

文章编号:1674-8190(2020)04-479-08

民用飞机 LRU 划分的双步迭代层次分析法

陈俊宇,冯蕴雯,郭英男,刘雨昌

(西北工业大学 航空学院,西安 710072)

摘要:合理的航线可更换单元(LRU)划分可以有效提高民用飞机维修效率,避免飞机停机现象,保障民用飞机安全可靠运行。在综合考虑民用飞机设计阶段及运营过程中多种因素影响的前提下,提出一种 LRU 划分方法——双步迭代层次分析法(TSI-AHP)。梳理民用飞机设计阶段及运营阶段相关因素对 LRU 划分的影响;将产品按照功能分解至最底层结构,将其作为研究对象,运用 TSI-AHP 确定民用飞机 LRU 划分方案;并以 ARJ21-700 飞机起落架系统为例,运用所提方法实现其 LRU 划分。结果表明:基于 TSI-AHP 的民用飞机 LRU 划分方法可有效实现 ARJ21-700 飞机起落架系统的 LRU 划分;本文 LRU 划分项目与实际 LRU 项目基本一致,验证了该方法的可行性和有效性,可为国产民用飞机 LRU 划分工作提供一种新思路。

关键词:民用飞机;LRU 划分;双步迭代层次分析法;起落架系统

中图分类号:V267

文献标识码:A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.04.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



LRU Division of Civil Aircraft Based on Two-step Iterative Analytic Hierarchy Process

CHEN Junyu, FENG Yunwen, GUO Yingnan, LIU Yuchang

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Reasonable line replaceable unit (LRU) division can effectively improve the maintenance efficiency of civil aircraft, avoid the phenomenon of aircraft parking, and ensure the safe and reliable operation of civil aircraft. Under the premise of considering the influence of various factors in the design stage and operation process of civil aircraft, the design and operation of civil aircraft are carried out, a method of LRU division, two-step iterative analytical hierarchy process (TSI-AHP), is proposed. Firstly, the influence of relevant factors in the design and operation stages on LRU division of civil aircraft is investigated. Secondly, the influence of various factors are comprehensive considered, and the lowest structures of product decomposed by their function are regarded as the study objects, and the TSI-AHP is applied to implement LRU division of civil aircraft. Finally, the landing gear system of ARJ21-700 aircraft is treated as an example to realize the LRU division using the method proposed. The results show that the LRU partition method based on TSI-AHP can effectively realize the LRU partition of landing gear system of ARJ21-700 aircraft. The LRU partition project in this paper is basically consistent with the actual LRU project, which verifies the feasibility and effectiveness of this method, and provides a new idea for the LRU partition of domestic civil aircraft.

Key words: civil aircraft; LRU division; two-step iterative analytic hierarchy process; landing gear system

收稿日期:2019-12-05; 修回日期:2020-01-11

基金项目:国家自然科学基金(51875465)

通信作者:冯蕴雯, fengyunwen@nwpu.edu.cn

引用格式:陈俊宇,冯蕴雯,郭英男,等.民用飞机LRU划分的双步迭代层次分析法[J].航空工程进展,2020,11(4):479-486.

CHEN Junyu, FENG Yunwen, GUO Yingnan, et al. LRU division of civil aircraft based on two-step iterative analytic hierarchy process[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 479-486. (in Chinese)

0 引言

航线可更换单元(Line Replaceable Unit,简称 LRU)作为一种实时便捷更换单元,可以在民用飞机运营过程中实现故障快速检测、定位、隔离、维修等措施。合理的 LRU 划分不仅可以有效提高民用飞机的维修效率,避免飞机停场(Aircraft on Ground,简称 AOG)现象,而且可为修理级别分析(Level of Repair Analysis,简称 LORA)和维修资源保障提供有效的输入,降低维护成本并提高可靠性^[1-7],为民用飞机综合后勤保障(Integrated Logistic Support,简称 ILS)提供支撑。当前,国产民用飞机产业处在稳步提升阶段,维修工程体系日趋完善,为了提高国产民用飞机保障服务质量,有必要开展民用飞机 LRU 划分技术研究。

