

基于系统工程理论的民用飞机成本问题研究

孙雨辰*

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要:

针对民机成本问题开展分析,其重要性在民用航空市场上日益凸显。由于成本的范畴广泛,关系复杂,采用系统工程的分析方法对其进行研究,捕获相关利益攸关方的需求,建立民机成本的功能模型和功能分解树,并针对“降低直接运营成本(Direct Operation Cost,以下简称DOC)”这一子功能开展具体的分析。同时,确定直接运营成本的飞机级设计需求,并将其分解至系统层级,并针对“降低燃油成本”和“降低直接维修成本”这两个具体需求开展设计、验证和优化流程与方法的探讨,为民用飞机的成本研究问题提供参考。

关键词: 民机成本; 系统工程理论; 直接运营成本; 设计验证

中图分类号: F406.72; F426

文献标识码: A

OSID:



0 引言

竞争激烈的民机市场,恰似没有硝烟的战场。主制造商(Original Equipment Manufacturer,以下简称OEM)研发的新型客机要进入市场,除了技术创新和适航安全方面与竞争对手实力比拼之外,也必然走入以市场经济为主导的市场化阶段。而民机的经济性研究范畴是指飞机的全寿命周期成本(Life Cycle Cost,以下简称LCC),其不仅包含飞机的研发制造阶段的研发成本,即非重复成本(Non Recurring Cost,以下简称NRC)和单机成本,即重复成本(Recurring Cost,以下简称RC),也包括交付运营之后与航空公司密切相关的运营成本(Total Operating Cost,以下简称TOC)和残值(Residual Value,以下简称RV)。

对于新研制的客机,其最终目标是走入航空市场,占据市场。因此对成本问题的研究,需要从主制造商和航空公司两个角度分析。主制造商期待的商业成功,其本质是飞机市场分享量超过盈亏平衡点,盈亏平衡点是单机总成本与单机销售收益持平所售

出的飞机架数。要实现该目标,则要求型号研制的研发成本和制造成本低,飞机市场价值高,好运营,在市场上受欢迎,尽可能占据潜在市场。同样,站在航空公司角度分析,其核心目标是运营盈利。因此,其选择是否购买/租赁一种新研制飞机时,也会对运营期间客运货运收入和采购、租赁、运营的总成本两者开展盈亏平衡分析,如图1所示。分析可知,航空公司盈利的需求,除了体现在对飞机航线范围广和

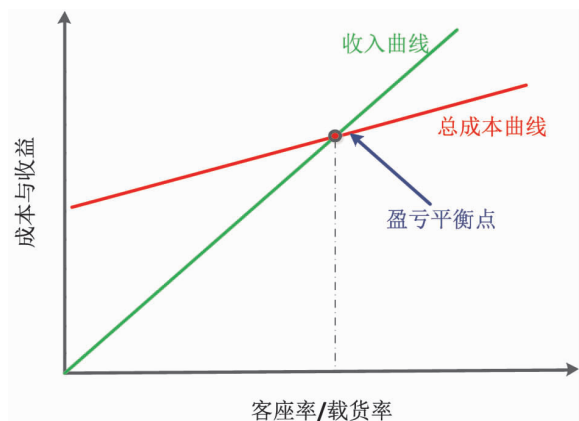


图1 航空公司盈亏平衡曲线

* 通信作者. E-mail: sunyuchen@comac.cc

引用格式: 孙雨辰. 基于系统工程理论的民用飞机成本问题研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(1):61-69. SUN Y C. The study of civil aircraft cost based on the system engineering theory[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(1):61-69 (in Chinese).

机场适应性强之外,还包括对飞机运营性能好和运营成本低的要求。由此可知,无论是主制造商还是航空公司,对市场和盈利的需求,其本质是对飞机设计、生产制造水平的要求。这也验证了为何在详细设计的末期,民机的全寿命周期成本的 95% 都已经确定。

由于民机的研发制造属于具有高度复杂性的复杂系统,同时影响民机成本的利益攸关方(Stakeholder,以下简称 SH)众多,为了梳理清晰各项成本要素对飞机设计制造的要求与其中复杂的关联,本文采取了系统工程的方法进行研究与分析。通过捕

获与全寿命周期成本相关的利益攸关方需求,把产品研制活动的目标聚焦在最大限度满足客户和利益攸关方的需要上。基于不同利益攸关方的需求分析,建立了成本的功能分解模型。并在此基础上,选取直接运营成本的功能分支为主要分析对象,对其中由飞机研制阶段决定的燃油成本和维修成本制定具体的分析、设计与验证方案。

