

航空发动机直接维修成本预计研究

Direct Maintenance Cost Prediting for Aero Engine

■ 蔡旭 刘武 张祥 / 中国航发动研所

民用航空发动机研制的目标是寻求费用、性能、进度和可靠性、维修性等多种要求的综合最佳组合。用户（航空公司）将发动机使用经济性作为飞机和发动机选型的重要依据。控制和降低发动机直接维修成本（DMC）是航空发动机设计时的重要目标之一，也是客户选型的关注焦点之一，直接决定了民用航空发动机在市场上的竞争力。

航空发动机直接维修成本是航空发动机运营中的测试、维修、大修和报废情况下进行更换的材料成本和人工成本的总和，属于飞机直接运行成本的重要组成部分。要科学掌握发动机运营维护成本，研发出DMC可控的航空发动机，就需要尽快建立DMC预计方法体系，通过收集、整理发动机大修实际成本，与DMC预计模型测算成本差异进行对比分析，探索建立符合我国发动机研制及维修实际水平情况的DMC预计模型。在满足飞机方要求的同时，制定发动机维修性成本控制策略，为研制出低维护成本的先进航空发动机提供行之有效的手段和工具，引导发动机设计不断更新迭代，降低运营维护成本。

航空发动机DMC概述

航空发动机DMC与制造成本、发动机运行的可靠性、平均修理费用（包括计划和非计划维修）、平均测试费用等因素有关，如图1所示^[1]。直接维修成本和间接维修成本构成了航空发动机的总维修成本。根据发动机具体的维修情况，其中直接维修成本又可分为基地维修成本和发动

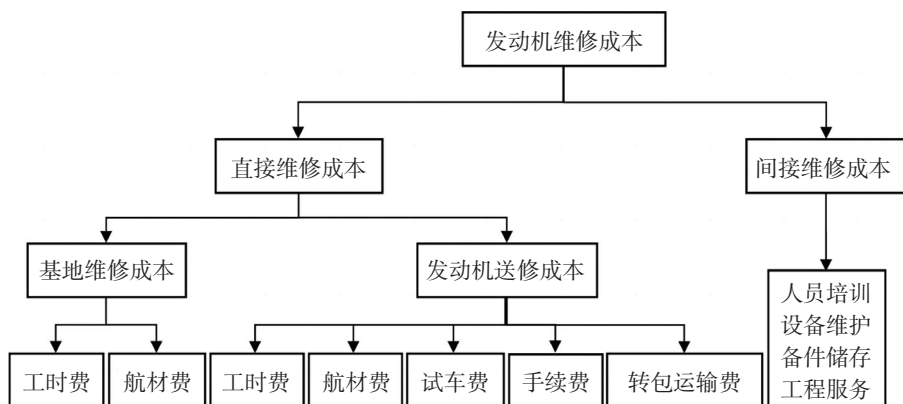


图1 航空发动机维修成本划分

机送修成本。基地维修成本主要包含航线维护和定期检查，航线维护一般指的是由航空公司的维修人员就能够完成、不需要返厂进行的维修，其成本主要包括人工成本以及材料成本；定期检查指的是在维修基地进行的工作，其成本主要包括人工成本以及材料成本。发动机送修主要指发动机返厂大修，其成本主要包括维修过程中的人工成本、材料成本、试验成本、运输成本以及转包维修费等。

目前，面对国内外激烈的市场竞争和新冠疫情的冲击，航空公司增加收入的空间变得越趋狭窄，成本控制对航空公司运营的重要性也

随之进一步凸显。由于发动机的每一次返厂大修的维修费用都接近甚至超过百万元，因此通过优化维修成本来降低运营的总成本，从而提高盈利水平，已成为越来越多航空公司的共识。加之DMC具有很好的直观性和可控性，不少航空公司甚至将其作为购买发动机时选择机型的重要依据。目前国际知名飞机制造商如波音、空客和庞巴迪公司等，都开始对全生命周期内的DMC进行合理的分析及有效的控制，在航空发动机研制过程中就严格控制DMC，尽可能地通过降低DMC来提高产品竞争力。

