

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-10

# 基于维修正向设计的航线可维护件确定及分类研究

王芳, 喻拿仑, 孙铁源, 魏敦生

(上海飞机客户服务有限公司 维修工程部, 上海 200241)

**摘要:** 全机航线可维护件是民用飞机维修正向设计的重要产品之一, 传统的确定方法基于现有的飞机成品件构成进行划分, 强烈依赖于供应商提供的技术资源和支援, 无法在产品设计之初就考虑维修设计的需求。提出一种基于维修正向设计的全机航线可维护件确定及分类方法, 建立该方法的维修正向设计流程, 分析该方法的定性判别逻辑, 并确定该方法的定量权衡指标直接维修成本及建立指标测算的工程模型, 通过算例验证该方法应用于航线可维护件的分类权衡。结果表明: 本文提出的方法能够权衡决定全机航线可维护件及分类, 可以开展以全机航线可维护件为基础的维修活动设计和经济性指标监控, 迭代更新航线可维护件的再设计, 为航线可维护件的重新设计提供参考意见。

**关键词:** 维修正向设计; 航线可维护件; 直接维修成本; 经济性; 定量权衡

中图分类号: V221

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

## Research on identification and classification of airline maintainable parts based on forward maintenance design

WANG Fang, YU Nalun, SUN Tiejuan, WEI Dunsheng

(Maintenance Engineering Department, Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

**Abstract:** Airline maintainable parts of whole aircraft are one of the important products in forward maintenance design of civil aircraft. The traditional determination method is based on the composition of existing aircraft finished parts, strongly relying on the technical resources and support provided by suppliers. It cannot consider the needs of maintenance design at the beginning of product design. A method for identifying and classifying airline maintainable parts of whole aircraft based on forward maintenance design is proposed, the process of forward maintenance design of this method is established, and the qualitative discrimination logic of this method is analyzed. The quantitative tradeoff index DMC of this method is determined, and the engineering model for calculating the index is established. The method applied to the classification and tradeoff of airline maintainable parts is verified with numerical example. The results show that the proposed method can weigh and decide the airline maintainable parts and classification of the whole aircraft, and can carry out maintenance activity design and economic index monitoring based on the maintainable parts of the whole aircraft. At the same time, it can iteratively update the redesign of airline maintainable parts and provide references for the redesign of airline maintainable parts.

**Key words:** forward maintenance design; airline maintainable parts; direct maintenance cost; economy; quantitative tradeoff

收稿日期: 2024-03-19; 修回日期: 2024-06-10

通信作者: 王芳(1983-), 女, 硕士, 高级工程师。E-mail: wangfang2@comac.cc

引用格式: 王芳. 基于维修正向设计的航线可维护件确定及分类研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-10.

WANG Fang. Research on identification and classification of airline maintainable parts based on forward maintenance design[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-10. (in Chinese)

## 0 引言

随着国产民机投入商业运营,“以客户为中心”的服务理念越来越成为民机主制造商、型号参研单位和国内外供应商的共识。已经逐步从传统的产品售后服务和支持向为客户创造价值转变,坚持以客户为中心。理念的贯彻离不开体系的建设,客户服务体系<sup>[1]</sup>与研发制造体系一样是需要研制和设计出来的,面向维护和运行的维修正向设计就是客户服务体系建设和实施的核心。通过研发设计和制造满足了飞机功能、性能、安全性和适航性的需求,但仅凭研制完成的飞机并不能自然的成为一款商业运营成功的飞机,飞机如何满足客户对经济性、可靠性、维修性及服务的需求才是国产飞机成功的关键。这就需要在型号的整个开发过程融入维修正向设计。维修正向设计是在确保安全性的基础上,基于维修经济性做权衡统筹,落实包含维修性指标的维修工程核心需求到型号设计的全过程,并做好维修活动的设计<sup>[2]</sup>,维修活动的设计既包括维修任务的确定又包括所需维修资源的配置。在飞机初始研制设计阶段充分考虑维修设计需求,将飞机维修性指标纳入设计评审的过程和全生命周期的管理过程。

戚燕杰等<sup>[3]</sup>提出了现代大飞机的维修设计概念,论述了面向维修的设计在现代大型运输飞机研制与发展中重要的地位和作用,阐明了维修性及相关特性是现代大飞机成功与否的关键技术;柏文华<sup>[4]</sup>提出维修设计在客服工程研制中的作用相当于飞机研制的总体设计。空客公司针对 A380 的设计总原则是面向维修的设计,以降低 24% 的直接维修成本为目标,用最新的技术优化飞机的可靠性和维修性,同时又要做到在维修时用到最少的新技能和新程序步骤<sup>[5]</sup>;波音公司对于飞机维修设计历来都很重视,其维修理念领导着世界航空维修的发展,它开创了“以可靠性为中心的维修”,揭示了当代维修思想的本质:以安全、可靠、经济为目标的维修<sup>[5]</sup>。

维修设计的载体不可避免的要提到航线可更换单元(LRU),针对 LRU 国内外均开展了不少研究,Crow<sup>[6]</sup>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;陈俊宇<sup>[7]</sup>等提出双步迭代层次分析法划分 LRU;梁若曦<sup>[8]</sup>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;彭超峰<sup>[9]</sup>研究了 LRU 划分与其重量之间的关系并做了定性和定量分析;Parada 等<sup>[10]</sup>针对 LRU 划分问题建立了一个以部件更换和购置备用部件费用和最小为目标的模型;喻拿仑<sup>[11]</sup>构建了基于直接维修成本的 LRU 划分层级模型,提出了 LRU 向下拆分出 LMP 及 SRU 层级;王洁莹<sup>[12]</sup>提出了航线可维护件的概念及分类,指出航线可维护件是经济性、维修性、可靠性综合权衡的结果。