1 民机成本相关利益攸关方需要捕获

在民用飞机研发、生产直到运营的全寿命周期内,与成本密切相关的利益攸关方如图 2 所示。

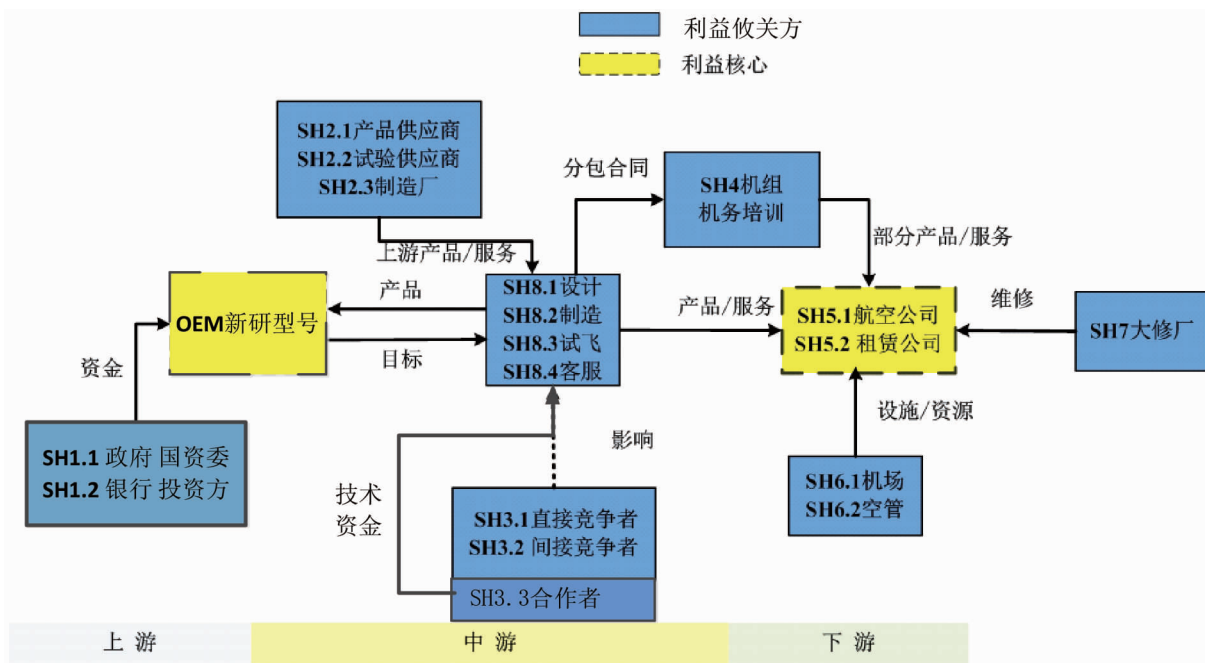


图 2 民机全寿命周期成本利益攸关方捕获

民机成本问题利益核心是 OEM 的新研型号和客户——航空公司、租赁公司。利益攸关方上游是为 OEM 提供资金的政府、国资委、银行、投资方和产品的供应商、制造厂;中游是新研型号的竞争者和合作者;下游是为客户提供培训的机构、提供维修的大修厂和提供设施资源的机场空管。基于利益攸关方的期望与外部约束条件,可以捕获出其关于成本问题的需要,如表 1 所示。

2 建立民机成本的功能模型

根据 SAE ARP 4754A 对功能的阐述,“功能是一种用户期望的产品行为,建立在对用户需求的定义之上”。因此对民机成本问题的功能分析,首先

对其进行识别和定义。不同利益攸关方对民机成本问题需要不同,在需要清单的基础上,经过筛选、取舍、合并与妥协之后,可以抽象建立民机成本的功能,如表 2 所示。

如表 2 所示,民机成本的功能较多,可以将复杂功能分解为若干个层级,构建成本功能分结树,与具体的物理方案建立关联,如图 3 所示。

成本功能树的顶层是降低飞机全寿命周期成本,增加市场竞争力。子层级的功能包括降低研发成本、降低单机成本、降低直接运营成本、降低间接运营成本和提升飞机运营性能。为了进行具体的设计研制工作,本文着重选取降低直接运营成本这一子功能开展分析。

表1 利益攸关方的需要捕获

编号	利益攸关方	需要
SH1.1	政府 国资委	新型号研制成功,实现中国梦
SH1.2	银行 投资方	占据市场,商业成功,盈利,研制花费少
SH2	供应商 制造厂	产品被认可,获取后续型号订单卖出昂贵设备,OEM付更多研发制造费零件好加工,易于生产装配,尽量采用货架产品
SH3.1	直接竞争者	占据航空市场占据客运、货运市场
SH3.2	间接竞争者	
SH3.3	合作者	型号成功,节省研发制造经费
SH4	培训	共通性、系列化、易于操作维护、培训成本低
SH5	航空公司	运营成本低(低油耗易维护)、日利用率高、故障少
	租赁公司	运营限制少、航线适应性强、易操作
SH6	机场 空管	地面保障特殊设备少、导航通讯技术先进
SH7	大修厂	故障少、易维护、维修间隔长
SH8	主制造商	设计低油耗易维护飞机、提高利用率、减少限制、合理选用新技术、降低制造成本、标准件、飞机问题少