国际上关于民用航空发动机

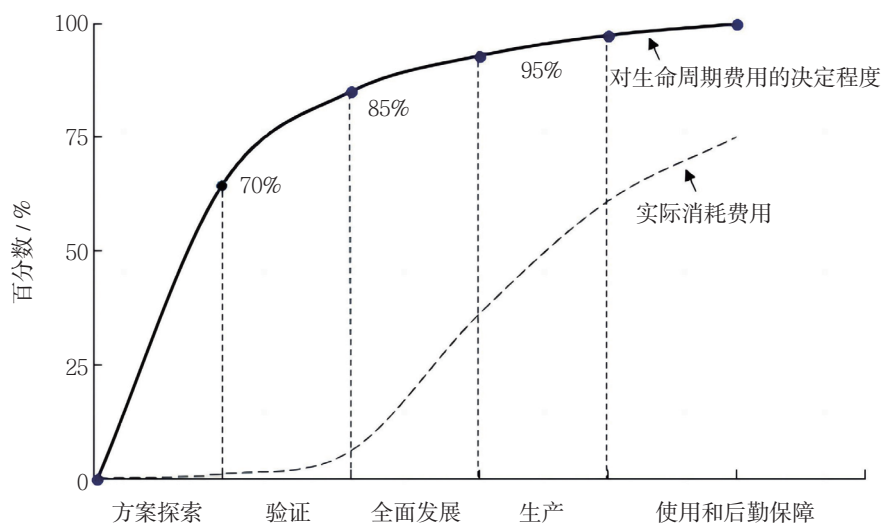


图2 发动机各阶段成本和各阶段对成本的决定程度示意

DMC分析的研究已非常深入,并形成了一系列的成果和方法。以波音和空客公司为例:波音公司将部件的DMC分为计划拆卸人工时费、计划拆卸材料费、非计划拆卸人工时费和非计划拆卸材料费等4个部分,通过对这4个部分的分别约束,实现对发动机整体DMC的有效控制;空客公司根据部件的可靠性、维修性,预计DMC,通过统计相似部件的平均故障间隔时间、平均修理费用和平均测试费用等数据,得到部件DMC预计模型,并且有效地应用在设计研发工作中,利用模型测算数据提供设计迭代改进思路,从而降低发动机的DMC^[2]。

目前我国对民用航空发动机的运营维护还处于早期阶段,缺少对运营维护成本,特别是DMC的分析和预计,既无法获得空客公司DMC预计方法中的相似部件的参数,也没有波音公司的成熟的DMC预计模型可用。

据统计,一型成熟的长生命周

期的发动机研发、试验、生产、使用各阶段在全生命周期费用占比如图2所示,其中研制成本占比较低(一般不超过10%~15%),使用成本占比超过60%以上,而且随着使用周期增加,使用成本占比也随之增长^[3]。发动机使用阶段的成本由批生产前的研制阶段决定,发动机取证交付使用后难以开展使用成本降低相关工作。因此,如果要有效降低一型发动机的全生命周期成本,就要特别关注使用成本的控制,在研发阶段便组织开展发动机使用、维护和修理方面成本的评估、优化工作,尽早地改进、优化影响使用成本的设计因素。

总体思路

为提升航空发动机产品市场竞争力,进一步控制并降低发动机使用成本,开发一套适应我国自主研发的航空发动机DMC预计模型,可为发动机研制过程中的设计迭代优化提供依据和方向,本文提出了如下的DMC

预计研究总体思路。

一是以国际上成熟的理论为主要参考,选择合适的方法,建立适应国内条件的DMC预计评估模型。

二是收集、整理一型我国自主研发的批产发动机大修的数据,形成发动机修理策略与成本模型,获得发动机全生命周期大修成本初步评估结果。

三是将发动机修理结果通过DMC预计的评估模型进行计算,验证发动机DMC成本模型的合理性及正确性,与国外同级别发动机的DMC进行对比分析,为优化发动机修理成本策略和发动机使用维护的经济性分析提供参考。

四是通过比对DMC预计模型和实际大修数据,识别出发动机DMC高点,提供优化发动机设计的思路,从而降低发动机全生命周期内DMC值,提高发动机经济可承受性。

内容和流程

现有的DMC控制主要采用逐级分配的方法,即将期望的DMC值逐级向下分配给各系统、子系统级部件,具体表现为飞机将期望的DMC值逐级分配给发动机、各机载产品和飞机部件等,发动机和机载产品需要对自身的DMC值进行预计,并对预计值与飞机给出的目标值进行评估,同时将DMC值分配至下一级的部件和成附件,指导设计的改进和迭代。

DMC预计是在研制中根据部件和成附件的设计情况推测的整机DMC值,与维修成本的分配相辅相成,是设计阶段维修成本目标管理中最为关键的步骤之一,直接决定着维修成本控制的成败。DMC预计分析必须与发动机设计、市场及客