针对 LRU 划分,国内外已开展了相应的研究,并且取得了一定的成果。梁若曦^[8]考虑 LRU 与平均修复时间的关系对其划分方案进行了权衡研究;L. H. Crow^[9]从减少成本的角度结合可修复系统的使用寿命对 LRU 进行了分析研究;胡启先等^[10]根据功能结构独立性原则,提出了基于核心零部件聚类的飞机 LRU 划分方法;L. C. Thomas^[11]通过考虑部附件之间的依赖性,对复杂系统的 LRU 划分策略进行了研究,用以指导故障件维修及拆换;吕川^[12]、张策^[13]综合考虑可靠性、维修性、保障性等要求,研究了 LRU 的划分与产品设计之间的关系,并对 LRU 划分方案进行了综合评价;J. E. Parada 等^[14]针对 LRU 划分问题建立了一个以部件更换和购置备用部件的费用之和最小为目标的混合整数线性规划模型;吕少杰等^[15]结合大量历史故障数据,通过 Weibull 分布拟合及 Extendsim 仿真对直升机 LRU 划分进行了预测分析;李名^[16]以产品结构可拆卸度与模块度为量化指标对 LRU 划分方案进行了评估;W. Wei 等^[17]考虑可拆卸度、内部聚合度、外部耦合度等因素的影响,结合免疫算法对 LRU 划分方案进行了评估;Zhang N 等^[18]提出了基于复杂网络理论的模块划分方法,将其用于解决复杂产品的 LRU 划分问题;J. E. P. Puig 等^[19]以部件拆换与购置成本之和最小为优化目标,建立了混合整数线性规划模型,对 LRU 的划分问题进行了分析研究。上述工作虽然从不同的角度对 LRU 划分问题进行了研

究,但是仍存在不足之处:大多仅是针对特定问题提出了相应的解决方法,从单一指标和定量分析的角度对 LRU 进行了划分,适用范围受到限制;对于民用飞机而言,其 LRU 划分需要同时考虑多方面因素的影响,同时需要结合多指标对划分方案进行评估。

为了合理有效解决上述问题,本文在综合考虑多种因素影响的前提下,提出双步迭代层次分析法(Two-step Iterative Analytic Hierarchy Process,简称 TSI-AHP)用于民用飞机的 LRU 划分。首先,梳理民用飞机 LRU 划分相关影响因素;然后,将产品按照功能分解至最底层结构,并作为研究对象,运用 TSI-AHP 确定民用飞机 LRU 划分方案;最后,以 ARJ21-700 飞机起落架系统为例,验证所提方法的有效性和可行性。

1 LRU 划分影响因素分析

民用飞机 LRU 划分需要综合考虑设计阶段和运营阶段各相关因素的影响,然而这些影响因素在物理或逻辑上相互制约、相互冲突^[20-21],因此有效梳理相关影响因素对于民用飞机 LRU 划分尤为重要。通过对国内外 LRU 划分研究现状的调研与分析,可将民用飞机 LRU 划分影响因素归纳为六类:经济性、可靠性、测试性、维修性、重量和维修工程分析因素。各类影响因素评估原则如下:

(1) 经济性。在民用飞机 LRU 划分过程中,若研究对象更换超出经济性指标限制,则部附件不适宜作为 LRU;如果 LRU 划分不合理,将导致航材购置及库存成本升高。

(2) 可靠性。可靠性指标是影响 LRU 划分的一个关键因素^[22],对于故障发生较为频繁,即平均故障间隔时间较小的部附件,在给定的可靠性指标范围内影响签派可靠性的部附件应当考虑设计成 LRU。

(3) 测试性。根据有关民用航空统计表明,至少 10% 的延误是由于测试性造成的,LRU 划分时应以功能互相连接数最少和故障隔离到正确单元为原则。

(4) 维修性。维修性设计是与 LRU 划分密切相关的一个主要影响指标,通常用航线平均修复时间进行衡量,它不仅是维修性的一个基本度量,还是维修性设计参数的要求值。

