

基于改进 FAHP 的民机修理级别经济性分析研究

李鑫, 蔡景, 左洪福, 肖罗椿, 冒慧杰

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

摘要:针对民机修理级别分析(LORA)经济性分析模型较少,且存在数据缺失,可信度较差等问题,提出了基于模糊层次分析法(FAHP)的修理级别经济性分析模型;在此基础上,利用模糊层次分析法确定各评价指标的权系数,并对灰色关联系数加权得到灰色关联度,实现了基于模糊层次分析法和灰色关联分析法的民机修理级别经济性分析综合评估;最后通过实例分析,验证了所提模型的合理性和有效性。

关键词:修理级别分析;经济性分析;模糊层次分析;灰色关联分析

本文引用格式:李鑫,蔡景,左洪福,等.基于改进 FAHP 的民机修理级别经济性分析研究[J].四川兵工学报,2014(6):64-67.

中图分类号:TH164

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2014)06-0064-04

Level of Repair Analysis Economic Evaluation for Aircraft Maintenance Based on Improved FAHP

LI Xin, CAI Jing, ZUO Hong-fu, XIAO Luo-chun, MAO Hui-jie

(Civil Aviation College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problems that there is little economic evaluation model for the civil aircraft's level of repair analysis, the existing data is missing seriously and the data is hard to convince, a level of repair analysis economic evaluation model based on fuzzy analytic hierarchy process has been put forward. On this basis, the fuzzy analytic hierarchy process was used to determine the weight coefficient of each evaluation index, and the grey relational degree had been got with weighted grey relational coefficient. Finally, the aircraft repair level comprehensive evaluation has been realized based on fuzzy analytic hierarchy process and grey relational analysis methods. At last, the instance analysis has been used to verify the rationality and validity of the proposed model.

Key words: level of repair analysis; economic evaluation; fuzzy analytic hierarchy process; gray relational analysis

Citation format: LI Xin, CAI Jing, ZUO Hong-fu, et al. Level of Repair Analysis Economic Evaluation for Aircraft Maintenance Based on Improved FAHP[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(6): 64-67.

无论从 ASD(Aerospace and Defence Industries Association of Europe)的序列标准,还是从综合后勤保障的现实来看,修理级别分析都是非常关键的一环。修理级别分析(level of repair analysis, LORA)是在装备设计、研制阶段根据装备修理的约定层次与修理级别的关系,分析确定装备中的产品(如设备、组件、零部件等)故障或损坏时是作出报废或修理

决策。如需修理,确定应在哪一个修理级别机构(保障站点)中完成修理工作为最佳的过程^[1]。LORA将设计、维修与备件有机的结合起来,为整体解决后勤保障问题提供了有力支撑。

修理级别分析是工程实践和理论研究的一个难点^[2],目前国内外学者对其进行了大量的研究。L. Barros^[3]于1998

收稿日期:2013-12-10

基金项目:国家自然科学基金(61079013);江苏省自然科学基金(BK2011737)。

作者简介:李鑫(1990—),男,博士研究生,主要从事可靠性、维修性工程研究。

年提出了一个较为完整的规划体系来解决 LORA 问题; G. Gutina 等^[4]于 2004 年通过在双向图上把 LORA 问题还原成二部图的最大权独立集问题,并证明了 LOAR 问题是多项式时间可解的;H. Saranga 和 U. D. Kumar^[5]于 2006 年建立了一个用来进行 LORA 的数学模型,并对所提模型用遗传算法进行了求解;Basten 等^[6-7]于 2009 年提出了基于无限资源的修理级别分析模型,2010 年又提出了针对修理级别的最小成本分析模型,其中考虑了同一故障现象对应多个不同故障部件的问题。在国内,吴昊等^[2]于 2009 年,提出了一个适合民用飞机维修规划三层三级的 LORA 经济性分析的数学模型,并以最小维修成本为目标建立了修理级别优化模型;汪文峰^[8]于 2010 年针对通过更换备件完成修复性维修的新型武器装备,建立基于使用可用度仿真分析的修理级别分析模型;何春雨等^[9]于 2011 年针对舰船装备修理级别分析中存在有限数据的问题,提出了一种基于 LINGO 软件而适用于舰船装备三层三级的修理级别分析优化模型。

目前,在 LORA 的研究方面虽然取得了很多成果,但是经济性分析方面的研究相对较少,且不完全符合现代民用飞机维修规划的实际特点,尤其是在经济性分析的费用数据收集方面,存在数据量纲不一致、数据缺失、可信度较差等问题。因此,本论文在已有研究成果的基础上,提出适用于民机经济性分析的改进模糊层次分析法(FAHP)方法,并通过实验验证了该方法的正确性。