上述研究早期局限于 LRU 自身的划分合理性,到后期才提出了航线可维护件的概念,在提出概念的基础上仅给出了初步的划分原则,没有进一步的判别逻辑和分类方法;而且基于现有的飞机成品件构成进行划分,强烈依赖于供应商提供的技术资源和支援,无法在产品之初就考虑维修设计的需求,开展自主正向设计和建立经济性综合指标体系进行监控和反馈。然而全机航线可维护件<sup>[12]</sup>是民用飞机维修正向设计的重要产品之一,既是经济性、可靠性、维修性统筹权衡的结果,又是经济性、可靠性、维修性指标<sup>[13]</sup>分配、预计<sup>[14-15]</sup>及监控的候选目标项;也是维修活动相关维修资源配置的参考基础项。

因此本文在以上研究不足的基础上,提出一种基于维修正向设计的全机航线可维护件判别及分类方法,建立该方法的维修正向设计流程,分析该方法的定性判别逻辑,并确定该方法的定量权衡指标直接维修成本及建立指标测算的工程模型,通过算例验证该方法可以应用于航线可维护件的确定和分类。

## 1 全机航线可维护件正向设计流程

全机航线可维护件是维修正向设计需求重要的贯彻和落实产品之一,不仅是产品交付客户后用于航线维护的航材备件储备、持续适航手册编制的参考,更是开展维修设计工作的主要依据和支持开展维修任务分析、可靠性和维修性评估工作的基础。通过航线可维护件的确定,可以促进上下游工作的开展和优化。传统的可靠性和维修性担保值要求仅分配到系统级或子系统级,通过全机可维护件的确定,可以将可靠性和维修性指标分配和担保到部件级并相应在部件级监测;既可以基于全机航线可维护件从部件供应商获取可

靠性和维修性数据又可以通过运行测算对数据进行监测、修正和迭代；既可以基于全机航线可维护件开展 LORA 分析<sup>[16]</sup>，识别出可修理件建立部件维修能力，又可以迭代修正维修任务分析和 MSG-3 等分析<sup>[17]</sup>结论；识别全机航线可维护件既包括定性的逻辑判断，又包含定量权衡指标的判别和工程模型的测算。

综上，全机航线可维护件的正向设计是多任务、多参量，既有定性判别逻辑，又需定量权衡的设计过程。下图梳理和总结了全机航线可维护件正向设计流程。将为民机的航线可维护件的识别提供思路和参考。

全机航线可维护件正向设计流程如图 1 所示，总体包括定性分析和定量权衡两个过程，定性分

析通过定性判别逻辑(如图 2 所示)初步确定航线可维护件及得到初步的类别 LRU/LMP/LRI 划分；定量权衡过程通过获取来自供应商部件的可靠性和维修性相关参数数据，收集已投入运营型号飞机的可靠性和维修性数据，以及参考成熟机型的可靠性和维修性经验数据等，主要包括平均非计划拆卸间隔时间(MTBUR)，对部件接近、拆装、修理、测试等人工时，部件本身的航材价格、测试或修理相关的材料费等参数数据，作为估算反应经济性的综合权衡量化指标直接维修成本(DMC)的输入数据；DMC 的计算过程需要分别考虑不同的维修任务类型即不同的维修分析过程，包括航线例行维修任务、航线计划维修任务、航线非计划维修任务。

