

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.01.015

一种基于改进型模糊层次分析法的装备维修策略

张卓, 高鹰, 张杰, 李宝鹏
(空军航空大学 航空电子工程系, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 在确定权重方面存在的不足, 引入三角模糊数 (Triangular Fuzzy Number, TFN) 以确定权重, 建立新的层次分析法模型, 并以实例进行了验证。通过与标准层次分析法进行比较的结果表明, 改进后的层次分析法能处理决策者不确定或模糊的判断, 但子元素较多时计算量大, 还有待进一步优化。

关键词: 三角模糊数; 层次分析法; 维修策略
中图分类号: O159 **文献标识码:** A

Equipment Maintenance Strategy Based on Improved Fuzzy AHP

ZHANG Zhuo, GAO Ying, ZHANG Jie, LI Bao-peng
(Dept. of Aviation Electronic Engineer, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of Analytic Hierarchy Process (AHP) when ascertaining the weighting, use the Triangular Fuzzy Number (TFN) to ascertaining the weighting. Established the new AHP model and validate the model by example. Compared the model with the standard AHP model, The results show that the improved AHP can deal with the uncertainty or fuzzy judgment, but there is more computation when there is a large number of sub element. The optimization is needed.

Keywords: TFN; AHP; Maintenance strategy

0 引言

针对现代复杂的设备和系统, 不同的装备有不同的维修方式, 合理地选择维修方式对于提高装备可靠性以及节约人力、财力具有重要的现实意义。目前, 主要的维修方式有事后维修 (CM)、定期维修 (TBM)、视情维修 (CBM)。层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是在对复杂决策问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分析的基础上, 利用较少的定量信息使决策的思维过程数学化, 从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的决策方法, 是近年来应用最广的一种分析方法。为了解决标准层次分析法在确定权重方面存在的不足, 引入三角模糊数 (Triangular Fuzzy Number, TFN), 建立新的层次分析模型。

1 基于三角模糊数的层次分析法

由 Satty 提出的层次分析法中权重的确定方法是通过同一层次元素两两比较, 两两比较的定性描述通过 Satty 标度予以量化 (1 为同等重要; 3 为稍微重要; 5 为相当重要; 7 为强烈重要; 9 为极端重要)。当在确定同一层次两元素相对重要时, 经常要面对不确定或模糊的情况, 这时, 应用 Satty 标度

构建的判断矩阵不够理想, 得出的结果甚至会出现偏离实际的情况。鉴于此, 将三角模糊数引入其中, 用以确定权重。三角模糊数的定义如下:

$$u_{\tilde{N}}(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m} & m < x \leq u \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, l 、 m 和 u 分别表示模糊数支撑的上界、中值和下界。三角模糊数 \tilde{N} 经常可以表示为 (l, m, u) 。比如, 某一因素对另一因素的重要程度为 3 到 5 倍时, 改进的模糊层次分析法可以表示为 $(3, 4, 5)$, 而传统的层次分析法无法处理这类问题。

对同一层次上的元素进行两两比较, 可以得到模糊判断矩阵 \tilde{A} , 记为:

$$\tilde{A} = \{\tilde{a}_{ij}\} = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & \tilde{a}_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, n 是该层元素的个数, 并且 $\tilde{a}_{ij} = 1/\tilde{a}_{ji}$ 。参照文献[3-7]。得到权重的计算方法和步骤如下:

- 1) 根据评价指标建立相应的模糊判断矩阵:

收稿日期: 2009-07-02; 修回日期: 2009-08-19

作者简介: 张卓 (1985-), 男, 四川人, 空军航空大学在读硕士研究生, 从事航空装备技术保障研究。

$$\tilde{A} = \{\tilde{a}_{ij}\} = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & \tilde{a}_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (l_{11}, m_{11}, u_{11}) & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \cdots & (l_{1n}, m_{1n}, u_{1n}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & (l_{22}, m_{22}, u_{22}) & \cdots & (l_{2n}, m_{2n}, u_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \cdots & (l_{nn}, m_{nn}, u_{nn}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

2) 计算模糊评价的综合评价

$$\tilde{u}_i = \left(\frac{\sum_{j=1}^n l_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n m_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}} \right) \quad (4)$$