表2 民机成本的功能

利益级关方	需要	基于成本的功能
政府、国资委 银行、投资方	实现中国民机梦,型号研制成功,飞机占据市场,商业成功,盈利	降低全寿命周期成本,提高市场竞争力,型号盈利
主制造商 合作者	型号成功,节省研发制造经费	降低研制成本(NRC)
OEM、合作者、 供应商制造厂	节省研发制造经费,零件好加工,易于生产装配	降低单机成本(RC)
用户	运营成本低(低油耗易维护)故障少、易维护、维修间隔长、易操作日利用率高、运营限制少、航线适应性强	提升飞机运营性能,降低直接运营成本(DOC)
机组机务培训	共通性系列化,易于操作维护,培训成本低	降低间接运营成本(IOC)

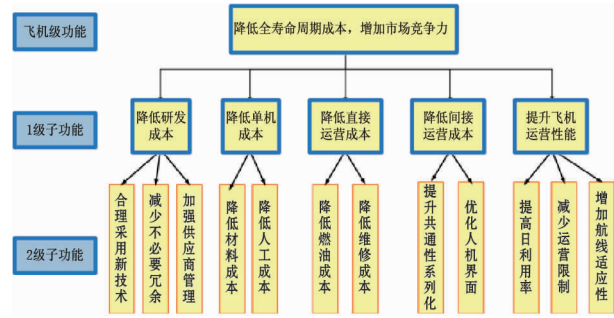


图3 民机成本功能分解树

在波音空客的设计理念中,已经将成本的设计作为型号研制的重中之重,各个研发团队都不断围绕成本开展设计优化,方案权衡。但在国内,无论是型号研制还是已有文献研究,大多仅仅是对民机运营后 DOC 的估算与分析,鲜有关于在研发制造的流程中如何通过完整的体系实现成本的设计目标的研究。因此本文在此进行具体阐述,切实将运营经济性设计指标融入设计研制流程。

开展 DOC 设计,首先要明确其功能要素。DOC 包括现金运营成本(Cash Operating Cost,以下简称COC)和财务成本,如图4所示:现金运营成本包括机组成本、导航费、着陆费、维修成本、燃油成本和地面服务费;财务成本包括飞机的折旧、利息和保险。而 COC 中对维修成本与燃油成本是完全由飞机的设计决定的,并且在直接运营成本中所占比例高达40%。因此,在新型飞机设计阶段初期,必须对这两者制定详细的设计要求。