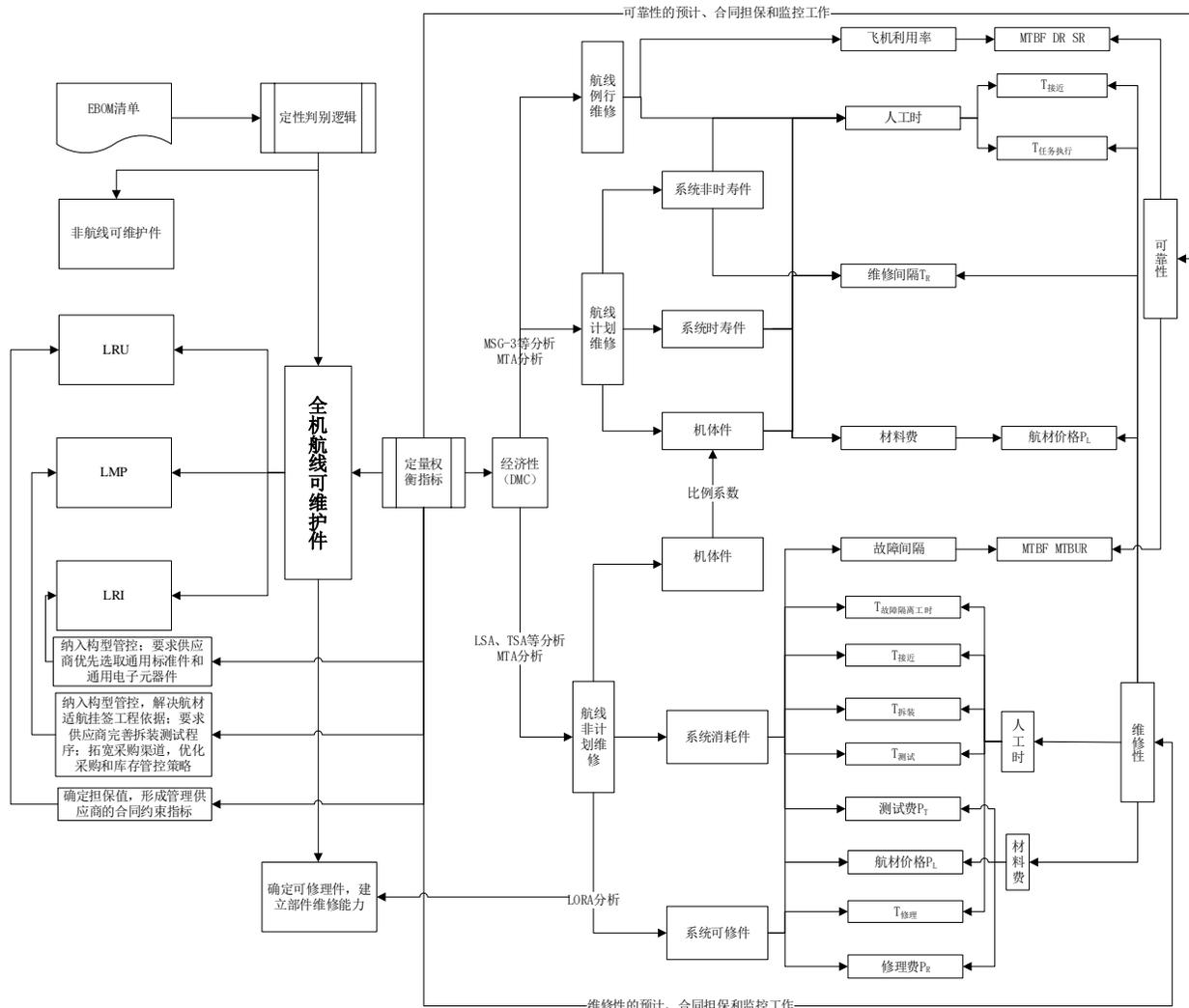


图 1 全机航线可维护件正向设计流程

Fig. 1 Forward maintenance design process of airline maintainable parts for the whole aircraft

不同的维修任务的创建和识别需要借助维修工程分析技术,主要包括MSG-3分析,后勤保障分析(LSA),排故分析(TSA)、维修任务分析(MTA)和修理级别分析(LORA)等。通过开展MSG-3分析和MTA分析可以确定绝大部分计划维修任务的实施对象、活动及维修资源配置,可以识别出需要进行报废或恢复任务的时寿件和只需要检查或勤务任务的非时寿件,对于非时寿件的DMC计算仅需考虑人工时和维修间隔;对于时寿件DMC计算需考虑人工时、材料费及维修间隔;通过开展LSA,TSA和MTA分析工作,可以分析确定绝大部分非计划维修任务,航线非计划维修任务可以借助LROA分析结论识别出可修件和消耗件,同时参考理论或经验的SPC(航材类型码)值,针对消耗件和可修件分别计算DMC。以上的DMC计算以及机体件的DMC计算均可详见第4节给出的测算模型进行计算。得到的DMC值可以作为航线可维护件进一步确定和类别划分的权衡指标,具体的应用过程示例详见第5.2节。经由以上的正向设计流程,可以获得该设计过程的输出产品—航线可维护件及其分类,通过全机航线可维护件的确定可以进一步完善不同设计阶段飞机级、系统级、分系统级、部件级的可靠性和维修性预计、分配及合同担保值监控工作;通过全机航线可维护件类别划分可以进一步针对不同类别开展不同的供应商约束指标建立,不同的构型管控力度,差异化的维修能力规划和建设,不同的采购和库存策略实施等。全机航线可维护件的正向设计可以针对原始设计导致的划分不合理项提出修正建议,另外对于原有设计不经济的给出再设计的建议,实现航线可维护件的正向设计需求。

## 2 全机航线可维护件定义和类别

本文的全机航线可维护件是指在飞机上(原位)可维修和拆装的全机系统供应商件和机体件,包含航线可更换单元(LRU),航线可维修件(LMP)和航线可更换项(LRI)。原位是指在飞机维修现场,主要包括:机坪、机库等;但不包含针对部件维修的车间。航线可更换单元(LRU)是指可在飞机上(原位)直接更换的具备独立功能(如控制、作动、保护等)的部件、组件等;航线可维修件(LMP)是指可在飞机上(原位)更换的零件、部件

等,是LRU的组成部分或者LRU之间的连接件。航线可更换项(LRI)是指可在飞机上(原位)更换的零件,故障后直接报废,或者使用标准施工程序对其进行修理或测试。

依据正向设计流程可知,全机航线可维护件的LRU/LMP/LRI分类对上游供应商和研发设计工作有迭代和完善作用,通过识别出LRU可以将DMC分配到部件级,并且在合同中设定部件级担保值管理供应商;识别出LMP可以细化完善研发设计对供应商的构型管控到最小颗粒度,又可以降低DMC,实现更好的经济性需求;另外针对LMP可以拓宽采购渠道,优化采购和库存策略;识别出的LRI可以要求供应商逐步转向通用的标准件和电子元器件选择。所以全机航线可维护件的分类可以提高维修正向设计的效率,降低管理成本。

## 3 全机航线可维护件定性判别逻辑

全机航线可维护件定性判别逻辑图如图2所示,应用定性判别逻辑图可以初步识别出航线可维护件并初步筛选出LRU、LMP和LRI分类。

图2中的逻辑判断条件罗列如下,并给出每条判断条件的具体说明。

判断条件1:是否可以在飞机直接更换或测试?飞机直接更换或测试是指本身不需要进一步拆分或分解而直接在飞机原位、机坪或机库更换或测试。

判断条件2:是否存在航线更换限制?航线更换限制包括更换时间明显高于航线维护限制时间(例如最大的飞机过站维护时间),但APU和发动机的吊装或更换,起落架的顶升或更换不在此限制条件范围;包括无法通过航线标准工具或设备进行拆装限制,航线标准工具主要包括扳手、螺刀、标准线路施工工具、内六方、卡尺、锤子等以及供应商附带提供的部件拆装工具,设备主要包括千斤顶、压力加油设备、拆装APU设备、吊装设备等;包括无法通过航线常见检测设备完成测试或检验限制,航线检测设备主要包括万用表、欧姆表、拉力计、检漏测试用仪器、大气数据测试设备等;包括人员资质及数量要求限制等。