3) 计算模糊评价 \$\tilde{u}_i\$ 的期望值

\$\tilde{u}_i\$ 左边的期望值为 \$I_L(\tilde{u}_i) = (l_i + m_i)/2\$; 右边的期望值 \$I_R(\tilde{u}_i) = (u_i + m_i)/2\$; 则 \$\tilde{u}_i\$ 的期望值为 \$I(\tilde{u}_i) = \eta I_L(\tilde{u}_i) + (1-\eta)I_R(\tilde{u}_i)\$, 其中 \$0 \le \eta \le 1\$。

由于模糊数的判定是人为主观的判定, 在一定程度上受到主观因素的影响, 为了减小这种影响, 引入了系数 \$\eta\$。式中, \$\eta\$ 为乐观一悲观系数, 如果 \$\eta > 0.5\$ 表明决策者是悲观的; 如果 \$\eta = 0.5\$, 表明决策者是中性的; 如果 \$\eta < 0.5\$ 表明决策者是乐观的。

这里取 \$\eta = 0.5\$, 则 \$\tilde{u}_i\$ 期望值计算公式为:

$$I(\tilde{u}_i) = (l_i + 2m_i + u_i)/4 \quad (5)$$

期望值模糊评价 \$I(\tilde{u}_i)\$ 越大, 则其对应的模糊评价 \$\tilde{u}_i\$ 越大。

4) 计算权向量

$$w_i = I(\tilde{u}_i) / \sum_{i=1}^n I(\tilde{u}_i) \quad (6)$$

用上述方法和步骤确定权向量, 充分考虑到决策者的心情因素, 大大地减小了主观原因对结果的影响, 在实际的操作中可以适当地调节 \$\eta\$ 的值。

5) 一致性检验

在得到权值后, 还需要检验所得权重值是否合理, 作如下假定: 当 \$i \neq j\$ 时, 有 \$l_{ij} < m_{ij} < u_{ij}\$; 如果 \$i = j\$, 则 \$\tilde{a}_{ij} = \tilde{a}_{ji} = (1, 1, 1)\$。因此, 从模糊矩阵 \$\tilde{A}\$ 中计算得到的精确权重必须满足如下模糊不等式:

$$l_{ij} \lesssim \frac{w_i}{w_j} \lesssim m_{ij} \quad (7)$$

其中, \$w_i > 0, w_j > 0, i \neq j\$, 符号 \$\lesssim\$ 表示“模糊小于或等于”。

为了度量不同精确比率 \$w_i/w_j\$ 满足式 (7) 的程度, 在 \$i \neq j\$ 的情况下定义如下函数:

$$u_{ij}(\frac{w_i}{w_j}) = \begin{cases} \frac{m_{ij} - \frac{w_i}{w_j}}{m_{ij} - l_{ij}}, & 0 < \frac{w_i}{w_j} \leq m_{ij} \\ \frac{\frac{w_i}{w_j} - m_{ij}}{u_{ij} - m_{ij}}, & \frac{w_i}{w_j} > m_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

在确定权重向量 \$(w_1, w_2, \dots, w_n)\$ 以后, 定义指标 \$\gamma\$ 如下:

$$\gamma = \exp\{-\max_{ij} \{u_{ij}(\frac{w_i}{w_j})\}, i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j\} \quad (9)$$

\$\gamma\$ 总是满足 \$0 < \gamma \le 1\$。如果 \$\gamma > e^{-1} = 0.3679\$, 则所有精确比率满足精确不等式 \$l_{ij} \lesssim w_i/w_j \lesssim m_{ij}\$, 即相应的模糊判断矩阵有较好的一致性; \$\gamma = 1\$ 表明模糊判断矩阵完全一致。\$\gamma\$ 越大, 相应的模糊判断矩阵的一致性越好。定义改进的模糊层次分析法的模糊评分标准如表 1。

表 1 模糊层次分析法中的模糊判断评分

| 不确定的判断 | 模糊评分 | 说明 |
|------------------------|-------------------------|----------------------|
| 大约相等 | (1/2, 1, 2) | |
| 重要程度大约为 x 倍 [a] | (x-1, x, x+1) | [a]x=2, 3, ..., 9. |
| 重要程度大约为 1/x | (1/(x+1), 1/x, 1/(x-1)) | [b]y,z=1, 2, ..., 9. |
| 重要程度大约在 y 倍和 z 倍之间 [b] | (y, (y+z)/2, z) | y < z |
| 重要程度大约在 1/y 和 1/z 之间 | (1/z, 2/(y+z), 1/y) | |

