

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.02.008

基于 IAHP- GRA 的单元体发动机修理级别分析

李良峰, 陈柏松, 杨宜林, 王新虎

(空军航空大学航空机械工程系, 长春 130022)

摘要: 针对现行整机维修的决策维修方案已不能满足单元体发动机使用保障要求的问题, 提出一种基于 IAHP- GRA 的单元体发动机的修理级别分析方法。该方法采用单元体发动机的特点制定了修理级别分析评价指标体系, 利用最优传递矩阵的性质对层次分析法进行改进, 结合灰色关联分析方法对单元体发动机的修理级别方案分析进行了优化决策建模。算例验证结果表明: 该方法是合理、科学的。

关键词: 单元体发动机; 改进层次分析法; 灰色关联分析法; 修理级别分析

中图分类号: TJ67 **文献标志码:** A

Repair Level Analysis of Element Engine Based on Improved AHP and GRA

Li Liangfeng, Chen Baisong, Yang Yilin, Wang Xinhu

(Dept. of Aviation Mechanical Engineering, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: Aim at the problem that the engine maintenance guide which maintenances it as a whole can not meet operation and logistics support requirements of element engine, put forwards a repair level analysis of element engine based on IAHP- GRA. Index system is established with characteristics of element engine, analytic hierarchy process (AHP) is improved with the usage of optimal transfer matrix. And model of repair level analysis is constructed by the application of grey relational analysis method. At last, Example result shows that the method is rationality and scientificity.

Key words: element engine; IAHP; gray relational analysis method; repair level analysis

0 引言

修理级别分析是装备保障分析的重要组成部分, 是指在装备的研制、生产和使用阶段, 对预计有故障的产品, 进行非经济性或经济性的分析以确定可行的修理或报废的维修级别的过程^[1-2]。单元体发动机采用了单元体结构设计的思想, 将发动机按功能和结构不同划分为不同的单元体, 各单元体之间只有简单的连接, 拆卸方便; 互换同型号单元体也不影响发动机性能。当某一单元体发生故障时只需对其进行维修即可, 不用将整机返厂; 更换单元体后不用进行整机平衡实验, 只需在飞机上进行简单的试车即可。现存的发动机保障是将发动机作为一个整体进行保障, 而单元体发动机的保障对象是单元体或更小单元。由于现行的整机维修的决策维修方案已不能满足单元体发动机使用保障要求, 为了能在单元体发动机保障中产生最佳的效费价值, 很有必要对其修理级别分析进行研究。

修理级别分析的方法主要有 2 类: 1) 以大量有用数据作为基础, 若所收集数据满足要求, 则可得适合装备的维修级别。但由于我国保障工程开展比较晚, 现阶段能收集到的有用数据很少, 在实际

应用中受到了限制, 如国军标中的航空装备修理级别分析方法等。2) 在数据不全的情况下展开修理级别分析, 主要包括相似产品法、决策树法、层次分析法等。相似产品法实施的前提是待分析对象与参照对象必须具有相似性, 且被参照对象的分析结果合理, 对没有参照对象或分析结果不合理者不能应用; 决策树法易受到主观因素的影响, 使分析得到多个不确定结果, 增加了工作量; 层次分析法在运用时, 常出现一致性检验不满足要求的情况, 需反复调整判断矩阵才能满足一致性检验要求, 不仅增加了工作量, 而且使工作变得复杂。基于此, 笔者采用基于改进层次分析法与灰色关联分析法相结合的方法对单元体发动机的修理级别分析进行研究。

1 单元体航空发动机评价指标体系建立

1.1 评价指标的确定

在建立评价指标体系时, 大多学者直接采用国军标中给出的评价指标, 很少考虑到时间、效能及费用对分析的影响。笔者在遵循评价指标体系选取可操作性、清晰性、非冗余性和可比性原则的基础上, 根据单元体发动机的特点, 制定了新的指标体

收稿日期: 2011-09-02; 修回日期: 2011-09-26

作者简介: 李良峰(1986—), 男, 四川人, 硕士研究生, 从事航空装备技术保障研究。

系。笔者制定的修理级别评价指标体系有 9 个指标, 包括 6 个常规非经济性指标, 1 个维修时间和 1 个效能指标, 1 个费用指标。其中, 6 个常规非经济指标分别为安全性、保密性、包装储存性、保障设备、人力与人员、修理设施, 这些指标在相关文献中已经提过, 因此只对另外 3 个指标加以说明。