判断条件3:是否为标准件、通用电子元器件、标牌等?此条件为LRI类别划分的筛选条件。

判断条件4:是否可以通过物理拆分且非破坏性拆分?物理拆分是指活连接,而非采用铆接、焊接等永久性形式连接的件,且非属于进行切割等操作后的破坏性拆分。

判断条件5:拆装程序是否存在特殊要求?指拆装程序中包括非标准力矩要求、特殊工具要求、消耗性航材及消耗性化工品要求等。

判断条件6:是否有相应的检测/检查要求?是在安装完成后可能需要的测量电阻、部件级的

操作测试或功能测试等,但不包括部件连接件之间的外泄漏测试。

判断条件7:是否有寿命限制?此条件的判断可以避免将关键的限寿件划分到关注度低的LRI类别。

判断条件8:是否是LRU之间的连接件?根据LMP件的定义,需将LRU之间的连接件归类为LMP件。

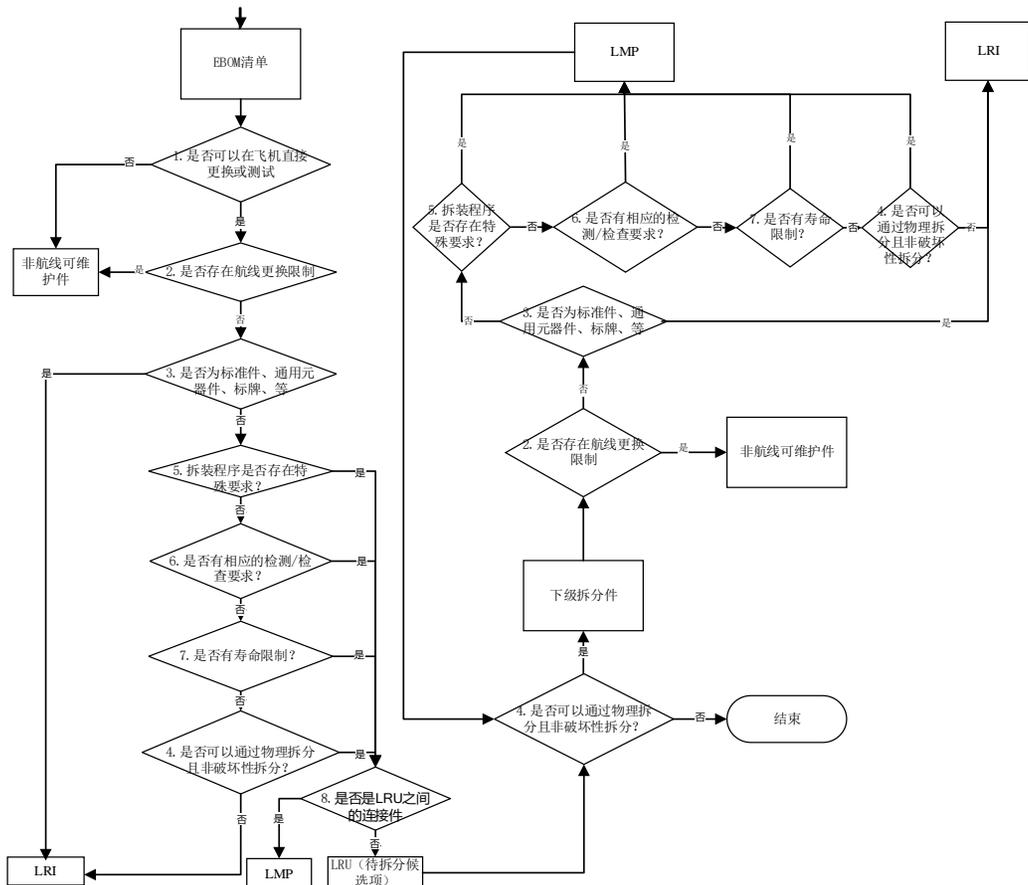


图2 全机航线可维护件定性判别逻辑图

Fig. 2 Qualitative discrimination logic of airline maintainable parts for the whole aircraft

其他说明:原则上不存在LRU下级嵌套LRU的情况,但是发动机、APU、起落架等大部件除外,因其存在航线整体拆换需求,因此整体定义为LRU。

#### 4 定量权衡指标 DMC 及其测算模型建立

依据全机可维护件正向设计流程可以看出,经济性指标的DMC(直接维修成本)是可以兼顾

可靠性及维修性评价的核心指标,又是对供应商部件级产品产生定量约束的指标,因此选取DMC作为定量权衡指标并结合不同的维修设计场景建立指标估算的工程模型,用来定量权衡航线可维护件的分类。航线可维护件分类受DMC影响关系如图3所示,可以看出:DMC和航线可维护件分类颗粒度间的关系,航线可维护件分类的颗粒度过粗或过细都会导致DMC的增加。因此从定量权衡的角度应保持满足合理的DMC担保值,即是