1 民机修理级别及经济性分析因素

民用飞机修理级别一般参考 MIL-STD-1390D^[10]分为 3 级:基层级维修,中继级维修,基地级维修。经济性分析通常考虑以下数据:机队规模、使用率、可靠性数据、后勤资源需求、成本数据,具体包括备件费用、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、资料费用共 8 种费用^[1]。

2 改进的模糊层次分析法

2.1 模糊层次分析法

模糊层次分析法(FAHP)是在传统的层次分析方法(AHP)基础上,考虑人们对复杂事物判断的模糊性,引入模糊一致矩阵的方法^[11]。FAHP 将模糊数学的理论运用到 AHP 中,对于 AHP 其判断矩阵具有模糊性的优点,使人们对判断目标相对重要度的复杂程度大大简化,并借助模糊判断矩阵实现决策由定性分析向定量分析方便、快捷的转化,直接由模糊判断矩阵构造模糊一致性判断矩阵,从而无需检验判断矩阵的一致性。模糊层次分析法的基本过程如下:

(1) 建立优先关系判断矩阵。根据每一层的因素针对上一层因素的相对重要性建立判断矩阵,这种矩阵是模糊互补矩阵。在 FAHP 中,设矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,若满足 $0 \leq a_{ij} \leq 1 (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$; $a_{ij} + a_{ji} = 1 (i = 1, 2, \dots, n; j = 1,$

$2, \dots, n)$,则称矩阵 A 是模糊互补矩阵。构造判断矩阵时,为了准确的描述任意两个元素的相对重要程度,采用如表 1 所示的 0.1~0.9 互补型数量标度,即得到模糊互补矩阵。模糊互补矩阵形式如式(1)所示。

$$A = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1n} \\ 1 - r_{12} & r_{22} & r_{23} & \cdots & r_{2n} \\ 1 - r_{13} & 1 - r_{23} & r_{33} & \cdots & r_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 - r_{1n} & 1 - r_{2n} & 1 - r_{3n} & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

对角线上的元素 $r_{ii} (i = 1, 2, \dots, n)$ 相当于同一元素自身与自身重要度相比,应为同等重要,故 $r_{ii} = 0.5 (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

表 1 0.1~0.9 数量标度及其含义

标度	定义	说明
0.5	同样重要	两元素相比,同样重要
0.6	稍微重要	两元素相比,一个元素比另一个元素稍微重要
0.7	明显重要	两元素相比,一个元素比另一个元素明显重要
0.8	十分重要	两元素相比,一个元素比另一个元素十分重要
0.9	绝对重要	两元素相比,一个元素比另一个元素绝对重要
0.1, 0.2 0.3, 0.4	反比较	若元素 u_i 与元素 u_j 相比得到判断 r_{ij} , 则元素与元素相比较得到判断为 $r_{ji} = 1 - r_{ij}$

(2) 将优先关系判断矩阵改造成模糊一致矩阵。对模糊互补矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 按行求和,记为 $a_i = \sum_k r_{ik} (i = 1, 2, \dots, n)$,按下式进行变换

$$a_{ij} = (a_i - a_j) / 2n + 0.5 \quad (2)$$

变换后的矩阵即为模糊一致矩阵。

(3) 单层次因素模糊权重计算。采用排序法得出各因素在指标下的模糊数权重向量为

$$\omega_i = 1/n - 1/2\alpha + \sum_j r_{ij} / n\alpha, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式(3)中,参数 α 满足 $\alpha \geq (n-1)/2$,通常取 $\alpha = (n-1)/2$ 。

2.2 灰色关联分析

灰色关联分析的基本思想是根据序列曲线的几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密,曲线越接近,相应序列之间的关联度就越大,反之就越小^[12]。灰色关联度分析是从系统离乱、随机的行为特征量中确定因子间关联程度,根据诸因子行为的观测序列,分析和确定因子间的影响程度或因子对主目标的贡献测度,实现对系统动态发展势态的量化比较分析^[13]。灰色关联分析基本过程为:设有 p 个待评价方案,评价指标为 q 个,每个方案的所有指标值用向量表示,记作 $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iq}) (i = 1, 2, \dots, p)$ 。设 $X_{0j} (j = 1, 2, \dots, q)$ 为第 j 个指标在个方案中的最优值。于是 $X_0 = (X_{01},$

X_{02}, \dots, X_{0q} 即可作为评价系统内的最优方案,作为评价的参照标准。设 $\Delta = x_{0j} - x_{ij}$, $\Delta(\min) = \min_i \min_j |x_{0j} - x_{ij}|$, $\Delta(\max) = \max_i \max_j |x_{0j} - x_{ij}|$, 那么第 i 个方案对最有参照方案第 j 个指标的关联系数为 ξ_{ij}

