

一种新的民用飞机维修性分配方法

吴昊*

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘要:

在民用飞机维修性设计中,维修性指标分配是一个重要环节。合理的分配维修性指标,可以使民机各系统在设计过程中省钱省力。在民机初步设计阶段,针对维修分配输入不足,首先利用层次分析法对维修性分配因素进行筛选,再运用模糊数学理论中的综合评判方法,综合考虑多方面的模糊因素,提出了基于设计特性模糊综合的维修性分配模型。最后,结合工程实例利用该方法对维修性指标进行了分配应用,结果表明该方法可用于指导民用飞机各系统的维修性设计工作,达到了维修性分配目的。

关键词: 民用飞机;层次分析法;维修性分配;模糊综合评价

中图分类号: V267

文献标识码: A



0 引言

在飞机投入试飞以及运营后,会产生一堆的日常勤务和维修工作。维修性是衡量飞机市场竞争力水平的重要指标之一。维修性好的飞机,维修过程“省时、省力、省钱”,并能够让飞机快速投入运营,从而提高民机的签派率。因此,在民用飞机设计之初要求飞机达到具有市场竞争力的整机级维修性指标,制定了整机级的维修性指标后,就急需解决如何合理地把整机级指标分配至各个系统的问题。而维修性分配工作在民用飞机设计早期主要是分析和论证性工作,所需要的费用和人力不大,但却在很大程度上决定着飞机的设计。合理的分配维修性指标,可以使民机各系统在设计过程中“省钱、省力”地达到维修性指标。由于工程中常用的等值分配法、按故障率分配法、加权分配法、相似分配法等均有一定的局限性^[1-2],赵建民等人^[3]从系统的经济性分析入手,提出了一种以系统相关费用为最小的优化分配方法;周栋等人^[4]根据维修活动及影响因素、维修时间分类分析,给出基于时间特性维修性分配模型,并分别建立装备系统高层次产品单元分配模型

和低层次产品单元分配模型;李贤、夏坚^[5-6]基于时间要素,建立的不同层级组建的分析模型,为民机维修性分配提供了新的思路。本文提出了一种基于层次分析法筛选基于设计特性的维修性分配因素,并用模糊综合的方法进行维修性指标分配的思路。

1 基于层次分析法的维修性分配因素筛选

在研制阶段初期,只能在较高层次进行初步的维修性指标分配,在详细设计阶段,系统的设计特点逐步明确后进行深入和详细的分配工作,维修性指标需要随研制进程不断进行修正和调整。影响维修性指标平均修复时间的因素可以归为三类:设备本身属性,设备布置属性,以及维修保障属性。针对这三类属性按照属性关系,根据可操作性、可对比性以及清晰性原则。本文结合民用飞机维修性设计的考虑因素,确定了可拆装性、排故方法、可调整性、可达性、故障率、派遣率、系统复杂度以及维修资源需求等 8 个因素,组成多级递阶层次结构,如图 1 所示。并用层次分析法来筛选影响维修性分配的主要因素。

* 通信作者。E-mail: wuhao1@comac.cc

引用格式: 吴昊. 一种新的民用飞机维修性分配方法[J]. 民用飞机设计与研究, 2019(4):92-96. WU H. A new allocation method on civil aircraft maintainability[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2019(4):92-96 (in Chinese).

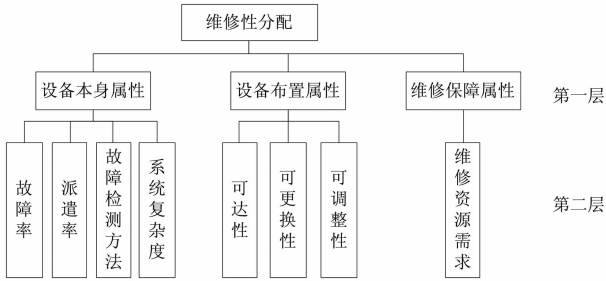


图1 维修性分配因素层次结构

在层次分析法^[7-9]中,如果 $n \times n$ 矩阵 M 满足条件:(1) $m_{ij} > 0$, (2) $m_{ij} = 1/n_{ij}$, (3) $m_{ii} = 1$ 时,矩阵 M 被称为判断矩阵。判断矩阵 M 是正矩阵,用它来描述 n 个因子 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 进行对比判断因子对分析对象的影响程度的关系。判断矩阵的分级与对应级别含义见表1。线性代数中,对于 n 阶正矩阵 M ,它的特征值可认为同一层次中每个因素对分析对象的影响中所占的比重。