1) 维修时间指标。不同的修理级别或维修方案具有不同的维修保障速度, 而维修时间是影响装备可用度的重要因素, 因此将维修时间列入评价指标。

2) 效能指标。由于装备经过不同维修资源修理后的状态不完全一致, 产生的效能不一样, 因此在进行修理级别分析时, 将效能作为评价指标。

3) 经济性指标。经济性指标也是修理级别分析中的一个重要因素, 其主要包括备件费用、维修人力费用、材料费用、保障设备费用、运输与包装费用、训练费用、设施费用、资料费用。这里将各项费用之和综合为一个指标^[3]。

1.2 评价体系层次结构

我国航空装备现行三级维修体制, 即基层级、中继级、基地级。航空发动机也不例外。笔者构建的单元体发动机评价体系结构包括 3 个层次, 分别是目标层、判断层、方案层。单元体发动机修理级别分析构成目标层, 各评价指标构成判断层, 各决策方案构成方案层。评价结构层次见图 1。

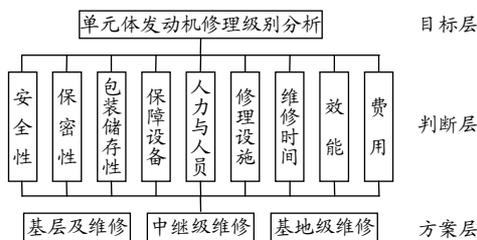


图 1 单元体发动机评价结构层次

2 基于 IAHP-GRA 的修理级别分析模型

2.1 基于最优传递矩阵的改进层次分析法 (IAHP)

采用 AHP 进行评价主要包括: 构造判断矩阵、层次单排序、一致性检验这几个关键步骤。对于一致性检验, 一般仅凭分析人员大致估计来调整判断矩阵, 随意性较大, 一般需通过数次调整才能满足检验要求。为了避免 AHP 一致性检验的繁琐性, 笔者采用最优传递矩阵性质^[4]对 AHP 进行改进。这样能减少一致性检验的工作量, 简化分析程序。建模和分析的具体步骤如下:

1) 建立判断矩阵。构建修理级别分析问题的判断矩阵 A , 用九标度法对各指标进行赋值, 矩阵满足的条件为: 1) $a_{ij} > 0$; 2) $a_{ij} = 1/a_{ji}$; 3) $a_{ii} = 1$ 。

2) 求判断矩阵的传递矩阵 B 。利用传递矩阵与判断矩阵之间的关系求得传递矩阵

$$B = \lg A (b_{ij} = \lg a_{ij}), \forall i, j \quad (1)$$

3) 计算最优传递矩阵。为了使 A 有满意的一致性, 这里通过求 B 的最优传递矩阵 C 来实现, 其中需要满足的条件是使 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (c_{ij} - b_{ij})^2$ 最小, 得

$$c_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (b_{ik} - b_{jk}) \quad (2)$$

4) 计算拟优一致矩阵。 A 属于互反矩阵, $B = \lg A$, C 是 A 的最优传递矩阵, 则 A 的一个拟优一致矩阵可以为:

$$A^* = 10^{c_{ij}} \quad (3)$$

其中 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij}^* - a_{ij})^2$ 最小。

5) 计算各指标的相对权重。根据具体情况选用不同的方法进行计算。

2.2 灰色关联分析 (GRA)

灰色关联分析法 (grey relational analysis, GRA) 是灰色理论的重要分支, 是对系统发展变化事态的定量描述和比较的方法^[5]。通过 IAHP 可以确定各指标的权重, 但修理级别分析中的评价指标对方案决策的影响是离乱的, 灰性很明显。因此对修理级别分析的评价指标进行灰色关联分析能有效实现不同修理级别方案的最优决策。

对于修理级别分析的灰色决策问题, 其基本过程为: 设有 m 个待决策方案, n 个评价指标, 每个方案的所有指标值用向量表示, 记为 $X_j = (X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jm})$, $j=1, 2, \dots, m$ 。设 $X_{ok} (k=1, 2, \dots, m)$ 为第 k 个指标在各方案中的最优值 (若指标取最大值为好时, X_{ok} 取该指标在 k 方案中的最大值; 若指标取最小值为好时, X_{ok} 取该指标在 k 方案中的最小值)。于是 $X_o = (X_{o1}, X_{o2}, \dots, X_{on})$ 即可作为评价系统内的最优方案, 作为评价的参照标准。其中令 $\Delta_i(k) = |X_{ok} - X_{ik}|$ 。

设第 j 个方案对最优参照方案第 k 个指标的关联系数记为 $\zeta_j(K)$, 则:

$$\xi_j(K) = \frac{\min_j \min_k \Delta_j(k) + \zeta \max_j \max_k \Delta_j(k)}{\Delta_j(k) + \zeta \max_j \max_k \Delta_j(k)} \quad (4)$$