保持航线可维护件的理想分类结果。

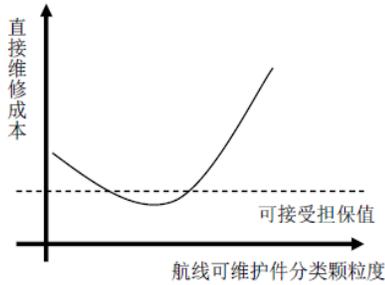


图3 航线可维护件分类受DMC影响关系<sup>[11]</sup>  
Fig. 3 Relationship between the classification of  
airline maintainable parts and DMC<sup>[11]</sup>

DMC的确定需要分别考虑以下维修设计场景:航线例行维修任务、航线计划维修任务、航线非计划维修任务<sup>[18]</sup>。航线计划维修任务又分别讨论时寿件的报废或翻修任务,非时寿件的检测和勤务任务,机体件的计划维修任务<sup>[19]</sup>。航线非计划维修任务需分别讨论系统消耗件的非计划维修任务,系统可修件的非计划维修任务,机体件的非计划维修任务。

航线例行维修检查所需的时间较为固定,数据主要依据航空公司的航前、航后、短停过站检查单中的工时,成本与飞机利用率以及飞机的小时循环比相关,其航线例行维修DMC模型:

$$C_{Line} = \frac{R \times [H_{pre} + H_{post} + H_{transit} \times (T/L - 1)]}{T} \quad (1)$$

式中: $C_{Line}$ 为航线例行维修的直接维修成本; $R$ 为维修人工时费率; $H_{pre}$ 为航前检查人工时; $H_{post}$ 为航后检查人工时; $H_{transit}$ 为过站检查人工时; $L$ 为飞行小时循环比; $T$ 为飞机日利用率。

时寿件的报废或恢复需产生材料费,其航线计划维修时寿件DMC模型<sup>[2]</sup>:

$$C_{Scheduled} = \frac{R \times H_{off} + M}{T_R} \quad (2)$$

式中: $C_{Scheduled}$ 为计划维修的直接维修成本; $R$ 为维修人工时费率; $H_{off}$ 为时寿件计划维修任务的离位维修人工时; $M$ 为计划维修任务的维修材料费; $T_R$ 为计划维修任务的维修间隔。

航线计划维修非时寿件的检查和勤务任务仅涉及人工时费用,无需部件更换或报废。因此DMC的计算模型:

$$C_{Scheduled} = \frac{R \times H_{on}}{T_R} \quad (3)$$

式中: $C_{Scheduled}$ 为计划维修的直接维修成本; $H_{on}$ 为计划修任务的原位维修人工时; $R$ 为维修人工时费率; $T_R$ 为计划维修任务的维修间隔。

机体的计划维修费用来源于飞机维修计划文件中的结构、区域、闪电防护计划维修任务,机体部分计划维修任务执行过程中的材料费主要包含涂胶、清洁剂等航化品,航线计划维修机体件DMC模型建立如下:

$$C_{Structure, Scheduled} = \frac{R \times H_{ON} + M}{T_R} \quad (4)$$

式中: $C_{Structure, Scheduled}$ 为机体计划维修的直接维修成本; $R$ 为人工时费率; $H_{ON}$ 为机体计划维修任务所需的原位维修人工时; $M$ 为机体计划维修任务所需的维修材料费; $T_R$ 为机体计划维修任务的维修间隔。

系统部分非计划维修DMC为部件故障后排故所需的人工时成本和部件更换所需的材料费,按DMC预测分为系统消耗件DMC和系统可修件DMC。系统消耗件往往也可称作不可修件,是指在飞机的使用过程中,一旦发生失效其无法修复或因修理成本过高不予修理。系统可修件(包括周转件和修理件):周转件在失效后其维修次数可以是无限的,使用次数及使用寿命可以是无限的,或者至少也和该部件所在的飞机寿命一样长。修理件在发生失效后可以有限次数的修理,而反复使用。且当此零件在管理,运输,维修等的费用超过更换一个新零件的采购成本,即修复不经济的,这时看做消耗件。这两类均考虑部件误更换的比例NFF, NFF同样产生部件返厂后的测试费用。综上航线非计划维修系统消耗件DMC模型<sup>[2]</sup>如下:

$$C_{Unscheduled} = \frac{R \times H + (1 - Nff) \times P_L + Nff \times P_T}{Tbur} \quad (5)$$

式中: $C_{Unscheduled}$ 为非计划维修的直接维修成本; $R$ 为人工时费率; $H$ 为人工时数; $Nff$ 为该零部件的误换率; $P_L$ 为该零部件的采购价格; $P_T$ 为该零部件的测试费用; $Tbur$ 为该零部件平均非计划拆卸间隔时间。

航线非计划维修系统可修件DMC模型<sup>[2]</sup>为

$$C_{Unscheduled} = \frac{R \times H + (1 - Nff) \times P_R + Nff \times P_T}{Tbur} \quad (6)$$

式中： $C_{Unscheduled}$  为非计划维修的直接维修成本； $R$  为人工时费率； $H$  为人工时数； $Nff$  为该零部件的误换件率； $P_R$  为该零部件的修理费用； $P_T$  为该零部件的测试费用； $Tbur$  为该零部件平均非计划拆卸间隔时间。

根据统计经验，机体部分非计划维修费用一般是机体计划维修费用的倍数关系，因此航线非计划维修机体件 DMC 模型如下：

$$C_{Structure\_Unscheduled} = \alpha \times C_{Structure\_Scheduled} \quad (7)$$

式中： $C_{Structure\_Unscheduled}$  为机体部分非计划维修的直接维修成本； $\alpha$  为机体部分计划维修的损伤检出后，修复所用到 DMC 与计划维修 DMC 的比例，根据同类机型统计结果，设定为 120%。