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta(\min) + \rho\Delta(\max)}{\Delta + \rho\Delta(\max)} \quad (4)$$

式(4)中, $i=1, 2, \dots, p$; $j=1, 2, \dots, q$; ρ 为分辨率系数。

灰色关联度 λ_i :

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^q \omega_j \xi_{ij}, i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, q \quad (5)$$

计算出 λ_i 的值越大,说明关联程度越高,可依据 λ_i 的值来进行决策评价。

2.3 改进的模糊层次分析法

LORA 常用的方法是决策树法、报废与修理对比法、相似产品法、德尔菲法、层次分析法等^[14], 这些方法虽然能在一定程度上给 LORA 的确定提供决策支持,但由于经济性分析的定量数据存在数据缺失、可信度较差等问题,评价在很大程度上取决于人的主观臆断而使结果不准确。模糊层次分析法能够利用专家知识或经验构造模糊判断矩阵,但其经济性分析的评价属性对方案选择的影响是离乱的,具有明显的灰性,因此可用灰色关联分析实现不同修理级别的比较评价。本文结合两者的优点,在基于模糊层次分析法的基础上引入灰色关联分析,建立 LORA 经济性分析模型,基本过程:建立民机修理级别分析经济性分析的层次结构;构造模糊判断矩阵;将模糊判断矩阵转化为模糊一致矩阵并计算权重;计算方案层在各指标下的最优参照数列;计算灰色关联度,确定维修决策。

3 实例分析

本文以参考文献[15]中的某型飞机控制组件数据为例进行修理级别经济性分析。前期经非经济性限制因素可供选择的修理级别为中继级修理和基地级修理,主要考虑的经济性因素及费用如表2所示。

表2 某型飞机控制组件中继级修理和基地级修理模型信息

中继级修理		基地级修理	
费用参数	数值/万元	费用参数	数值/万元
备件费用	216	备件费用	150
维修人力费用	22.5	维修人力费用	54
保障设备费用	200	保障设备费用	5
运输与包装费用	20	运输与包装费用	270
技术与资料费用	70	技术与资料费用	38

用 $C1, C2, C3, C4, C5$ 分别表示备件费用、维修人力费用、保障设备费用、运输与包装费用、技术与资料费用,则由

上表可计算中继级修理总费用 $CI = 528.5$ (万元),基地级修理总费用 $CD = 517$ (万元),那么该控制组件应选择在基地级修理。

若未知具体的修理费用,用本文所建立的经济性模型,步骤如下:

1) 层次结构模型。建立某型飞机控制组件修理级别经济性分析层次结构如图1所示。

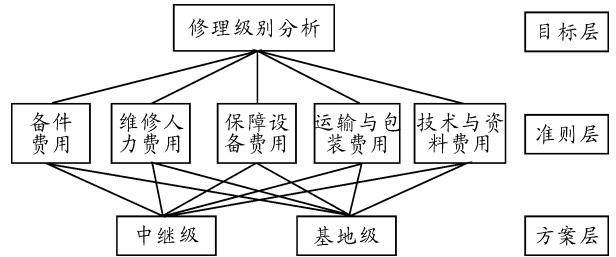


图1 修理级别分析经济性分析层次结构

2) 构造模糊判断矩阵。结合模糊层次分析法,构造各因素的判断矩阵如表3所示。

表3 模糊判断矩阵

因素	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0.5	0.9	0.5	0.6	0.6
C2	0.1	0.5	0.2	0.7	0.5
C3	0.5	0.8	0.5	0.6	0.8
C4	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6
C5	0.4	0.5	0.2	0.4	0.5

3) 计算模糊一致矩阵及权重。由式(2)、式(3)计算模糊一致矩阵及权重如表4所示。

表4 模糊一致矩阵及权重

因素	C1	C2	C3	C4	C5	权重
C1	0.500	0.540	0.500	0.510	0.510	0.206
C2	0.460	0.500	0.460	0.470	0.470	0.186
C3	0.500	0.540	0.500	0.510	0.510	0.206
C4	0.490	0.530	0.490	0.500	0.500	0.210
C5	0.490	0.530	0.490	0.500	0.500	0.210