其中 ζ 为分辨系数, $\zeta \in [0,1]$ 一般取 ζ 为 0.5; 关联系数 $\xi_j(K)$ 反映的是评价方案与最优方案一个指标上的关联情况, 为了反映所有指标的综合关联程度, 需根据各评价指标的重要程度对各关联系数进行加权求和, 从而求得各方案与最优比较方案的关联度 R_j 为:

$$R_j = \sum_{k=1}^n w_k \xi_j(K) \quad (5)$$

以 R_j 的大小判断各方案的优劣, 根据 R_j 从大到小的顺序即可得到各方案综合评价排序, 从而对发动机单元体修理级别做出了选择。

3 实例分析

单元体发动机由各单元体组成, 笔者选择单元体发动机中低压涡轮单元体作为研究对象。由于所发生故障模式不同, 所采取维修方式不同, 则修理级别不同, 因此只选涡轮单元体故障模式 a(叶片积碳, 涡轮效率下降) 来验证, 运用上文建立的模型进行检验。

1) 构建修理级别分析的层次结构模型

上文已经给出了单元体发动机修理级别分析的评价指标, 在此基础上建立低压涡轮单元体的修理级别分析层次结构, 自上而下分别为目标层、判断层、方案层, 如图 1 所示。

2) 构造各评价指标的判断矩阵, 计算权重

运用上文所提到的步骤和模型, 结合相关数据及专家意见, 利用最优传递矩阵的性质对各指标在目标层中的权重进行计算, 得出各指标的相对权重向量为:

$$W = [0.069 \ 0.090 \ 0.209 \ 0.241 \ 0.159 \ 0.088 \ 0.048 \ 0.055 \ 0.042]^T$$

3) 计算准则层中各指标在决策层中的权重

为了使不同指标不同量纲之间能比较, 首先采用不同规范化方法对其进行处理, 具体操作这里不

再赘述。然后按照上文所给的 IAHP 模型和步骤分别对各指标在方案层中的权重进行计算。最后求得各指标权重向量为:

$$X_{1-9} = \begin{bmatrix} 0.163 & 0.122 & 1/3 & 0.140 & 0.122 & 0.111 & 0.630 & 0.196 & 0.648 \\ 0.540 & 0.320 & 1/3 & 0.528 & 0.558 & 0.582 & 0.218 & 0.311 & 0.230 \\ 0.297 & 0.558 & 1/3 & 0.332 & 0.320 & 0.309 & 0.152 & 0.493 & 0.122 \end{bmatrix}$$

4) 修理级别分析的灰色关联分析

在得到各矩阵的指标权重后, 按照上文提到的 GRA 步骤进行计算。在矩阵中选出最优参照数列记为 X_0 , 并以此作为评价方案的标准, 则 $X_0 = \{0.540, 0.558, 1/3, 0.528, 0.558, 0.582, 0.630, 0.493, 0.648\}$, 根据式 (4) 求得关联系数矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} 0.385 & 0.351 & 1 & 0.378 & 0.351 & 0.333 & 1 & 0.442 & 1 \\ 1 & 0.497 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.364 & 0.564 & 0.360 \\ 0.492 & 1 & 1 & 0.546 & 0.497 & 0.463 & 0.330 & 1 & 0.309 \end{bmatrix}$$

再根据式 (5) 计算出各方案的加权关联度, 得 (0.557 0 0.874 0 0.667 7), 则涡轮单元体关于故障模式 a 的维修方案的综合排序为(中继级、基层级、基地级), 因此涡轮单元体在发生故障模式 a 时应该在中继级维修, 经分析该方案较符合工程实际。

4 结语

根据单元体发动机的特点, 笔者建立了修理级别分析的评估指标, 运用最优传递矩阵对层次分析法进行了改进, 并结合灰色关联分析的优点对单元体发动机的修理级别方案进行了优化决策。实例结果证明: 在缺乏数据的情况下, 该方法能有效地进行单元体发动机的修理级别分析。

参考文献:

[1] MIL-STD-1390D Level of Repair Analysis[S]. 1993.
 [2] GJB 2961-97 修理级别分析[S]. 1997.
 [3] 王, 杨, . 灰色关联分析 障 断中的 用[J]. 学, 2010, 31(11): 50.
 [4] 进, 陈, 进. 系 理[M]. : 科 学出, 1999: 80-84.
 [5] , . 基于 AHP 灰色关联分析法的 发 动机维修 评价 [J]. 价, 2008(12): 16-19.