表1 判断矩阵分级及其含义

分级	含义
1	表示两个因素重要性相同
3	表示一个因素重要性略高于另一个因素
5	表示一个因素重要性较高于另一个因素
7	表示一个因素重要性很高于另一个因素
9	表示一个因素重要性极高于另一个因素
2, 4, 6, 8	为上述两相邻判断的中间值
倒数	当因素 i 与 j 比较取 a_{ij} 时,则 j 与 i 比较取 $1/a_{ij}$

对于 n 阶方阵 M , λ_{max} 为方阵 A 的最大特征值,则:(1) λ_{max} 必为正特征根,而且它对应的特征向量为正向量。(2) M 的任何其他特征根 λ 必有 $|\lambda| < \lambda_{max}$ 。(3) λ_{max} 为 M 的单特征根。对于 n 阶正矩阵 M 可以得出 M 的最大特征值 $\lambda_{max} \geq n$, 当且仅当方阵 M 一致时 $\lambda_{max} = n$ 。而当方阵 M 不一致时, $\lambda_{max} > n$, 在层次分析法中,必须在一定的允许范围控制方阵 M 的不一致性, Saaty 定义了 n 阶方阵是否一致性的指标,即 $C. I = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$, 用 $C. R = C. I / R. I$ 的比值来判断方阵 M 的不一致性是否在可接受范围内, $R. I$ 是平均随机一致性指标,可通过查表得出对应值。一般情况下,当 $C. R < 0.1$ 时,矩阵的不一致性可以接受。具体的飞机级平均修复时间分配因素的判断矩阵和计算得出的各因素比

重见表2。

表2 各因素的比较及比重计算结果

因素	可拆 装性	排故 方法	可调 整性	可达 性	故障 率	派遣 率	系统 复杂 度	维修 资源 需求	比重
可拆 装性	1	4	5	6	2	8	7	7	0.38
排故 方法	1/4	1	2	1	1/2	5	6	5	0.14
可调 整性	1/5	1/2	1	1	1/3	2	5	4	0.09
可达 性	1/6	1	1	1	1/2	3	5	3	0.10
故障 率	1/2	2	3	2	1	4	4	4	0.19
派遣 率	1/8	1/5	1/2	1/3	1/4	1	2	2	0.04
系统 复杂 度	1/7	1/6	1/5	1/5	1/4	1/2	1	1	0.03
维修 资源 需求	1/7	1/5	1/4	1/3	1/4	1/2	1	1	0.03
$\lambda_{max} = 8.3788, C. I = 0.0541, C. R = 0.0384 < 0.1$									

根据表2 计算结果,本文筛选出比重靠前的排故方法、可达性、可拆装性、可调整性、故障率等5个因素,并组成民用飞机平均修复时间分配的因素集合,记为:

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

其中故障率是采用定性描述,可用相似机型或维修人员的直接感受来进行评级。

2 基于设计特性模糊综合的维修性分配

2.1 维修性分配因素权重

因素集合 U 中,每一个影响平均修复时间分配因素的重要度不一样。因此需要对每一个不同的因素确定其权重,以体现它在维修性指标分配中的贡献度。民用飞机维修性分配的因素权重数集为 A , 记为: $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$ 。

2.2 维修性分配因素等级

维修性指标分配影响因素中,根据各因素由好至差,由高至低等状态,可用“好、较好、一般、差”,“高、较高、一般、低”等4个级别表示,见表3。

表 3 因素评判等级表

排故方法	可达性	可拆装性	可调整性	故障率
好	好	好	好	高
较好	较好	较好	较好	较高
一般	一般	一般	一般	一般
差	差	差	差	低

每个分值都对应一个相应的因素状态等级,如故障率“高”记为 0.1;故障率“较高”,记为 0.3;故障率“一般”,记为 0.5;故障率“低”,记为 1。这些分值即为各因素评价等级的标准值。各因素所得分值越高,则该因素下应分配更多的维修时间。因素状态对应的分值集合,记为: $C = (c_1, c_2, c_3, c_4) = (0.1, 0.3, 0.5, 1)$ 。