(5) 重量。LRU 划分必须考虑到重量的影响,对于飞机而言每一个部附件都会分配具体的重量指标,重量直接决定了部附件在发生故障时是否可以实现快速航线维修,是否方便运输等。

(6) 维修工程分析。维修工程分析通常以保障性进行衡量,保障性通过修理级别分析对 LRU 划分过程中的维修资源、维修能力进行匹配度研究,如果航线没有足够相应航材、没有相应设备及能力完成故障修复,则不能设定为 LRU。

2 基于 TSI-AHP 的民用飞机 LRU 划分流程与步骤

为了合理有效实现民用飞机 LRU 划分,提出一种民用飞机 LRU 划分方法,在综合考虑设计阶段和运营阶段影响因素的前提下,结合功能划分将目标划分至最底层,并作为研究对象,基于 TSI-AHP 实现 LRU 划分。基于 TSI-AHP 的民用飞机 LRU 划分流程如图 1 所示。

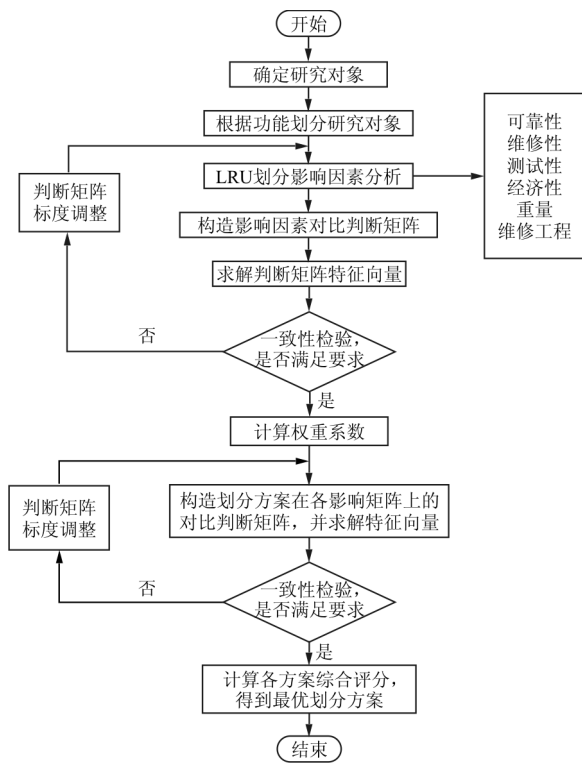


图 1 基于 TSI-AHP 的民用飞机 LRU 划分流程

Fig.1 The procedure of civil aircraft LRU division based on TSI-AHP

从图 1 可以看出:基于 TSI-AHP 的民用飞机

LRU 划分具体流程如下:

(1) 首先确定研究对象,根据功能划分将其分解至结构最底层结构,即单个单元和模块,直至不能进行细分为止,并将这些最底层结构作为 LRU 划分的研究对象;

(2) 基于上述研究对象,分别梳理 LRU 划分过程中各自的影响因素,主要包括经济性、可靠性、测试性、维修性、重量和维修工程分析,并确定各因素对 LRU 划分的影响系数;

(3) 结合获取的各因素影响系数取值,构造各研究对象影响因素的对比判断矩阵,并求解判断矩阵的特征向量;

(4) 结合判断矩阵的最大特征值,进行一致性检验,如果不满足要求,则需要重新调整各影响因素的方案判断矩阵,直至满足要求为止;

(5) 依据满足检验要求的系数,计算相关因素的权重系数,确定各影响因素对于各研究对象 LRU 划分过程中的影响程度;

(6) 将非拆换部件、LRU 或车间可更换单元 (Shop Replaceable Unit, 简称 SRU) 作为 LRU 划分的三种备选方案,针对各研究对象进行 LRU 划分评估,构建对比判断矩阵,并实现矩阵求解,获取三种备选方案的权衡指标;