4) 确定方案层在各评价指标中的评价价值。确定方案层在各指标下的评价价值。具体的方案判断矩阵和求得各因素的评价价值见表5~表9所示。

表5 方案层在C1指标的评价价值

方案	中继级	基地级	评价价值
中继级	0.5	0.4	0.450
基地级	0.6	0.5	0.550

表6 方案层在 C2 指标的评价值

方案	中继级	基地级	评价值
中继级	0.5	0.3	0.396
基地级	0.7	0.5	0.604

表7 方案层在 C3 指标的评价值

方案	中继级	基地级	评价值
中继级	0.5	0.7	0.604
基地级	0.3	0.5	0.396

表8 方案层在 C4 指标的评价值

方案	中继级	基地级	评价值
中继级	0.5	0.1	0.262
基地级	0.9	0.5	0.738

表9 方案层在 C5 指标的评价值

方案	中继级	基地级	评价值
中继级	0.5	0.2	0.335
基地级	0.8	0.5	0.665

5) 修理级别分析的灰色关联分析。根据表5~表9中的方案层在各指标下评价值的最大值为评价方案的标准,作为最优参照数列,则 $X_0 = (0.550, 0.604, 0.604, 0.738, 0.665, 0.550, 0.665)$, 由式(4)计算关联系数 ξ_{ij} 的矩阵为

$$\xi_{ij} = \begin{pmatrix} 0.704 & 1 & 0.533 & 6 & 1.000 & 0 & 0.333 & 3 & 0.419 & 0 \\ 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0.533 & 6 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 \end{pmatrix}$$

式(4)中 $\rho \in (0, 1)$, 一般取 $\rho = 0.5$ 。

将 ξ_{ij} 以及表4中各因素的权重代入式(5), 可求出各方案的灰色关联度为: $\lambda_{\text{中继级}} = 0.6015$, $\lambda_{\text{基地级}} = 0.9039$, 显然, $\lambda_{\text{基地级}} > \lambda_{\text{中继级}}$, 修理级别的综合排序为基地级、中继级。由上述分析可知对于该飞机控制组件, 应采用在基地修理的维修方案, 与利用已知费用计算得到的决策结果一致, 说明了利用模糊层次分析法和灰色关联分析是合理的。

4 结论

本文在现有的 LORA 研究的基础上, 结合民用飞机维修的特点, 提出了一种适用于民用飞机维修规划的修理级别经济性分析模型, 在民机研制过程中数据缺失、可信度较差的情况下, 将定性的问题定量化, 从而减少修理级别分析中对数据的需求, 提高了民机 LORA 的实际可操作性, 对于完善经济性分析模型具有重要意义。

参考文献:

- [1] 康锐. 可靠性维修性保障性工程基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [2] 吴昊, 左洪福, 孙伟. 一种新的民用飞机修理级别优化模型[J]. 航空学报, 2009, 30(2): 46-49.
- [3] Barros L. The optimisation of repair decisions using life cycle cost parameters[J]. Institute for Mathematics and Its Applications Journal, 1998, 9(4): 403-413.
- [4] Gutina G, Rafieya A, Yeo A. A graph-theoretical approach to level of repair analysis[EB/OL]. [2007-11-28]. http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2004/08/945.pdf.
- [5] Saranga H, Kumar U D. Optimization of aircraft maintenance/support infrastructure using genetic algorithms—level of repair analysis[J]. Ann Oper Res, 2006, 143: 91-106.
- [6] Basten R J I, Schutten J M J, van der Heijden M C. An Efficient Model Formulation for Level of Repair Analysis[J]. Ann Oper Res, 2009(172): 119-142.
- [7] Basten R, M. C. van der Heijden, J. M. J. Schutten. A minimum cost flow model for level of repair analysis[J]. International Journal of Production Economics, 2010(3): 25.
- [8] 汪文峰. 基于可用度仿真分析的装备修理级别确定方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(3): 13-16.
- [9] 何春雨, 全家善, 孙丰瑞. 基于 LINGO 软件的舰船装备修理级别优化分析[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(1), 78-81.
- [10] MIL—STD—1390D, Level of Repair Analysis[S].
- [11] 周艳美, 李伟华. 改进模糊层次分析法及其对任务方案的评价[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(5): 212-214.
- [12] 尹富. 基于灰色关联分析的航空装备技术保障能力评价模型[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(8): 104-109.
- [13] 吴昊. 民用飞机规划维修技术理论及应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [14] 王远达, 宋笔锋, 姬东朝. 修理级别分析方法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(4): 1-3.
- [15] 魏效燕, 刘晓东. 基于 AHP 方法的军用飞机修理级别分析[J]. 航空维修与工程, 2006(2): 22-24.
- [16] 良峰, 陈柏松, 杨宜林, 等. 基于 IAHP-GRA 的单元体发动机修理级别分析[J]. 兵工自动化, 2012(2): 28-30.
- [17] 薛陶, 冯蕴雯, 代晓明. 基于改进 AHP 方法的飞机修理级别经济性分析[J]. 火力与指挥控制, 2013(3): 58-61.

(责任编辑 周江川)