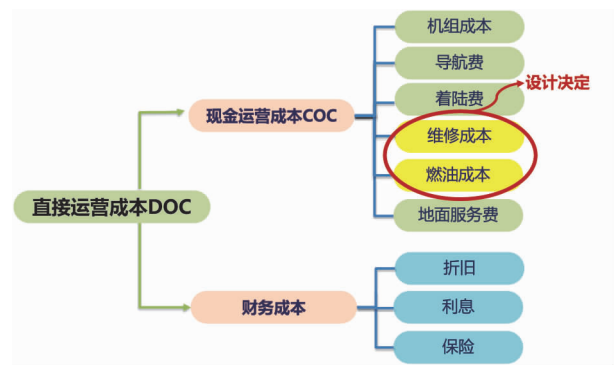


图4 直接运营成本组成

降低燃油成本和降低维修成本作为成本的2级子功能,与飞机系统设计密切相关,因而建立了其与飞机物理域的映射关系,将功能构架与物理构架相关联,如图5所示。

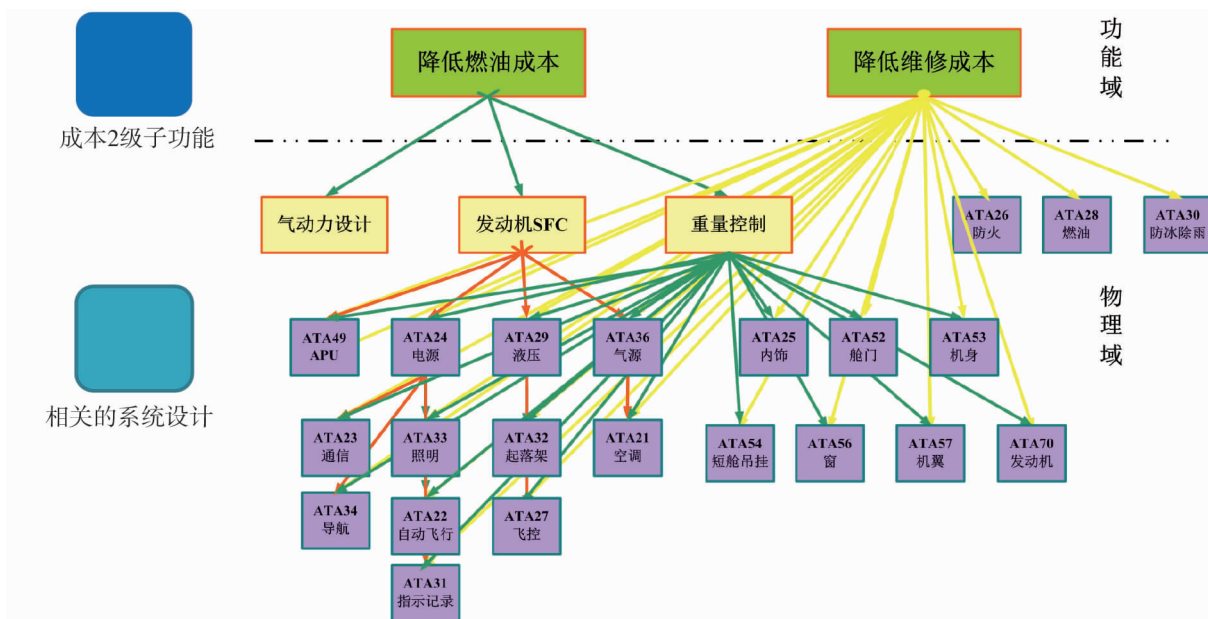


图 5 成本功能域与物理域的映射关系

3 运营成本需求分析方法

需求分析是将捕获的利益攸关方的需要和功能分析的结果转化为正式的技术需求的过程。在型号设计过程中,这是一个逐步将捕获的需要转化成市场目标与要求,形成设计目标与要求,再细化分解形成系统级设计要求的。为了开展需求分析,以

图 6 与图 7 两个具体的飞机运营场景为例,开展具体的运营成本需求分析。

场景 A 是从启动发动机到发动机关车的飞行阶段,此时运营成本的主要利益攸关方是航空公司,需求分析的输入是在飞行过程中尽可能节省燃油,经过市场目标与要求的转换,输出民用客机燃油成本的设计目标与要求。

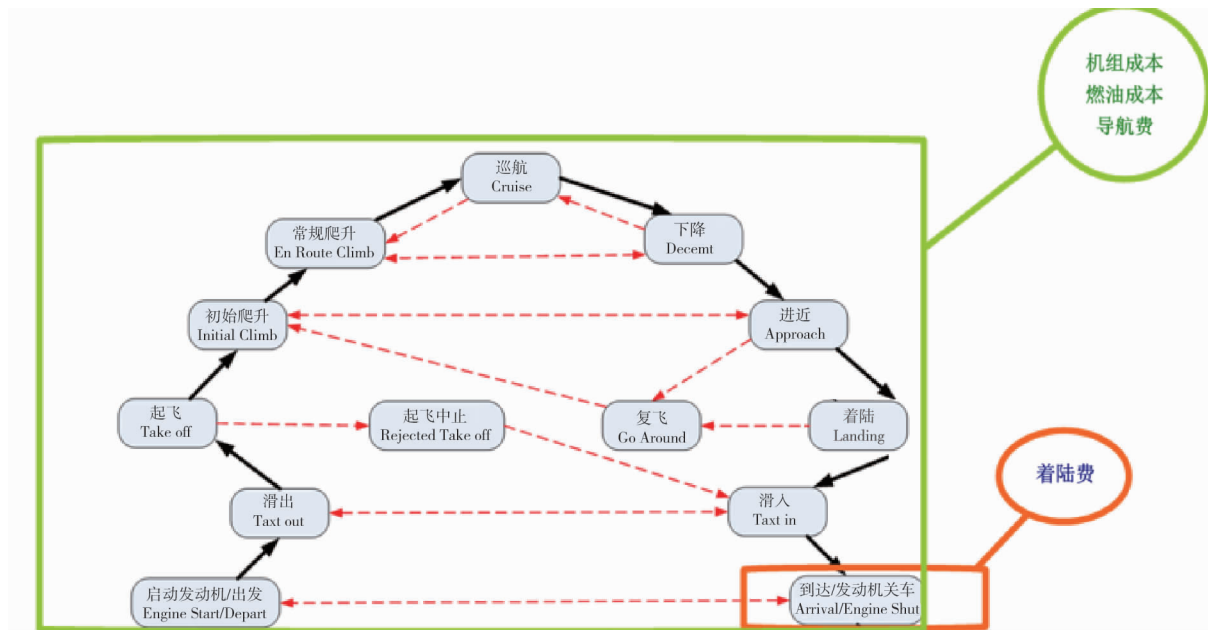


图 6 场景 A-民机飞行阶段

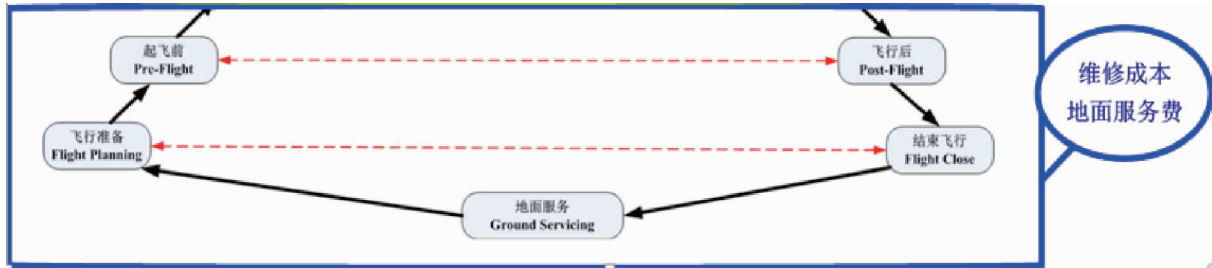


图7 场景B-民机地面维护阶段

场景B是从飞行后到起飞前的地面维护阶段，此时运营成本的主要利益攸关方是航空公司、机场和大修厂，需求分析的输入是要在飞机维护、维修成本低的情况下，经过市场目标与要求的转换，输出民用客机直接维修成本的设计目标与要求。