(7) 结合各影响因素、三种备选方案的权衡系数以及加权平均,获取 LRU 划分策略,实现民用飞机 LRU 划分。

3 基于 TSI-AHP 的民用飞机 LRU 划分建模

TSI-AHP 是在传统的层次分析法基础上,结合双步迭代和加权平均思想发展而来,其分析原理为:依据 LRU 划分过程中影响因素,运用层次分析法获取各影响因素的权重系数;综合考虑各影响因素的重要程度,采用嵌套层次分析策略获取 LRU 划分三种备选的权衡指标;在此基础上,结合加权平均思想确定民用飞机 LRU 划分最优方案。基于 TSI-AHP 的民用飞机 LRU 划分数学模型建立如下:

(1) 层次结构模型建立

为了保证 LRU 划分的有效性和准确性,将决策目标、影响因素和 LRU 划分方案按照它们之间

的相互关系分为目标层、准则层和方案层,其层次结构如图 2 所示。

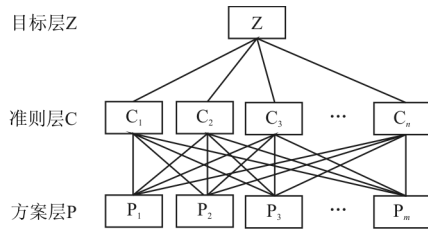


图 2 层次结构图

Fig. 2 Hierarchical structure diagram

(2) 影响因素对比判断矩阵构造

按照功能划分将目标分解至结构最底层结构,并作为 LRU 划分的研究对象。综合考虑各影响因素,构造其对比判断矩阵,如式(1)所示。此外,判断矩阵标度(如表 1 所示)是结合民用飞机运营历史数据,通过专家评定进行建立。对比判断矩阵元素通过表 1 确定。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

表 1 判断矩阵标度及其含义

Table 1 Scaling of judgment matrix and its implications

重要性标度	含 义
1	表示两个元素相比,具有同等重要性
3	表示两个元素相比,前者比后者稍重要
5	表示两个元素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比,前者比后者强烈重要
9	表示两个元素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述判断的中间值
倒数	若元素 i 与元素 j 的重要性之比为 a_{ij} ,则元素 j 与元素 i 的重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

(3) 特征向量的计算

对比判断矩阵特征向量的求解公式为

$$AV = VD \quad (2)$$

式中: V 为判断矩阵的特征向量; D 为特征值矩阵。

(4) 一致性检验

基于计算的特征值寻找最大特征值 λ_{max} ,为了检验判断矩阵的一致性,首先需要计算一致性指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

式中: n 为判断矩阵的维数($n \geq 3$), $CI = 0$ 表示判断矩阵具有完全一致性。

对比判断矩阵一致性通常结合一致性比例 CR 进行判别,通过式(4)计算;此外,当 CR 计算值小于 0.1,则判断矩阵通过检验,其一致性是可以接受的,否则重新调整判断矩阵。

$$CR = \frac{CI}{RI(n)} \quad (4)$$

式中: RI 为平均随机性一致性指标(一致性指标查询表如表 2 所示)。

表 2 一致性指标 RI 查询表

Table 2 Conformity indicator RI query table

n	RI	n	RI
3	0.58	7	1.32
4	0.90	8	1.41
5	1.12	9	1.45
6	1.24		

(5) 权重系数的计算

依据判断矩阵最大特征值找寻对应的特征向量 W ,运用式(5)对权重系数 w 进行计算。

$$w = \frac{W}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (5)$$

其中,特征向量 W 可表示为

$$W = [W_1, W_2, \dots, W_n] \quad (6)$$

(6) 备选方案判断矩阵构建

构建 LRU 划分备选方案的判断矩阵 B ,矩阵 B 的构建是对各备选方案进行相对重要性的排序权值,矩阵中每一元素表示各候选方案在各个影响因素上的优劣程度,如式(7)所示。依据步骤(3)~步骤(4)对备选方案判断矩阵进行一致性检验,并求得每一影响因素上各候选方案的特征值。