表1 发动机DMC预计方法和模型

名称	主要开发背景	特点	适用阶段
利贝克方法	该方法由利贝克在1995年发表的研究报告《先进亚声速飞机设计与经济研究》(NASACR-195443)中提出,用于飞机构型优化分析	发动机维修成本由维修劳务成本、维修材料成本及维修管理成本三部分组成;维修成本基于发动机制造商提供的数据	适用于批生产后,需要详细维修数据支撑
欧洲1998年方法	1998年左右由欧洲开发,AE100项目开发及使用的分析方法	发动机的维修成本由维修劳务成本和维修材料成本组成;基于实际维修数据统计分析	适用于批生产后,需要详细运营和维修数据支撑
AEA 2009年方法	AEA2009年方法是由欧洲航空协会(AEA)开发的,用于飞机和发动机竞争分析和构型优化	发动机的维修成本由维修劳务成本和维修材料成本组成;基于发动机设计数据预计	适用于型号早期阶段,并可对研制优化
哈里斯方法	该方法出自哈里斯在2005年发表的《美国航空公司运营费用的经济模型》(NASACR-2005-213476)研究报告,该模型基于对67家美国航空公司的运营数据的回归分析,适用于对现役机队进行经济性分析	飞机的维修成本由机体维修成本(AMC)与发动机维修成本(EMC)之和组成,统计已有维修数据得出	适用于发动机运营后的成本分析

户服务同步协调进行,需将各阶段的DMC分析进行全面规划、统筹安排。整个DMC预计分析工作需要不断迭代,逐步达到最优。研发阶段的DMC预计分析的主要流程如图3

所示。

方法和模型

目前国际上主要的发动机DMC预计方法和模型均由欧美航空发动机公司

开发,结合型号研制使用完善。主流的DMC分析方法有4种,分别为利贝克(Liebeck)方法、欧洲1998年方法、AEA2009年方法和哈里斯(Harris)方法,各种方法的特点和优劣详见表1。

由于我国涡轴发动机的运营和维修尚处于起步阶段,同时也难以获得国外涡轴发动机的维修实际数据,利用欧美有关发动机DMC的分析方法,建立基于国内实际维修成本水平的发动机DMC预计方法和模型就成为了一种现实的路径。

4种主要的DMC分析方法中,利贝克方法、欧洲1998年方法和哈里斯方法主要适用于批生产后开展分析,AEA2009年方法适用于

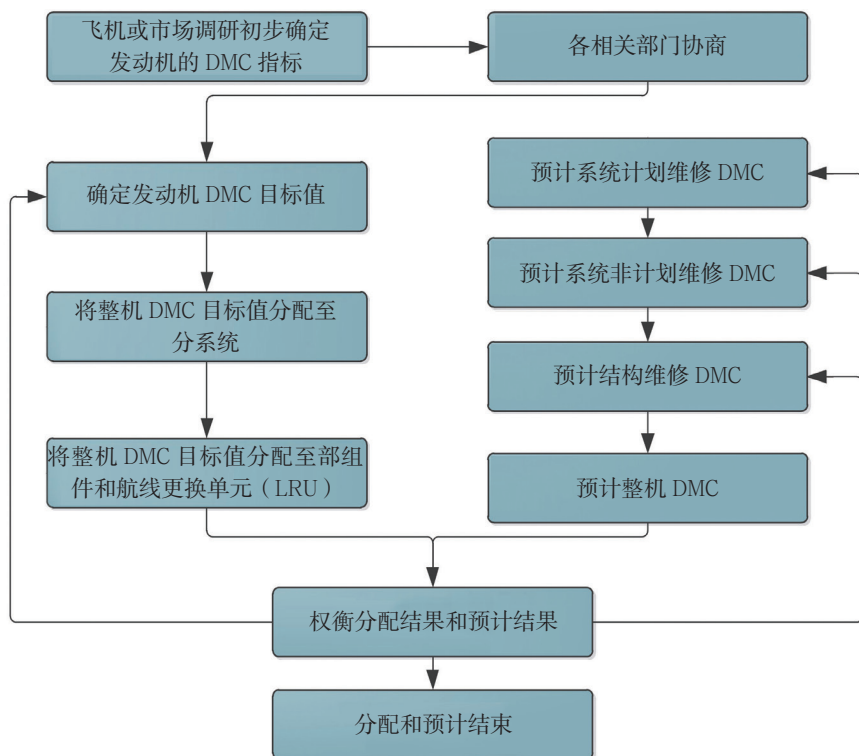


图3 发动机研发中DMC分配和预计的主要工作流程^[3]