在此基础上，针对对标明确的竞争机型，即可制定出飞机级燃油成本和直接维修成本的设计要求值。

4 直接运营成本设计与验证流程

开展运营成本设计，其基础平台是飞机设计

方案的迭代优化，从飞机设计总体方案制定阶段、初步设计、详细设计、全面试制到试飞取证阶段，均需要不断开展经济性需求的制定与确认，将顶层指标分解至系统层级，通过设计实施并开展敏感性分析，并对设计状态进行验证，对于不满足要求的系统设计开展权衡优化设计。具体流程如图8所示。

直接运营成本设计指标源于市场需求，与飞机设计总体、系统设计方案密切相关，以下将针对燃油成本和维修成本的具体设计方法展开说明。

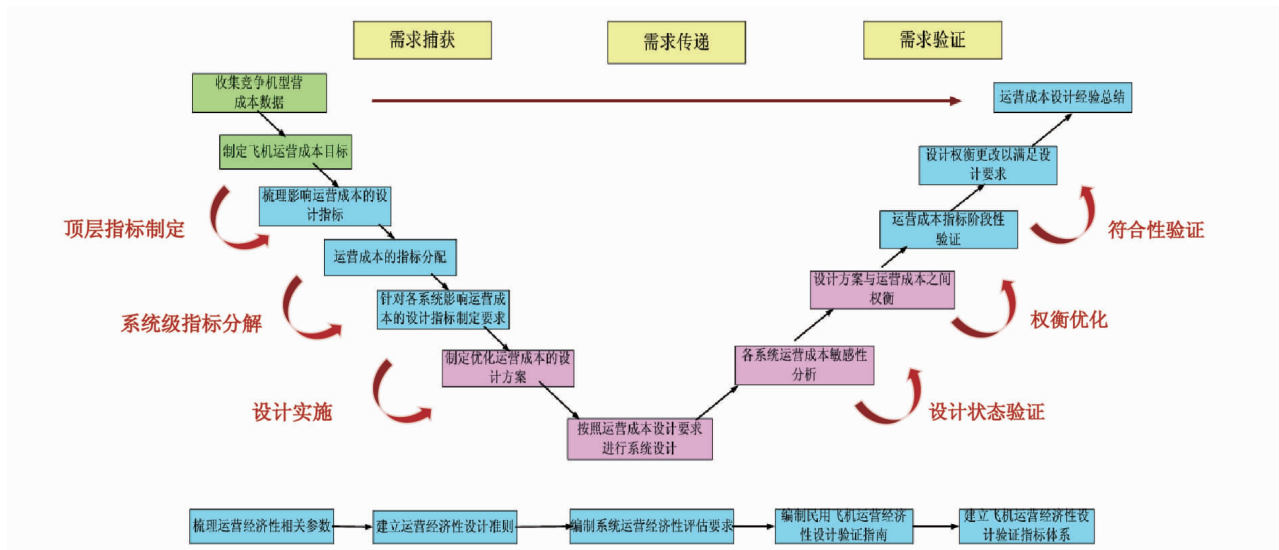


图8 DOC设计与研制流程

5 燃油成本指标设计与验证方法

燃油成本是飞机运营成本的重要组成部分之一，可占据民用飞机DOC的25%~35%。对飞机的燃油成本开展设计，首先需要将成本指标与系统设计指标建立关联，对轮挡油耗、飞机气动阻力和重量、发动机单位耗油率 (Specific Fuel Consumption, 以下简称SFC) 分别开展敏感性分析，即明确以上

设计指标变量对轮挡油耗产生的具体影响。同时引入航空煤油市场价格因子，则可建立以上飞机设计指标与航段燃油成本的函数关系。

燃油成本敏感性分析具体算法如下：

- 1) 选取某一典型航段、规定统一的备用油规则、巡航马赫数和巡航高度为计算基准；
- 2) 分别以飞机使用空重、高速巡航重量、发动机SFC为单一变量，规定变量间隔，通过性能分析

的方法计算其不同状态下轮挡油耗的数据;

3)通过对多组设计指标下的飞机轮挡油耗值进行插值分析,将设计指标与轮挡油耗建立出明确的函数关系;

4)通过该关系,可以在总体设计方案优化的过程中不断进行燃油成本的预计,判断燃油成本的设计状态是否符合设计目标的要求;

5)如果不满足,则可根据敏感性分析结果,将燃油成本设计要求转化为重量、气动阻力和发动机单位耗油率的优化设计要求。

对燃油成本的设计指标开展验证,可以通过开展试飞验证的形式进行,在新研型号飞机的研发试飞试验过程中,需要开展性能研发试飞。在此过程中可以获取按照设计假设飞行航程和备份油规则下飞机真实的油耗数据,以检验轮挡油耗的设计指标是否满足设计目标与要求的指标。若不满足,则需要开展燃油成本的优化设计工作。