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(7) LRU 划分方案确定

根据各影响因素的系数以及备选方案权衡指标,结合加权平均思想确定最优的 LRU 划分方

案,其计算原理为

$$S_i = \sum_{j=1}^n W_j \cdot \bar{W}_{ij} \quad (i=1, \dots, m) \quad (8)$$

式中: \bar{W}_{ij} 为第 j 个影响因素的特征向量中与第 i 个候选方案对应的分量; W_j 为第 j 个影响因素的权重系数。

由此可得各个候选方案的综合得分情况,对各个候选方案进行排序,即可得到最终的最优方案。

4 典型国产民用飞机 LRU 划分案例

以 ARJ21-700 飞机起落架系统为研究目标,按照功能划分将其进行产品结构分解,得到 ARJ21-700 飞机的起落架系统 59 项 LRU 划分研究对象(如表 3 所示),运用 TSI-AHP 方法对起落架系统进行 LRU 划分。

表 3 ARJ21-700 飞机起落架系统构型项
Table 3 ARJ21-700 aircraft landing gear system configuration items

序号	研究对象名称	序号	研究对象名称	序号	研究对象名称
1	缓冲支柱	21	位置作动组件	41	转换阀
2	起落架收放手柄	22	前起落架轮载传感器	42	刹车控制阀
3	前起落架收放作动筒	23	前起落架锁连杆传感器	43	刹车控制组件
4	前起落架开锁作动筒	24	前起落架放下位置传感器	44	脚踏刹车传感器
5	前起落架前撑杆	25	转弯超行程传感器	45	压力传感器组件
6	前起落架锁连杆	26	主起落架缓冲支柱	46	驱动盖组件
7	前起落架锁弹簧	27	主起落架减摆器	47	机轮速度传感器
8	应急放选择阀	28	主起落架选择阀	48	自动刹车控制开关
9	安装支架	29	回油单向阀	49	停机应急刹车手柄
10	应急放前起落架开锁	30	主起落架收放作动筒	50	停机应急刹车阀
11	密封球	31	主起落架上位锁盒	51	刹车蓄压器
12	滑轮支架	32	开锁作动筒	52	刹车温度传感器
13	前起落架机轮	33	主起落架侧撑杆	53	刹车装置
14	NLG 刹车板组件	34	主起落架锁撑杆	54	主起落架机轮
15	转弯控制组件	35	主起落架下位锁弹簧	55	主起落架轮载传感器
16	转弯控制阀	36	起落架选择阀	56	主起落架上位锁传感器组件
17	转弯控制阀安装板	37	液压保险组件	57	主起落架下位锁传感器组件
18	转弯手轮	38	压力传感器	58	扇形轮组件防护罩
19	转弯反馈传感器	39	刹车蓄压器单向阀	59	滑轮组件防护罩
20	转弯脱开扳动开关	40	切断阀		

以前起落架收放作动筒为研究对象,来说明基于 TSI-AHP 的 LRU 划分流程及建模过程:

(1) 将决策目标划分为最高层,影响因素划分为中间层,预选方案划分为最底层,其层次结构模型如图 3 所示。

(2) 综合考虑 LRU 划分影响因素,构建前起落架收放作动筒的对比判断矩阵,即

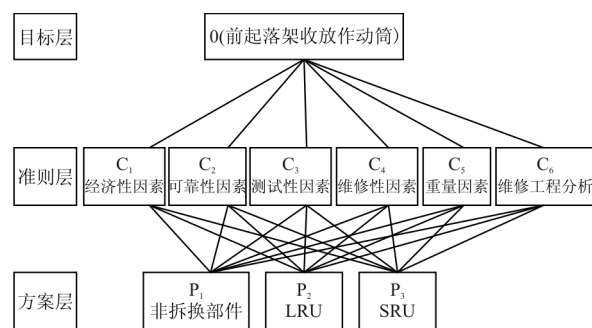


图 3 层次结构模型

Fig. 3 Hierarchical model

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/6 & 1/2 & 1/5 & 1/3 & 1/4 \\ 6 & 1 & 5 & 2 & 4 & 3 \\ 2 & 1/5 & 1 & 1/4 & 1/2 & 1/3 \\ 5 & 1/2 & 4 & 1 & 3 & 2 \\ 3 & 1/4 & 2 & 1/3 & 1 & 1/2 \\ 4 & 1/3 & 3 & 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$w = [0.0428 \quad 0.3824 \quad 0.0641 \quad 0.0250 \quad 0.1006 \quad 0.1596] \quad (10)$$