2.3 各系统对各因素的评价矩阵

本文采用专家打分法确定每一分配因素对飞机各系统的评价值,并对专家打的分采用归一化的数据处理方式,记为: $r_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4})$,其中, r_{ij} 表示针对所评价的系统,第 i 个因素的评价对第 j 个等级的分值。

对所有因素的打分及归一化处理后,则得到整机级指标分配总的评判矩阵 R :

$$R = (r_1, r_2, r_3, r_4)^T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \\ r_{51} & r_{42} & r_{53} & r_{54} \end{bmatrix}$$

建立评价模型最重要的就是确定隶属函数。人的主观因素对隶属函数有一定的影响。因此针对实际情况,综合分析飞机级平均修复时间分配的影响因素与因素等级之间变化关系,本文采用专家打分法来建立模糊矩阵。同时,为了减少由于专家的工程经验大小,理论水平高低的影响,本文对专家打分的统计结果采用加权平均的处理方式。

2.4 基于设计特性的模糊评判

基于模糊变换理论^[10-11],本文所提的基于设计特性的模糊综合评判模型为:

$$B = A \circ R \quad (2)$$

将各系统所对应的评级模型和相乘,可计算得到整个系统的模糊综合评价值。

$$d = B \cdot C^T \quad (3)$$

2.5 系统级维修性指标分配

假设确定的民用飞机飞机级平均修复时间为 T ,那么 M 系统所应分配最大修复时间为:

$$T_k = T \cdot (d_k / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i) \quad (4)$$

3 实例应用

民用飞机由空调、通信、防火、飞控、燃油等十几个系统组成。由于篇幅有限,本文实例仅对飞控,燃油、液压、起落架、APU、动力装置系统进行维修性指标分配。飞机级平均修复时间为 30 min,同时,基于本文 2.1 节中因素筛选结果、设计专家以及航空公司维修人员的经验,因素集权数确定为: $A = (0.1, 0.2, 0.4, 0.15, 0.15)$ 。6 个系统的评判矩阵分别如下所示:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 \\ 0.25 & 0.4 & 0.3 & 0.05 \\ 0.15 & 0.4 & 0.4 & 0.05 \\ 0.3 & 0.25 & 0.4 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.65 & 0.25 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.5 & 0.1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.25 & 0.05 \\ 0.2 & 0.25 & 0.4 & 0.15 \\ 0.05 & 0.05 & 0.7 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.5 & 0 \\ 0.4 & 0.1 & 0.5 & 0 \\ 0.15 & 0.2 & 0.6 & 0.05 \\ 0.2 & 0.15 & 0.6 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.7 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.15 & 0.55 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.15 & 0.5 & 0.3 & 0.05 \\ 0.25 & 0.2 & 0.5 & 0.05 \\ 0.05 & 0.15 & 0.6 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 & 0 \\ 0.2 & 0.1 & 0.65 & 0.05 \\ 0.1 & 0.2 & 0.65 & 0.05 \\ 0 & 0.05 & 0.65 & 0.25 \end{bmatrix}$$

$$R_6 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.25 & 0.2 & 0.6 & 0.05 \\ 0.1 & 0.3 & 0.65 & 0.05 \\ 0.2 & 0.15 & 0.6 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.6 & 0.3 \end{bmatrix}$$