燃油成本的设计优化工作,是通过上述敏感性分析过程将降成本的目标转化为减重、减阻和优化发动机 SFC 的目标,从而对表 3 中规定特定的系统开展设计优化。

6 维修成本设计验证与优化方法

开展民机维修成本设计,其顺序是按照从整机级维修成本预计到系统指标分配、系统指标预计到指标验证的过程,其过程分布于民机研制的各个阶段,具体过程如下文。

6.1 制定 DMC 设计目标与要求

在民机设计初期,必须制定合理的飞机民用飞机直接维修成本(Direct Maintenance Cost,以下简称 DMC)目标,确保研制出的飞机在市场上占据竞争优势。在制定设计目标与要求时可以首先对竞争机型的数据进行收集统计,在技术成熟的基础上,制定相比于竞争机型 DMC 降低 3%~5% 的设计目标与要求。

6.2 飞机级 DMC 预计

对飞机级开展 DMC 预计时,可按照国内外通用的 DMC 预计方法 NASA-95 法,民用飞机的总维修成本可以分为机体维修成本和发动机维修成本。机体维修成本又可细分为机体维修人工劳务成本、机体维修材料成本和机体维修均摊成本,发动机维修成本可以分为发动机维修人工劳务成本、发动机维修材料成本和发动机维修均摊成本。

在上述所有成本组成中,除去均摊成本的机体维修劳务成本、机体维修材料成本、发动机维修劳务成本和发动机维修材料成本组成了飞机直接维修成本 DMC。

6.3 系统级 DMC 设计指标分配

DMC 的分配是进行维修成本控制的关键工作,飞机制造商在完成飞机级 DMC 的估算后,应将各系统的 DMC 分解并通告该系统的设计部门或系统供应商。通过将飞机级 DMC 分配到合适的层级,直接维修成本的分配把 DMC 指标从上一个级别的指标分解到下一个级别,主要分为系统级、子系统级和部件级 3 个级别。

6.4 系统级 DMC 指标预计方法

在民用飞机 DMC 设计的过程中,最为重要的环节就是对系统级 DMC 的预计工作。航空公司的维修成本类型分为航线维修成本、定检维修成本、车间直接维修成本和送修成本。对于结构件、各系统机载设备硬件、软件,开展预计工作时,可将所有的维修任务都归类为计划维修和非计划维修。

6.4.1 计划维修成本预计

计划维修可包括航线计划维修、定检、车间计划维修任务。飞机的维修计划文件会提供系统机载设备、组件的计划维修任务,包括定时更新任务、定时检查任务和勤务工作。定时更新包括:定时恢复和定时报废。定时修复的含义包括:如果维修项目在达到维修间隔时未发生故障,则定时进行预防性维修;如果在达到维修间隔前发生故障,则进行修复性维修。预防性维修和修复性维修都能使项目恢复如新,具体任务如表 3 所示。

表 3 中每种计划维修任务成本预计方法如下所述。

1) 报废的维修成本

报废是指到达限寿时限的设备,无论是否发生故障,都将其报废并更换新件,此时:

$$DMC_{\text{报废}} = \sum (C_{\text{报废}} \times n) \quad (1)$$

$$C_{\text{报废}} = (t_{\text{更新时间}} \times C_{\text{工时费}}) + C_{\text{维修材料}} + C_{\text{新备件}} \quad (2)$$

$$n = \frac{T_{\text{寿命周期}}}{\text{报废间隔}} \quad (3)$$

2) 恢复

对于恢复任务的直接维修成本,是部件的更换、清洁到组件的修理、翻修的人工费用和材料费用,即:

表3 计划维修任务分类^[1]

类别	名称	含义
	DIS 报废	项目按照规定的寿命时限报废
定时更新	RST 恢复	把一个项目恢复到规定的标准所需要进行的工作,恢复工作包括从单一部件的更换、清洁到组件的修理、翻修
	GVI 一般目视检查	主要为检查明显损伤、故障和不正常的迹象而进行的对内部/外部、安装/组件的目视检查。这种检查除有特别说明外,都应该在触及的范围内。在检查区域,为了提高目视检查的可达性,可以采用镜子。这种检查应该在正常光照条件如日光、机库内灯光、手电筒或者落地灯等下进行。为了更好地接近检查区域,有时还需要拆开或打开检查口盖和门等,架设台架、梯子或者工作台
定时检查	OPC 操作检查	用来确定一个项目能否完成其设计功能的任务,它不需要定量的容限,是一种发现故障的工作
	FNC 功能检查	用来确定项目的一种或多种功能是否在规定限度内的定量检查
	DET 目视检查	目视检查是一种确定一个项目是否遂行其设计功能的观察工作,它不需要定量容限,是一种发现故障的检查工作
	SDI 详细检查	为了检测损伤、故障或不正常的迹象,对一个特定的项目、安装和组件进行仔细的检查
	LUB 润滑	为了保持固有设计性能而进行的各种润滑活动