(5) 结合 LRU 相关因素,分别建立考虑经济性、可靠性、测试性、维修性、重量和维修工程分析的 LRU 划分备选方案的判断矩阵,如下:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 2 \\ 2 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 2 \\ 2 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 2 \\ 3 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 1/2 \\ 4 & 1 & 3 \\ 2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}, B_6 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 2 \\ 3 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}.$$

(6) LRU 划分备选方案判断矩阵的一致性检验,求得各备选方案在每一影响因素上的权衡指标,如表 4 所示。

(7) 结合平均加权思想计算可得 3 种 LRU 划分备选方案的综合评分,分别为 $S_1=0.2473$ 、 $S_2=0.5789$ 、 $S_3=0.1738$,最终方案的排序为 $S_2 > S_1 > S_3$ 。因此最佳的 LRU 划分方案是 S_2 ,即将前起落架收放作动筒划分为 LRU。

(3) 计算判断矩阵的特征向量和特征值,寻找判断矩阵的最大特征值和位置,再进行一致性检验,通过式(3)~式(4)求得其一一致性比例计算值小于 0.1,即一致性是可以接受的。

(4) 寻找判断矩阵最大特征值对应的特征向量,进而计算各影响因素的权重系数:

运用上述方法和流程,本文对 ARJ21-700 飞机起落架系统剩余 58 项研究对象依次遍历进行 LRU 划分分析,分别得到各个项目的 LRU 划分方案,对于被划分为非拆换部件的项目,若存在有多个部附件(非标准件)组成,则对其附件进行下一步规划分析,直到不需要进一步划分。最终可以得到 ARJ21-700 飞机起落架系统的 LRU 划分方案,可以确定为 LRU 项目的共 52 项,具体如表 5 所示,表中 PNR 为项目编号(Part Number)。

表 4 LRU 划分备选方案一致性检验与特征系数

Table 4 Consistency check and characteristic coefficient of each division plan

因素	CR	w
经济性	小于 0.1	[0.297 0 0.539 6 0.163 4]
可靠性	小于 0.1	[0.297 0 0.539 6 0.163 4]
测试性	小于 0.1	[0.238 5 0.625 0 0.136 5]
维修性	小于 0.1	[0.142 9 0.571 4 0.285 7]
重量	小于 0.1	[0.332 5 0.527 8 0.139 6]
维修工程分析	小于 0.1	[0.332 5 0.527 8 0.139 6]

表 5 ARJ21-700 飞机起落架系统 LRU 项目

Table 5 ARJ21-700 aircraft landing gear system LRU project

序号	LRU 项目名称	PNR	序号	LRU 项目名称	PNR
1	刹车温度传感器	6007300	27	前起落架收放作动筒	2131-0001-403
2	接近传感器	84798006	28	前起落架开锁作动筒	2132-0001-405
3	前起落架机轮	90000581-1	29	单向阀组件	2241-0070-401
4	刹车控制阀	90004060-1	30	起落架选择阀	2248-0001-401
5	刹车切断阀	90004061	31	应急放选择阀	2249-0001-401
6	停机应急刹车阀	90004062	32	转弯控制阀	2250-0001-401
7	停机应急刹车手柄	90004063	33	转弯反馈传感器	2351-1159-401
8	停机应急刹车钢索	90004064-1	34	前起落架前撑杆	2535A0000-03
9	转换阀	90004065	35	前起落架锁连杆	2351-1600-403
10	液压保险组件	90004066	36	主起落架上位锁盒	2351-2900-401