2 应用举例

以某型装备为例, 从可靠性、维修性、经济性等方面出发选择维修方式, 其逻辑结构图如图 1。

第 1 层次和第 2 层次以及 3 种维修方式的判断矩阵分别如表 2、表 3、表 4。

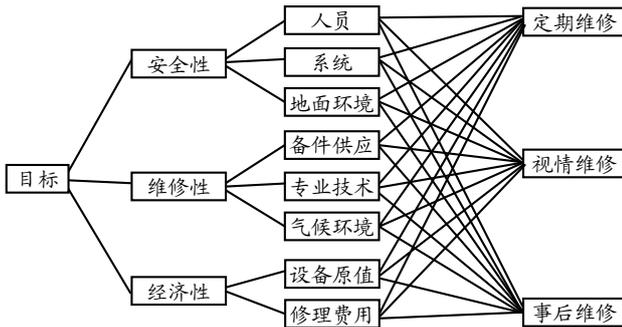


图 1 系统逻辑结构图

表 2 第 1 层次判断矩阵

| 目标 | 安全性 | 维修性 | 经济性 |
|-----|---------------|---------|---------------|
| 安全性 | (1,1,1) | (2,3,4) | (1,2,3) |
| 维修性 | (1/4,1/3,1/2) | (1,1,1) | (1/4,1/3,1/2) |
| 经济性 | (1/3,1/2,1) | (2,3,4) | (1,1,1) |

表 3 第 2 层次判断矩阵

| 安全性 | 人员 | 系统 | 地面环境 |
|------|---------------|---------------|---------|
| 人员 | (1,1,1) | (2,3,4) | (4,5,6) |
| 系统 | (1/4,1/3,1/2) | (1,1,1) | (1,2,3) |
| 地面环境 | (1/6,1/5,1/4) | (1/3,1/2,1) | (1,1,1) |
| 维修性 | 备件供应 | 专业对口 | 气候环境 |
| 备件供应 | (1,1,1) | (2,3,4) | (3,4,5) |
| 专业对口 | (1/4,1/3,1/2) | (1,1,1) | (2,3,4) |
| 气候环境 | (1/5,1/4,1/3) | (1/4,1/3,1/2) | (1,1,1) |
| 经济性 | 设备原值 | 维修费用 | |
| 设备原值 | (1,1,1) | (1/5,1/4,1/3) | |
| 维修费用 | (3,4,5) | (1,1,1) | |

表 4 3 种维修方式的判断矩阵

| 人员 | TBM | CBM | CM |
|------|---------------|---------------|---------------|
| TBM | (1,1,1) | (1/3,1/2,1) | (2,3,4) |
| CBM | (1,2,3) | (1,1,1) | (3,4,5) |
| CM | (1/4,1/3,1/2) | (1/5,1/4,1/3) | (1,1,1) |
| 系统 | TBM | CBM | CM |
| TBM | (1,1,1) | (1/4,1/3,1/2) | (1,2,3) |
| CBM | (2,3,4) | (1,1,1) | (1,2,3) |
| CM | (1/3,1/2,1) | (1/3,1/2,1) | (1,1,1) |
| 地面环境 | TBM | CBM | CM |
| TBM | (1,1,1) | (1/3,1/2,1) | (2,3,4) |
| CBM | (1,2,3) | (1,1,1) | (3,4,5) |
| CM | (1/4,1/3,1/2) | (1/5,1/4,1/3) | (1,1,1) |
| 备件供应 | TBM | CBM | CM |
| TBM | (1,1,1) | (1/3,1/2,1) | (3,4,5) |
| CBM | (1,2,3) | (1,1,1) | (4,5,6) |
| CM | (1/5,1/4,1/3) | (1/6,1/5,1/4) | (1,1,1) |
| 专业技术 | TBM | CBM | CM |
| TBM | (1,1,1) | (2,3,4) | (1/3,1/2,1) |
| CBM | (1/4,1/3,1/2) | (1,1,1) | (1/6,1/5,1/4) |
| CM | (1,2,3) | (4,5,6) | (1,1,1) |
| 气候环境 | TBM | CBM | CM |
| TBM | (1,1,1) | (1/4,1/3,1/2) | (4,5,6) |
| CBM | (2,3,4) | (1,1,1) | (6,7,8) |
| CM | (1/6,1/5,1/4) | (1/8,1/7,1/6) | (1,1,1) |
| 设备原值 | TBM | CBM | CM |
| TBM | (1,1,1) | (2,3,4) | (1/3,1/2,1) |
| CBM | (1/4,1/3,1/2) | (1,1,1) | (1/7,1/6,1/5) |
| CM | (1,2,3) | (5,6,7) | (1,1,1) |
| 修理费用 | TBM | CBM | CM |
| TBM | (1,1,1) | (1/4,1/3,1/2) | (4,5,6) |
| CBM | (2,3,4) | (1,1,1) | (6,7,8) |
| CM | (1/6,1/5,1/4) | (1/8,1/7,1/6) | (1,1,1) |