由式(2)得:

$$B_1 = A \cdot R_1 = (0.1825, 0.325, 0.4175, 0.075);$$

$$B_2 = A \cdot R_2 = (0.2175, 0.265, 0.435, 0.0825);$$

$$B_3 = A \cdot R_3 = (0.1975, 0.16, 0.585, 0.0575);$$

$$B_4 = A \cdot R_4 = (0.205, 0.3475, 0.38, 0.0575);$$

$$B_5 = A \cdot R_5 = (0.155, 0.1575, 0.615, 0.065);$$

$$B_6 = A \cdot R_6 = (0.1675, 0.21, 0.6, 0.0825)$$

再由式(3)得:

$$d_1 = B_1 \cdot C^T = 0.3995; d_2 = B_2 \cdot C^T = 0.3795;$$

$$d_3 = B_3 \cdot C^T = 0.41775; d_4 = B_4 \cdot C^T = 0.37225;$$

$$d_5 = B_5 \cdot C^T = 0.43525; d_6 = B_6 \cdot C^T = 0.46225$$

再由式(4)计算得:

$$T_1 = 29.15 \text{ min}; T_2 = 27.70 \text{ min}; T_3 = 30.49 \text{ min};$$

$$T_4 = 27.17 \text{ min}; T_5 = 31.76 \text{ min}; T_6 = 33.73 \text{ min}$$

由上述实例可以看出,本文方法能够很好地完成从整机级到系统级 MTTR 指标的分配,且需要的设计输入较少,更加适用于民用飞机设计的初期阶段。同时,本文的分配比例结果比较符合某航空公司运行实际,说明本文方法对完善民用飞机维修性分配方法和模型具有一定意义。

4 结论

1)影响民用飞机维修性分配的因素复杂,本文采用层次分析法筛选出了影响分配的主要因素,是本文维修性指标分配结果较合理的一个原因。

2)利用模糊集理论的优势解决因前期维修分配输入不足带来的模糊问题,并给出了模糊综合分配模型的详细求解步骤,结果显示本文算法的实用性。

3)本文所提出的维修性分配方法可以用来处理民机维修性分配的问题。本文的民用飞机维修性分配模型既是对现有方法的补充,也为民机型号研制给出了一个很好的工程应用示例。

参考文献:

- [1] 郭博智,王敏芹,吴昊.民用飞机维修性工程[M].北京:航空工业出版社,2018.
- [2] Maintainability prediction: MIL-HDBK-472 [S/OL]. [2019-11-17]. <http://www.doc88.com/p-0903200840724.html>.
- [3] 赵建民,周红.一种系统维修性优化分配的方法[J].机械科学与技术,2000,19(2):219-220.
- [4] 周栋,吕川,王美惠,等.基于时间特性的系统维修性分配改进方法[J].北京航空航天大学学报,2010,36(6):713-718.
- [5] 李贤.基于时间要素的系统 MTTR 分配方法[J].科技视界,2017(5):119.
- [6] 夏坚.民用飞机维修性分配研究[J].科技视界,2018(10):225.
- [7] 吴昊,左洪福,孙伟.基于改进 AHP 的民机结构偶然损伤检查间隔的研究[J].飞机设计,2008,28(3):57-61.
- [8] 吴昊,左洪福.基于改进层次分析法的民用飞机修理级别非经济性分析[J].飞机设计,2008,28(6):46-49.
- [9] 王健,唐鹏程,何建平.基于层次分析法区间估计的我国燃油税定价影响因素筛选[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2013,37(2):326-329.
- [10] 王冬梅,王志坤,徐廷学.基于模糊评判的导弹装备维修性分配模型研究[J].海军航空工程学院学报,2005,20(3):335-337.
- [11] 章卫国,杨向忠.模糊控制理论与应用[M].西安:西北工业大学出版社,1999.

作者简介

吴昊 男,博士,高级工程师。主要研究方向:民机维修性与维修工程研究。E-mail:wuhao1@comac.cc

A new allocation method on civil aircraft maintainability

WU Hao *

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Maintainability allocation is an important part of the aircraft maintainability design. Reasonable maintainability allocation can make the aircraft system design economically and effectively. In the preliminary design phase, the input of maintainability allocation was not sufficient. In this paper, analytic hierarchy process was used to select the factors of maintainability allocation. Then a maintainability allocation model based on fuzzy comprehensive evaluation was proposed, which included various characteristics of the aircraft design as evaluation factors. Finally, an example was analyzed in detail for the method mentioned above. The result shows that the model can be used to guide the aircraft system maintainability design and achieve the purpose of maintainability allocation.

Keywords: civil aircraft; analytic hierarchy process; maintainability allocation; fuzzy comprehensive evaluation

* Corresponding author. E-mail: wuhao1@comac.cc