## 5 方法应用案例

用一个飞机空调系统制冷组件的案例按照修正设计流程解释本文提出的航线可维护件确定及分类方法的应用，既包括定性的逻辑判断过程又包括应用 DMC 工程模型的试算和定量权衡过程，最终确定源于制冷组件的航线可维护件及其分类。

### 5.1 应用流程及定性逻辑判断示例

首先获取一份制冷组件的 EBOM 清单如表 1 所示，为方便后续的解释说明，这里对制冷组件指定为 0 级，制冷组件下级件指定为 1 级，冲压空气转换活门、空气循环机等 1 级件的下级件指定为 2 级。

依照全机航线可维护件正向设计流程，首先开展定性判别，依据定性判别逻辑的判断条件逐层提问，示例中的 0 级及 1 级件均满足判断条件 1，0 级制冷组件本身的更换时间约 4~6 h，再考虑到开展的其他维护工时，整体维护时间容易超出最大的飞机过站维护时间，根据判断条件 2，存在航线更换限制，但以往的面向制造的设计多将其定义归类为 LRU，这个在后面试算完成 DMC 后再给出综合权衡的结论；制冷组件下的 1 级件密封圈、隔热绝热层、封圈、卡箍、保险丝、标牌不符合判断条件 2，符合判断条件 3 因此归属于 LRI；其他制

冷组件下 1 级件不符合判断条件 2，符合判断条件 5，其中连接管路又符合判断条件 8 因此归属于 LMP，其他冲压空气转换活门、空气循环机、温度控制活门、双热交换器、回热冷凝器、水分离器归属于 LRU。从 EBOM 可知部分 LRU 可以进一步物理拆分得到 2 级件，空气循环机的 2 级件涡轮、风扇、压缩机依据判断条件 2 存在航线更换限制，因为需要特殊的工具和测试设备及特殊操作人员资质要求，因此归属于非航线可维护件；其他 2 级件不符合判断条件 2，符合判断条件 3 归属于 LRI。

表 1 制冷组件 EBOM 清单  
Table 1 EBOM list of PACK-AIR Conditioning

层级	零部件名称	备注
0	制冷组件	
1	冲压空气转换活门	制冷组件下级件
2	搭接线	冲压空气转换活门下级件
2	螺钉	冲压空气转换活门下级件
2	垫片	冲压空气转换活门下级件
2	螺母	冲压空气转换活门下级件
1	空气循环机	制冷组件下级件
2	涡轮	空气循环机下级件
2	风扇	空气循环机下级件
2	压缩机	空气循环机下级件
2	密封圈	空气循环机下级件
2	保险丝	空气循环机下级件
1	温度控制活门	制冷组件下级件
1	双热交换器	制冷组件下级件
1	回热冷凝器	制冷组件下级件
1	水分离器	制冷组件下级件
2	密封圈	水分离器下级件
1	隔热绝热层	制冷组件下级件
1	封圈	制冷组件下级件
1	卡箍	制冷组件下级件
1	保险丝	制冷组件下级件
1	连接管路	制冷组件下级件
1	标牌	制冷组件下级件

基于 EBOM 和定性逻辑判断，得到的航线可维护件确定及归类的航线可维护件定性判断结果如表 2 所示。

表2 航线可维护件定性判断结果  
Table 2 Airline maintainable parts qualitative discrimination results

层级	零部件名称	定性类别判定	备注
0	制冷组件	非航线可维护件	初步判定结果,待定量权衡
1	冲压空气转换活门	LRU	制冷组件下级件
2	搭接线	LRI	冲压空气转换活门下级件
2	螺钉	LRI	冲压空气转换活门下级件
2	垫片	LRI	冲压空气转换活门下级件
2	螺母	LRI	冲压空气转换活门下级件
1	空气循环机	LRU	制冷组件下级件
2	涡轮	非航线可维护件	空气循环机下级件
2	风扇	非航线可维护件	空气循环机下级件
2	压缩机	非航线可维护件	空气循环机下级件
2	密封圈	LRI	空气循环机下级件
2	保险丝	LRI	空气循环机下级件
1	温度控制活门	LRU	制冷组件下级件
1	双热交换器	LRU	制冷组件下级件
1	回热冷凝器	LRU	制冷组件下级件
1	水分离器	LRU	制冷组件下级件
2	密封圈	LRI	水分离器下级件
1	隔热绝热层	LRI	制冷组件下级件
1	封圈	LRI	制冷组件下级件
1	卡箍	LRI	制冷组件下级件
1	保险丝	LRI	制冷组件下级件
1	连接管路	LMP	制冷组件下级件
1	标牌	LRI	制冷组件下级件

## 5.2 DMC 试算及权衡分析

依据修正正向设计流程,接下来需要试算定量权衡的经济性指标 DMC,应用模型综合计算制冷组件相关的计划及非计划维修任务的人工费及材料费来得到 DMC 值再权衡分析判断。

首先采用第 4 节的工程模型试算分属于飞机三个不同系统的 LRU 的 DMC,来进一步权衡确定制冷组件的类别;然后继续应用第 4 节的工程模型试算表 2 中所列出件的 DMC,并进行权衡分析确定最终的源于制冷组件 EBOM 的航线可维护件及分类,更重要的是对一些权衡后不适宜作为航线可维护件的提出修正建议,另外对于原有设计不经济的给出再设计的建议。