针对这些模糊判断矩阵，利用前述权重确定方法，计算得到相应的维修方式局部权重，如表 5。

表 5 改进层次分析法计算结果

| | SM | CBM | CM | 全局权重 | γ |
|------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 人员 | 0.346 2 | 0.529 0 | 0.124 8 | 0.249 7 | 0.623 8 |
| 系统 | 0.290 9 | 0.520 5 | 0.188 6 | 0.122 1 | 0.258 3 |
| 地面环境 | 0.346 2 | 0.529 2 | 0.124 6 | 0.068 1 | 0.471 1 |
| 备件供应 | 0.370 7 | 0.530 7 | 0.099 1 | 0.091 9 | 0.553 6 |
| 专业技术 | 0.324 5 | 0.106 4 | 0.569 1 | 0.032 5 | 0.392 7 |
| 气候 | 0.339 6 | 0.587 6 | 0.072 9 | 0.017 9 | 0.230 3 |
| 设备原值 | 0.301 4 | 0.102 5 | 0.596 6 | 0.075 6 | 0.500 9 |
| 修理费用 | 0.340 2 | 0.588 8 | 0.073 1 | 0.296 5 | 0.230 6 |
| 总评分 | 0.335 4 | 0.500 4 | 0.164 0 | | |

为了验证结果是否合理，应用标准的层次分析法来分析该装备的维修方式。利用相关模糊判断矩阵的中值构建精确的判断矩阵，标准传统层次分析法的计算结果如表 6。

表 6 标准层次分析法计算结果

| | SM | CBM | CM | 全局权重 |
|------|---------|---------|---------|---------|
| 人员 | 0.319 6 | 0.558 4 | 0.122 0 | 0.303 3 |
| 系统 | 0.263 3 | 0.547 7 | 0.189 0 | 0.115 7 |
| 地面环境 | 0.319 6 | 0.558 4 | 0.122 0 | 0.066 2 |
| 备件供应 | 0.333 1 | 0.569 5 | 0.097 4 | 0.078 9 |
| 专业技术 | 0.361 1 | 0.101 2 | 0.537 7 | 0.034 5 |
| 气候 | 0.279 0 | 0.649 1 | 0.071 9 | 0.015 0 |
| 设备原值 | 0.351 4 | 0.092 7 | 0.559 5 | 0.109 8 |
| 修理费用 | 0.279 0 | 0.649 1 | 0.071 9 | 0.290 5 |
| 总评分 | 0.307 2 | 0.538 8 | 0.175 6 | |

通过表 5 和表 6 对比可以发现，改进型模糊层次分析法与利用标准层次分析法得到的维修方式排序结果相同，3 种维修方式的最终得分也很接近。不同于标准层次分析法，改进型模糊层次分析法能够处理决策者不确定或模糊的判断。例如，决策者认为安全性的重要程度是经济性的 3 到 5 倍时，在基于三角模糊数的层次分析法可以表示为 (3,4,5)，而标准的层次分析法则无法处理这类问题，这就证明了改进型模糊层次分析法的优越性。

3 结论

实例验证了该方法的可行性和优越性。但当子元素较多时，该方法的计算量较大，还有待优化。

参考文献:

- [1] Satty T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [2] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.

[3] 司书宾, 孙树栋, 韩光臣, 等. 基于三角模糊数的综合保障评价指标权重分析[J]. 西北工业大学学报, 2004, 12(6): 659-692.