表2 涡轴发动机全生命周期内大修总费用统计

修理次数	金额/元
一修平均	2206031.50
二修平均	5858061.00
总费用平均	8064092.50

表3 涡轴发动机的DMC模型统计结果及对比

机型	使用情况	DMC模型计算值/ (元/FH)	实际修理成本估算值/ (元/FH)
国产涡轴发动机	≥10年(已大修)	1765.28	2688.10
阿赫耶2C	≥10年(已大修)	—	1829.10
CT7-8A	4年(未大修)	2383.20	—
PT6C-67C	2年(质保期内)	—	1740.00

注：考虑到不同机型的运营情况，赛峰集团阿赫耶2C的DMC按照EC155直升机的实际DMC计算值的30%估算，GE公司CT7-8A的DMC按照S92的计算值的30%估算。

型号研制早期评估，比较符合我国航空发动机研制现状。因此，本文在进行DMC分析方法预计研究、建立DMC预计模型时主要参考了AEA2009年方法。

DMC预计模型的初步应用

基于国内航空发动机研发和运营条件，本文将欧洲航空协会中提出的发动机维修费用估算模型(AEA2009年方法)根据设计流程进行适用性简化，同时按照发动机的技术特点进行优化^[5]，得到DMC预计模型：发动机的维修成本由维修劳务成本和维修材料成本组成；维修劳务成本基于设计数据预计，综合考虑维修人工费率、输出功率和大修寿命的修正系数；维修材料成本综合考虑总压比、模型修正系数和修理成本的修正系数。

以我国的一型自研涡轴发动机为例，经实际统计，该涡轴发动机实际DMC的值为8064092.50元，见表2。按照DMC的统计范围，根据发动机具体的维修情况又可以分为航线维护、定期检查和发动机返厂大修，考虑到用户的航线维护和定期维护成本为以飞机整体计算，结

合目前掌握的主要数据，目前计算发动机的DMC仅考虑发动机全生命周期内的正常返厂大修。以大修总费用为依据，仅考虑发动机大修成本，以发动机全生命周期内的大修成本除以发动机寿命得出DMC为2688.10元/飞行小时(FH)。

按照各项技术性能参数和各项维修成本，根据上述发动机整机的DMC预计模型计算，该发动机的DMC预测值为1765.28元/FH，结合本机型和另外3型成熟的涡轴发动机的DMC统计值来对预测结果进行分析和对比(见表3)，以验证预测模型的合理性与准确性。

该型国产涡轴发动机的DMC模型估算值为1765.28元/FH，实际DMC为2688.10元/FH，高于模型估算值及另外3型发动机的统计值，主要原因是发动机的实际修理成本偏高，特别是二修的成本超过一修成本的2倍以上，造成整体修理成本偏高；国内涡轴发动机的整机寿命和返修期等指标低于国外同水平的涡轴发动机，导致实际的DMC值较高。

结束语

对标各国际领先的发动机厂商的

DMC值来看，国产发动机的直接修理成本控制水平与国际先进水平还有差距。结合国内中小型民用航空发动机研制现状，DMC较高的原因主要为两个方面，也是可以突破维修成本控制瓶颈的发力点：一是虽然近几年“成本是设计出来的”这一理念深入人心，但在实际工作中尚未建立规范、系统的数据积累机制，导致项目研制及维修、运营过程中的过程数据缺乏，设计人员无法获得相关成本的具体数据，在研制阶段无法全盘考虑各项成本，致使项目研发团队暂不具备实现项目全生命周期成本滚动管理的能力；二是应用模型和工具缺乏，关于DMC研究起步较晚，DMC的计算模型和相关计算软件还有待完善，相关计算不仅过程困难，结果准确度也不高。

航空动力

(蔡旭，中国航发研研所，高级工程师，主要从事航空发动机维修保障研究)

参考文献

- [1] 李晓勇.商用喷气式飞机DMC分析模型应用研究[R].上海飞机设计研究院,2012.
- [2] 徐建新.基于Adaboost的飞机部件DMC预计方法研究[R].中国民航大学,2015.
- [3] 王洁莹.CXF飞机直接维修成本分析方法[R].中国商用飞机有限责任公司,2021.
- [4] 李彦明.新舟700飞机DMC分析[R].中航飞机西安飞机分公司,2015.
- [5] 况开鑫.民用涡轴发动机全寿命经济性分析方法[R].中国航发湖南动力机械研究所,2020.