通过本文研究的方法可知,按定性判别逻辑制冷组件更换时间过长不宜作为航线维护件,从试算得到的不同系统 LRU 的 DMC 值如表 3 所示,可以看出:不同系统 LRU 的 DMC 值明显高于其他系统独立功能的 LRU,分别是压力油滤模块和水平安定面配平作动器的 DMC 值,作为 LRU 颗粒度过粗,同时对比表 4,定性判别后的 DMC 试算及分析如表 4 所示。试算的源于制冷组件 EBOM 中其他被初步判别为 LRU 的冲压空气转换活门、空气循环机、温度控制活门、双热交换器、回热冷凝器、水分离器的 DMC 值,它们的 DMC 值均显著低于制冷组件自身的 DMC 值,它们被定义归类为 LRU 从 DMC 定量权衡角度更经济合理。另一方面制冷组件在以往的国外制造商的成熟机型多被定义归类为 LRU,在飞机维护手册中会被提供独立的拆装程序,在运营人的维修机库内会有大修需求,在国内的研发设计之初也会将它设计成 LRU,因此关于制冷组件是否确定为航线可维护件及其类别划分给出如下的两个建议结论:一是不确定为航线可维护件,将其作为顶层安装图管控,图纸中明确安装技术要求;二是确定为航线可维护件并归类为 LRU,根据逻辑判断图的其他说明中的解释,同发动机、APU、起落架一起作为大部件的 LRU 管理。这类大部件 LRU 通常在航线日常没有整体的维护维修需求,大概率会有更换需求是发生在机库内的大修任务。

表3 不同系统 LRU 的 DMC  
Table 3 DMC for LRUs from different systems

零部件名称	价格/美元	MTBUR	DMC	类型
制冷组件	233 251	10 800	6.886	LRU
压力油滤模块	17 623	31 000	0.398	LRU
水平安定面配平作动器	232 500	46 655	1.416	LRU

表 2 中各零部件试算的 DMC 结果如下表 4 所示,同时表 4 给出了权衡分析后对类别的修正及重新设计的建议。从表 4 中计算得到的 DMC 值可以分析得出定性判别为 LRU 的项目经定量权衡后可以确定为 LRU,但如果将双热交换器重新设计成初级换热器和次级换热器两个独立的 LRU,同理回热冷凝器重新设计成回热器和冷凝器两个独立的 LRU,均可以实现降低 DMC,达到了修正正向设计的需求。

表4 定性判别后的DMC试算及分析  
Table 4 DMC calculation and analysis after qualitative discrimination

层级	零部件名称	价格/美元	MTBUR	DMC	定性类别判定	定量权衡后类别修正及再设计建议
0	制冷组件	233 251	10 800	6.886	非航线可维护件	顶层安装图管控或LRU
1	<b>冲压空气转换活门</b>	15 951	237 500	0.084	LRU	LRU
2	搭接线	201	255 000	0.063	LRI	LRI
2	螺钉	86	100 000	<b>0.161</b>	LRI	非航线可维护件
2	垫片	246	140 000	<b>0.115</b>	LRI	非航线可维护件
2	螺母	54	120 000	<b>0.134</b>	LRI	非航线可维护件
1	<b>空气循环机</b>	66 016	30 400	1.071	LRU	LRU
2	涡轮	20 000	51 000	<b>1.673</b>	非航线可维护件	非航线可维护件
2	风扇	10 000	51 000	<b>1.624</b>	非航线可维护件	非航线可维护件
2	压缩机	50 000	40 000	<b>2.320</b>	非航线可维护件	非航线可维护件
2	密封垫片	3	32 000	<b>2.677</b>	LRI	非航线可维护件
2	保险丝	30	150 000	0.535	LRI	LRI
1	<b>温度控制活门</b>	8 305	31 500	0.576	LRU	LRU
1	<b>双热交换器</b>	29 763	10 800	2.176	LRU	LRU需拆分设计成两个独立LRU
1	初级换热器	21 068	68 059	0.313		<b>建议新增设计LRU</b>
1	次级换热器	27 517	22 888	1.002		<b>建议新增设计LRU</b>
1	<b>回热冷凝器</b>	19 693	142 500	0.147	LRU	LRU需拆分设计成两个独立LRU
1	回热器	16 262	166 204	0.121		<b>建议新增设计LRU</b>
1	冷凝器	25 486	153 200	0.146		<b>建议新增设计LRU</b>
1	<b>水分离器</b>	9 257	256 500	0.072	LRU	LRU
2	密封垫片	154	30 000	<b>0.537</b>	LRI	非航线可维护件
1	隔热绝热层	854	23 000	0.708	LRI	LRI
1	封圈	0.95	27 700	0.580	LRI	LRI
1	卡箍	2.7	51 000	0.315	LRI	LRI
1	保险丝	30	150 000	0.107	LRI	LRI
1	连接管路	3 913	1 000 000	0.017	LMP	LMP
1	标牌	20	65 000	0.247	LRI	LRI

同时试算了其他1级件的DMC,低于上一级件的DMC,与同级的LRU件DMC相当,可以确定为航线可维护件。也通过试算2级件的DMC,发现并不是向下拆分越细经济性越好,深度维修会导致工时和人力成本的大幅上升,导致直接维修成本出现较大增长,对于2级件的DMC明显高于上一级的DMC,就不能判别为航线可维护件,而应该是车间更换件。在航线更换车间更换件,即使从操作上没有限制,但导致DMC明显高于其上一级的DMC,因此是超经济的,不作为航线可维护件管理是比较合理和理性的选择。

通过以上算例验证,可以看出通过定量权衡模型的计算可以修正迭代航线可维护件的确定和分类结果,满足航线可维护件的正向设计需求。

## 6 结 论

1) 民用飞机实现商业运营成功,拥有市场份额,加入国际竞争,必然要从过往关注的面向研发、面向制造的设计向面向维修的设计转化,这是一个过渡的过程,最终修正正向设计会成为一款新产品开发的必要设计需求。通过本文航线可维护件确定和分类研究,展示了修正正向设计需求在产品中的实现过程。

2) 本文提出的方法解决了航线可维护件的确定和分类,为设计的修正迭代提供参考和建议,为后续维修设计活动的开展奠定基础 and 提供输入。

### 参考文献

- [1] 柏文华. 从ARJ21飞机运行实践谈对民机客户服务的几点认识[J]. 航空维修与工程, 2022(1): 22-24.