续表

序号	LRU项目名称	PNR	序号	LRU项目名称	PNR
11	主起落架机轮	90004162-1	37	应急放手柄组件	2351-9901-401
12	刹车装置	90004163-1PR	38	前起落架轮胎	247F22T1
13	刹车控制盒	90004183-2	39	主起落架侧撑杆	2507A0000-04
14	刹车蓄压器	90004293	40	主起落架锁撑杆	2508A0000-03
15	脚踏刹车位置传感器	90004328	41	主起落架减摆器	2520A0000-02
16	机轮速度传感器	90004329	42	转弯控制组件	2529A0000-03
17	起落架控制压力传感器	90004340-1	43	位置作动控制组件	2530A0000-02
18	自动刹车控制开关	90004361	44	起落架收放手柄	2531A0000K02
19	回油单向阀	90004924	45	转弯手轮	2546A0000K02
20	内外轮压力传感器	90004925-2	46	主起落架轮胎	409K02-2
21	下位锁传感器右线束	2000A1749K01	47	转弯脱开扳动开关	8868K54
22	下位锁传感器右2线束	2000A1750K01	48	前起落架锁连杆传感器	2351-1600-403
23	下位锁传感器左线束	2000A1766K01	49	前起落架轮载传感器	2540A0000-02
24	下位锁传感器左2线束	2000A1767K01	50	转弯超行程传感器	2540A0000-02
25	主起落架收放作动筒	2129-0001-403	51	前起落架放下位置传感器	531A1100-000-501
26	开锁作动筒	2130-0001-403	52	主起落架轮载传感器	2505A0000-04

为了说明该方法的有效性和适用性,将运用TSI-AHP的民用飞机LRU划分方案所得到的LRU划分结果与实际LRU清单中的项目进行比对,结果表明:本文通过TSI-AHP方法所得LRU项目与LRU清单给出的LRU项目基本一致,可为民用飞机LRU划分提供一种新的思路。

5 结 论

(1) 本文提出了民用飞机LRU划分的双步迭代层次分析法,运用该方法进行划分的LRU项目与工程实际LRU清单中的项目进行对比分析,发现本文LRU划分项目与实际LRU项目基本一致,验证了所提方法的可行性和有效性。

(2) 本文所提方法对于民用飞机LRU清单及推荐备件清单(Recommend Spare Part List,简称RSPL)编制具有重要意义,可为民用飞机维修资源规划提供参考,进而为保障民用飞机全寿命周期安全可靠运行奠定基础。

参考文献

- [1] 吴学良,边振海. 浅谈MSG维修思想与工程实践[J]. 航空维修与工程, 2004(1): 28-30.
WU Xueliang, BIAN Zhenhai. A brief talk on MSG maintenance thought and engineering practice[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2004(1): 28-30. (in Chinese)
- [2] 贾宝惠,于灵杰,蔺越国,等. 基于AHP-SPA方法的民机修理级别确定综合分析模型[J]. 航空学报, 2017, 38(11): 178-186.
JIA Baohui, YU Lingjie, LIN Yueguo, et al. Comprehensive analysis model for determination of civil aircraft repair level based on AHP-SPA method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(11): 178-186. (in Chinese)
- [3] 冯蕴雯,刘雨昌,薛小锋,等. 基于横向供应与维修比例的民机备件配置优化技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(6): 1059-1068.
FENG Yunwen, LIU Yuchang, XUE Xiaofeng, et al. Research on configuration optimization of civil aircraft spare parts with lateral transshipment and maintenance ratio[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(6): 1059-1068. (in Chinese)
- [4] 冯蕴雯,路成,薛小锋,等. 考虑维修比例的民机备件多级库存配置研究[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(3): 582-589.
FENG Yunwen, LU Cheng, XUE Xiaofeng, et al. Study on multi-level inventory allocation of civil aircraft spare parts considering maintenance ratio[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(3): 582-589. (in Chinese)
- [5] LIU Y C, FENG Y W, XUE X F, et al. Joint optimization of level of repair analysis and civil aircraft inventory system based on PSO algorithm[J]. Materials Science and Engineering, 2019, 538: 1-12.
- [6] HONG Sheng, ZHOU Zheng, ZIO E, et al. Condition assessment for the performance degradation of bearing based on a combinatorial feature extraction method[J]. Digital