$$DMC_{恢复} = \sum (C_{恢复} \times n) \quad (4)$$

$$C_{恢复} = (t_{恢复时间} \times C_{工时费}) + C_{维修材料} \quad (5)$$

$$n = \frac{T_{寿命周期}}{恢复间隔} \quad (6)$$

3) 定时检查

检查任务包括一般目视检查、功能检查、操作检查、目视检查和详细检查,其含义是指按照维修间隔定期进行例行检查,假设潜在故障或隐蔽故障发生在 $[nT, (N+1)T]$ 之间,如果发现隐蔽故障或潜在故障,则进行预防性维修,若发现多重故障或功能故障,则进行修复性维修。此时:

$$DMC_{检查} = \sum (C_{检查} \times n + C_{修复性维修} \times m) \quad (7)$$

$$C_{检查} = (t_{检查} \times C_{工时费}) \quad (8)$$

$$n = \frac{T_{寿命周期}}{检查间隔} \quad (9)$$

$$C_{修复性维修} = (t_{修复} \times C_{工时费}) + C_{修复材料} \quad (10)$$

$$m = \frac{T_{寿命周期}}{\int_{nT}^{(n+1)T} f(t) dt} \quad (11)$$

其中: $f(t)$ 是指设备的故障概率密度函数。

4) 润滑

润滑的直接维修成本是指相应人工时和润滑消耗品材料费。

$$DMC_{润滑} = \sum (C_{润滑} \times n) \quad (12)$$

$$C_{润滑} = (t_{润滑} \times C_{工时费}) + C_{润滑消耗品} \quad (13)$$

$$n = \frac{T_{寿命周期}}{润滑间隔} \quad (14)$$

6.4.2 非计划维修成本预计

非计划维修任务主要包括航线非计划维修和车间非计划维修,此外还应考虑机载软件的不定期维护。

1) 航线非计划维修成本

航线非计划维修工作是排除设备发生的故障和偏差,主要成本是排故工时费与维修消耗品费用。

$$DMC_{航线排故} = \sum (C_{排故} \times n) \quad (15)$$

$$C_{航线排故} = (t_{排故时间} \times C_{工时费}) + C_{维修消耗品} \quad (16)$$

$$n = \frac{T_{寿命周期}}{\int_{nT}^{(n+1)T} f(t) dt} \quad (17)$$

其中, $f(t)$ 是指设备出现可在航线维护的非计划故障概率密度函数。

2) 车间非计划维修

车间非计划维修成本主要包括更换航线可更换件消耗成本和换件工时费。

$$DMC_{车间修理} = \sum (C_{车间修理} \times n) \quad (18)$$

$$C_{车间维修} = (t_{换件时间} \times C_{工时费}) + C_{LRU设备} + C_{材料} \quad (19)$$

$$n = \frac{T_{寿命周期}}{\int_{nT}^{(n+1)T} f(t) dt} \quad (20)$$

其中, $f(t)$ 是指设备出现非计划故障需要进入车间换件的概率密度函数。

3) 机载软件维护

机载软件维护的直接维修成本主要包括软件升

级、维护、更新的人工成本。

$$DMC_{\text{软件维护}} = \sum (C_{\text{软件维护}} \times n) \quad (21)$$

$$C_{\text{软件维护}} = (t_{\text{维护时间}} \times C_{\text{工时费}}) \quad (22)$$

$$n = \frac{T_{\text{寿命周期}}}{\int_{nT}^{(n+1)T} f(t) dt} \quad (23)$$

其中, $f(t)$ 是指软件需要维护升级的概率密度函数。

6.5 DMC 验证方法

DMC 的验证途径包括虚拟维修验证和机上操作试验验证, 主要研制内容是预计的维修工时, 以修正维修成本预计结果。当验证后的维修成本不满足设计指标要求时, 则需要开展 DMC 的优化工作。

6.6 DMC 优化方法

在各个系统开展自下而上的维修成本预计工作时, 如果发现目前设计状态下系统 DMC 不能满足指标分解的要求, 则需要对系统 DMC 进行优化, 以下提供五种途径以供降低 DMC。

6.6.1 合理制定维修间隔

民用飞机的主制造商会向航空公司提供维修大纲、维修计划文件和通用工卡, 规定不同维修项目的维修间隔和维修任务, 维修间隔的合理性直接影响维修成本的高低。对于影响安全的维修任务, 根据项目的可靠性数据和故障率, 计算可靠性寿命, 以此作为维修间隔推荐值。对于非安全类的维修任务, 除了考虑设备的可靠性和故障率之外, 还需要综合考虑经济寿命, 在保证安全的前提下合理延长维修间隔。

