 0.1353 \quad 0.1523 \quad 0.1474 \quad 0.1788].$$

4) 由 2)和 3)可得各备件方案与正负最优解的距离:

$$d^* = [0.1074 \quad 0.0812 \quad 0.0825 \quad 0.0966];$$

$$d^- = [0.1076 \quad 0.1006 \quad 0.0853 \quad 0.0828].$$

5) 通过以上分析, 得出各备件的相对接近度

$$C = [0.4689 \quad 0.4353 \quad 0.5375 \quad 0.5661].$$

由贴程度可知, 备件品种确定的顺序依次是: 转换插件、时统板、单板计算机、显示卡。转换插件应当首先被选择成为备件存储, 转换插件的重要度最大且单价最低, 尽管订货周期比较短且故障率不是最大的, 但不影响转换插件在上述 4 个备件中最重要的地位。时统板作为其次的备件确定对象, 主要是考虑其具有最大的订货周期, 以及次高的重要度。

#### 4 结束语

通过上述分析可以看出:

1) 灰色关联确定指标权重的方法具有定性定量分析的特点, 结合 TOPSIS 法的相关特性, 可很好地解决备件品种的决定问题。

2) 基于灰色关联定权的 TOPSIS 方法可以有效

解决备件的品种确定问题, 能克服主观定权或客观定权的一些不足, 将其与 TOPSIS 法相结合, 为改进传统的 TOPSIS 法, 对提高利用 TOPSIS 法进行决策的科学性和准确性是一种有益的探索。

3) 最终的评价结果排序与选取的母指标有很大关系, 不同的母指标将会得到不同结果。在下一步研究中, 应努力消除母指标选取所带来的不确定性。

#### 参考文献:

- [1] 陈雷, 王延章. 基于熵权系数与 TOPSIS 集成评价决策方法的研究[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 456-459.
- [2] HWANG C L, YOON K S. Multiple attribute decision making[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981: 8-21.
- [3] 崔杰, 党耀国, 刘思峰. 基于灰色关联度求解指标权重的改进方法[J]. 中国管理科学, 2008, 16(5): 141-145.
- [4] 罗党. 灰色决策问题的特征向量方法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(4): 67-71.
- [5] ROMEIJNDERS W, TEUNTER R, JAARSVELD W V. A two-step method for forecasting spare parts demand using information on component repairs[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 220(1): 386-393.
- [6] 张金隆, 陈涛, 王林, 等. 基于备件需求优先级的随机库存控制模型研究[J]. 中国管理学, 2003(6): 25-28.
- [7] 赵宇, 伏洪勇, 张坚. 航空电子设备备件需求量分析[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(3): 1-3.
- [8] 鲍敬源, 王航宇, 刘忠. 装备维修中备件需求率的预计方法[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(2): 101-103.
- [9] 郭继周, 郭波, 张涛, 等. 地空导弹维修保障能力评估与备件优化模型[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(3): 9-12.
- [10] 李瑾, 宋建社, 王正元, 等. 备件消耗预测仿真方法研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23(12): 306-309.
- [11] LI S G, KUO X. The inventory management system for automobile spare parts in a central warehouse[J]. Expert Systems with Applications, 2007, 34(2): 1144-1153.