- Signal Processing, 2014, 27: 159-166.
- [7] HONG Sheng, ZHOU Zheng, ZIO E, et al. An adaptive method for health trend prediction of rotating bearings[J]. Digital Signal Processing, 2014, 35: 117-123.
- [8] 梁若曦. 基于平均修复时间的商用飞机航线可更换单元规划方法研究[J]. 科技创新导报, 2017, 14(8): 6-7.
LIANG Ruoxi. Research on the planning method of replaceable units for commercial aircraft routes based on average repair time[J]. Science and Technology Innovation Report, 2017, 14 (8): 6-7. (in Chinese)
- [9] CROW L H. Methods for reducing the cost to maintain a fleet of repairable systems[C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium. Tampa, FL, USA, 2003: 392-399.
- [10] 胡启先, 王卓健, 鱼欢. 基于核心零部件聚类的飞机现场可更换单元划分[J]. 航空学报, 2019, 40(11): 1-18.
HU Qixian, WANG Zhuojian, YU Huan. Partition of line replaceable units in aircraft based on clustering of key components [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(11): 1-18. (in Chinese)
- [11] THOMAS L C. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems[J]. Reliability Engineering, 1986, 16(4): 297-309.
- [12] 吕川. 维修性设计分析与验证[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
LÜ Chuan. Maintainability design analysis and verification [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [13] 张策. 面向 RMS 的 LRU 规划设计[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
ZHANG Ce. LRU planning and design for RMS[D]. Beijing: Beihang University, 2006. (in Chinese)
- [14] PARADA J E, BASTEN P R J I. Defining line replaceable units[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 247(1): 120-131.
- [15] 吕少杰, 柳杨, 魏靖彪, 等. 基于 ExtendSim 的直升机外场可更换部件需求仿真系统设计[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(5): 95-98.
LÜ Shaojie, LIU Yang, WEI Jingbiao, et al. Design of helicopter field replaceable parts demand simulation system based on ExtendSim [J]. Command Control and Simulation, 2019, 41(5): 95-98. (in Chinese)
- [16] 李名. 面向拆卸的产品模块化设计方法研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
LI Ming. Research on modular design method of disassembly oriented products[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [17] WEI W, ANG L, STEPHEN C Y L, et al. A multi-principle module identification method for product platform design[J]. Journal of Zhejiang University (Science A), 2015, 16(1): 1-10.
- [18] ZHANG N, YANG Y, ZHENG Y J. A module partition method base on complex network theory[C]// IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. [S.l.]: IEEE, 2016: 105-113.
- [19] PUIG J E P, BASTEN R J I. Defining line replaceable units [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 247 (1): 310-320.
- [20] HONG S, LU C, ZHAO T, et al. Cascading failure analysis and restoration strategy in an interdependent network [J]. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 2016, 49(19): 1-7.
- [21] HONG S, ZHU J, BRAUNSTEIN L A, et al. Cascading failure and recovery of spatially interdependent networks [J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2017(10): 1-9.
- [22] 胡启先, 王卓健, 任帆. LRU 可靠性评估仿真模型及实例分析[J]. 航空工程进展, 2019, 10(5): 634-642.
HU Qixian, WANG Zhuojian, REN Fan. A reliability evaluation simulation model of aircraft LRU and an example analysis [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(5): 634-642. (in Chinese)

作者简介:

陈俊宇(1997—),女,硕士研究生。主要研究方向:维修性工程。

冯蕴雯(1968—),女,博士,教授。主要研究方向:飞机可靠性维修性工程、系统工程。

郭英男(1975—),男,博士,副研究员。主要研究方向:飞行器结构静/动强度分析。

刘雨昌(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:维修性及航材管理。

(编辑:马文静)