6.6.2 合理进行航线可更换单元 (Line Replaceable Unit, 以下简称 LRU) 划分

LRU 是以模块化形式安装在飞机上的组件, 以便为维修人员带来方便, 使其在短时间内完成故障组件更换。LRU 单元划分是否合理, 直接对维修成本产生影响。如果一个 LRU 组件内部零件发生故障, 需要将整个组件进行分解, 增加拆装的人工成本, 因此 LRU 单元不能过大; 同时, 若 LRU 单元划分过细, 在研制时需要针对不同 LRU 进行大量试验, 会增加研制成本。此外, 在故障时, 若组件划分过细, 会导致故障定位的难度增加, 增加维修人工成本, 同时还增加了需要储存的备件数目。因此, LRU 划分应根据系统的设备状态详细分析单元的颗粒度。

6.6.3 改善维修性设计, 减少维护工时

对于民用飞机, 维修性设计的优劣直接影响设备或结构件维修工时, 尤其是对执行检查、故障定位、接近、拆装任务的时间有直接影响, 因此在系统进行维修成本优化时, 可以考虑优化设备安装位置布置, 改善维修性设计。

6.6.4 降低故障率, 减少非计划维修

在维修成本的构成中, 非计划维修占据了相当大的比例。非计划维修任务和飞机、设备的可靠性参数密切相关, 因此降低设备故障率, 从而减少设备平均非计划维修任务能够直接降低非计划维修成本。在进行系统级 DMC 优化时, 可以损坏后更换设备价格昂贵的件为主要研究对象, 通过可靠性试验、调整设备内零件与或门关系等优化方法降低设备故障率, 从而降低非计划维修成本。

6.6.5 合理设计系统可靠性冗余

考虑到系统功能可能发生的故障和结构强度的破损模式, 系统和机体结构在设计期间都会留有一定裕度, 即系统设备存在可靠性冗余, 增加备份设备或零件。这样的设计对飞行安全有利, 但必然会造成维修成本的增加。因此, 在优化系统 DMC 设计时, 可以考虑分析设备冗余的合理性, 在不影响安全和满足规章要求的基础上删减不必要的冗余设备。

7 结论

主制造商要跻身民航市场必须在成本上具有竞争力, 因为即使存在宏观政策的辅助, 也无法脱离市场规律的衡量。民机的成本问题的利益攸关方众多, 也存在众多需求。在型号的研发制造过程中, 方方面面都会对民机成本产生重大影响。在财务方面, 可以合理制定预算、把控经费使用、削减不必要开支和加强供应商管理; 在市场规划方面, 可以明确对标机型、选取市场策略、规划最优航线; 在设计研制方面, 可以通过设计优化油耗、降低维修成本、提高飞机共通性、减少不必要系统冗余、合理规划试验节约研发成本; 在生产制造方面, 可以优化工艺、减少制造工时、接口标准化以降低制造成本, 等等。民用飞机型号成功的标志, 就是占据市场, 在成本问题上占据优势, 是提升飞机的市场竞争力的主要途径。因此, 针对民机的成本问题的研究工作仍需持续深入开展。

参考文献:

- [1] Guidelines for development of civil aircraft and systems: SAE ARP4754A-2010[S]. [S. l. :s. n.],2010.
- [2] Systems and software engineering System life cycle processes:ISO 15288:2008[S]. [S. l. :s. n.],2008.
- [3] 贺东风,赵越让,钱仲炎. 中国商用飞机有限责任公司系统工程手册[M]. 上海:上海交通大学出版社,2016.
- [4] 李晓勇,叶叶沛,李晨. 商用喷气式飞机 DMC 分析模型应用研究[J]. 民用飞机设计与研究,2012(2):22-27.
- [5] 王国华. 航空公司飞机维修成本及其控制[J]. 中国制造业信息化,2011(23):79-84.
- [6] 张鑫磊. 飞机维修 LRU 元模型及其实现[D]. 天津:中国民航大学,2015.
- [7] 曹锋,金海波. 民用复合材料维修成本评估模型研究[J]. 江苏航,2012(3):24-27.
- [8] 商桂娥,杨瑾. 民用飞机直接维修成本分析与控制[J]. 产业与科技论坛,2015(11):225-226.
- [9] 吴静敏. 民用飞机全寿命周期维修成本控制与分析关键问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
- [10] 朱一凡,李群,杨峰,等. NASA 系统工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2012.

作者简介

孙雨辰 女,硕士研究生,工程师。主要研究方向:系统工程,运行概念,民机成本。E-mail: sunyuchen@comac.cc

The study of civil aircraft cost based on the system engineering theory

SUN Yuchen *

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

Abstract: The importance of the cost issue in aviation market is growing day by day. Thus, the cost is analyzed adopting the system engineering analysis methods due to its complexity. Different needs from different stakeholders are captured to form the functional model and decomposition tree of civil aircraft cost. In addition, the specific analysis of the sub-function “decrease the Direct Operation Cost (DOC)” is carried out. The DOC design requirements in aircraft level are obtained and divided into system level. Design, verification and optimization processes and methods are derived for two concrete requirements, “decrease fuel cost” and “decrease direct maintenance cost”. The study would provide useful reference for the research of civil aircraft cost issue.

Keywords: civil aircraft cost; system engineering theory; Direct Operation Cost; design and verification

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