[4] 姜艳萍, 樊治平. 一种三角模糊数互补判断矩阵的排序方法[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(7): 34-36.

[5] 肖钰, 李华. 基于三角模糊数的判断矩阵的改进及其应用[J]. 模糊系统与数学, 2003, 17(2): 59-64.

[6] 韩庆兰, 杨涛. AHP 算法和三角模糊数在虚拟企业的盟

员选择中的应用[J]. 运筹与管理, 2003, 12(1): 17-21.

[7] Ling Wang, Jian Chu, Jun Wu. Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process[J]. International Journal of Production Economics, 2007, 107(1): 151-163.

[8] Leung L C, Cao D. On Consistency and Ranking of Alternatives in Fuzzy AHP[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 124(1): 102-113.

(上接第 42 页)

2.5 综合评估

计算 $r_j w$ (w 为 8 个评价指标对于目标的组合权重), 可得各受评者对评估目标(舰艇防空作战能力)的综合分如下:

$$r_1 w = 0.4233; r_2 w = 0.4500; r_3 w = 0.4186$$

$$r_4 w = 0.3981; r_5 w = 0.3896$$

其排列顺序为 $r_2 w > r_1 w > r_3 w > r_4 w > r_5 w$, 即第 2 个方案综合防空作战能力最强。

3 结论

该方案克服了传统方案选择的不足, 解决了方案评选中无法定量分析的问题, 可减少主观因素的影响, 提高评估结论的准确性、科学性、可靠性,

(上接第 49 页)

主要包括对远方空情仿真、近方空情仿真以及作战单元本级制导雷达发现目标的仿真。

(2) 单发毁伤仿真

地空导弹的毁伤通常用杀伤概率或数学期望表示。其毁伤因素包括部队战斗力、指挥控制效率、射击条件、空战目标类型等有关。

单发导弹理论命中概率^[3-4]:

$$P_1^* = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi^*(y, z) f^*(y, z) G_0^*(y, z) dy dz, \text{ 其中 } \varphi^*(y, z)$$

为制导误差概率密度, $f^*(y, z)$ 为引信启动概率密度, $G_0^*(y, z)$ 为目标条件下坐标杀伤规律密度。在仿真中可以采用简化模型: $P_1^* = \zeta_d \zeta_j P_1$ 。其中, ζ_d

为电子干扰影响系数, ζ_j 为目标机动影响系数, P_1 为单发导弹在正常条件下的命中概率。

3) 连续毁伤仿真

当发射 n 枚导弹对单个目标攻击时, 其杀伤概率为: $P^* = 1 - (1 - P_1^*)^n$ 。

$$\text{可射击目标数量为: } N = \text{int} \left[1 + \frac{t_{mff} - \Delta t(n-1)}{t_{zh} - \Delta t_{pc}} \right]$$

为舰艇部队防空作战能力评估提供了有效的方法。

参考文献:

[1] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[2] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.

[3] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.

[4] 王清印, 王峰松, 左其亭, 等. 灰色数学基础[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.

[5] 吕艳辉. 基于 AHP 的灰色评估模型及其应用[J]. 火力与指挥控制, 2005(8): 80-82.

[6] 郭齐胜, 杨秀月, 王杏林, 等. 系统建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

[7] 肖斌, 陈军. 层次分析法在炮兵选择射击目标中的应用[J]. 四川兵工学报, 2008(2): 42-44.

其中, t_{mff} 为目标在发射区飞行时间, Δt 为导弹发射间隔, n 为导弹发射数量, t_{zh} 为射击的转火时间, Δt_{pc} 为目标的批次间隔。

消灭目标期望: $M = \sum_{i=1}^N P_1^i$ 。其中, P_1^i 为对第 i 个目标杀伤概率, N 为可射击目标数。

3 结束语

该研究采用计算机仿真技术进行网上指挥作业和方案推演评估, 可有效提高指挥班子的组织筹划能力、指挥控制能力和临机处置能力。

参考文献:

[1] 郝金生, 余敏健. 军队指挥自动化指挥系统概论-指挥引导分册[M]. 北京: 军事科学出版社, 1995.

[2] 王凤山. 现代防空学[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.

[3] 徐浩军. 作战航空综合体及其效能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

[4] 来斌, 牛存良. 防空作战模拟与效能评估[M]. 北京: 军事科学出版社, 2005.