- BAI wenhua. Discussions on customer service of civil aircraft based on ARJ21 experience[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2022(1): 22-24. (in Chinese)
- [2] 苏茂根, 胡正平, 任海涛. 全生命周期的民机维修设计[J]. 航空维修与工程, 2023(2): 6-9.  
SU Maogen, HU Zhengping, REN Haitao. The full life maintenance design of civil aircraft[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2023(2): 6-9. (in Chinese)
- [3] 戚燕杰, 吕志刚, 宋笔锋. 现代大飞机的维修设计(二)[C]// 大型飞机关键技术高层论坛. 深圳: 中国航空学会, 2007: 702-706.  
QI Yanjie, LU Zhigang, SONG Bifeng. Maintenance design of modern large aircraft(2)[C]// High-level Forum on Key Technologies of Large Aircraft. Shenzhen: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2007: 702-706. (in Chinese)
- [4] 柏文华. 从产品支援到客户服务-对商用飞机客户服务的四点认识[J]. 大飞机, 2022(12): 5.  
BAI wenhua. From product support to customer service-four points of understanding customer service for commercial aircraft[J]. Jetliner, 2022(12): 5. (in Chinese)
- [5] 戚燕杰, 吕志刚, 宋笔锋. 现代大飞机的维修设计(一)[C]// 大型飞机关键技术高层论坛. 深圳: 中国航空学会, 2007: 697-701.  
Qi Yanjie, Lu Zhigang, Song Bifeng. Maintenance design of modern large aircraft(1)[C]// High-level Forum on Key Technologies of Large Aircraft. Shenzhen: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2007: 697-701. (in Chinese)
- [6] CROW L H. Methods for reducing the cost to maintain a fleet of repairable systems[C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium. Tampa, FL, USA: IEEE, 2003: 392-399.
- [7] 陈俊宇, 冯蕴雯, 郭英男, 等. 民用飞机LRU划分的两步迭代层次分析法[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)
- [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. Method of LRU design and division for commercial aircraft based on mean time to repair[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2017, 14(8): 6-7. (in Chinese)
- [9] 彭超峰. 浅谈民用飞机维修性要求中重量要求与LRU划分的关系[J]. 科技风, 2020, 20(9): 159.  
PENG Chaofeng. Discussion on the relationship between weight requirement and LRU division in maintainability requirements of civil aircraft[J]. Technology Wind, 2020, 20(9): 159. (in Chinese)
- [10] PARADA J E, BASTEN P R J I. Defining line replaceable units[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 247(1): 120-131.
- [11] 喻拿仑, 陈舒文. 基于直接维修成本的民机LRU划分层级研究[J]. 航空维修与工程, 2022(9): 46-49.  
YU Nalun, CHEN Shuwen. Research on the division of civil aircraft LRU based on direct maintenance cost[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2022(9): 46-49. (in Chinese)
- [12] 王洁莹. 民用飞机航线可维护件划分的权衡方法研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2022(4): 143-147.  
WANG Jiexuan. Trade-off method for the division of civil aircraft line maintainable parts[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2022(4): 143-147. (in Chinese)
- [13] 陈勇, 吴静敏, 左洪福. 面向全寿命周期的民机直接维修成本分析和控制[J]. 航空维修与工程, 2006(5): 24-27.  
CHEN Yong, WU Jingmin, ZUO Hongfu. Life cycle analysis and control of direct maintenance cost for civil aircraft[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2006(5): 24-27. (in Chinese)
- [14] 张胜涛, 娄寿春, 汤阳春. 维修性预计方法运用现状及展望[J]. 航空维修与工程, 2006(4): 47-49.  
ZHANG Shengtao, LOU Shouchun, TANG Yangchun. Status and expectation on the application of the methods of maintenance forecast[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2006(4): 47-49. (in Chinese)
- [15] 王勇, 马玉林, 王璟玢. 基于数据统计的元器件可靠性预计方法研究[C]// 第六届中国航空科学技术大会. 嘉兴: 中国航空学会, 2023: 1889-1893.  
WANG Yong, MA Yulin, WANG jingbin. Research on component reliability prediction method based on data statistics[C]// The 6th China Aeronautical Science and Technology Conference. Jiaxing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2023: 1889-1893. (in Chinese)
- [16] 邓婉怡. 多层多级民用飞机修理级别分析模型研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.  
DENG Wanyi. The Research of analysis model with multi-indenture and multi-echelon for civil aircraft repair level[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020. (in Chinese)
- [17] 柏文华. 民用飞机维修大纲制定的关键技术及方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
BAI Wenhua. Research on major technology and method for civil aircraft MRBR development[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [18] 贾宝惠, 向文斌, 王玉鑫. 以维修计划为中心的直接维修成本估算方法[J]. 航空维修与工程, 2013(6): 55-58.  
JIA Baohui, XIANG Wenbin, WANG Yuxin. Maintenance plan centered prediction method for direct maintenance costs[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2013(6): 55-58. (in Chinese)
- [19] 林聪, 蒋庆喜, 苏嗣哲, 等. 预防性维修任务可执行区间权衡确定方法研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6): 80-87.  
LIN Cong, JIANG Qingxi, SU Sizhe, et al. Approach for determining the workscope of the preventive maintenance tasks by considering direct maintenance cost[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(6): 80-87. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)