

军用航空发动机装备经济可承受性研究综述

郑 玲

(中国航发贵阳发动机设计研究所, 贵阳 550081)

摘 要: 经济可承受性已成为评价军用航空发动机技术水平高低的关键指标,对航空发动机全寿命周期成本控制影响很大。论述了装备经济可承受性的基本概念和主要内容,阐述了国内外军用航空发动机经济可承受性的研究现状,重点分析了业内在提升军用航空发动机经济可承受性方面所采取的加强需求引导、重视早期成本估算、设计过程成本优化、提升研制效费比、降低研制风险等措施,并针对我国军用航空发动机经济可承受性的发展提出了若干建议。

关键词: 航空发动机;经济可承受性;全寿命周期费用;成本估算;费用作为独立变量;成本优化

中图分类号: V37 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2021) 06-0056-05

Review of equipment affordability for military aero-engine

ZHENG Ling

(AECC Guiyang Engine Design Research Institute, Guiyang 550081, China)

Abstract: Equipment affordability has become a key indicator to evaluate the technological level of military aero-engine, which has a significant impact on the cost control of aero-engine throughout its life cycle. The basic concept and main content of equipment affordability were discussed, and the research status of domestic and foreign military aero-engine affordability were expounded. The measures taken by the aero-engine industries in improving the economic affordability of military aero-engines, such as strengthening demand guidance, paying attention to early cost estimation, optimizing the cost during design process, improving the efficiency cost ratio of development, reducing development risks and so on, were analyzed emphatically. Some suggestions were put forward for the equipment affordability development of military aero-engines in our country.

Key words: aero-engine; affordability; life cycle cost; cost estimation; cost as an independent variable(CAIV); cost optimization

1 引言

随着航空技术的进步和空战模式的变化,未来战争对空中作战平台的作战能力提出了更高要求。军用航空发动机作为各类空中作战平台的动力装置,为有效支撑空中作战平台在强对抗作战环境获得空中优势,需要采用大量先进技术不断提升发动机的性能水平。然而大量新技术的引入,在带来航空发动机结构复杂的同时,也会导致发动机全寿命

周期费用(LCC)攀升。此外,航空装备不仅需要保持性能优势,也需要保证一定的装备数量,而航空发动机过高的成本将严重阻碍高性能航空装备的大量部署和长远发展,更无法适应装备高消耗的未来战争。为此,以美国为代表的西方航空发达国家,开始把经济可承受性作为评价航空发动机设计水平高低的关键指标,要求发动机在设计开发过程中,在追求性能的同时也要充分考虑装备的经济性,确保全寿命周期内成本可控。

收稿日期: 2021-05-12

作者简介: 郑 玲(1973-),女,四川成都人,高级会计师,硕士,主要从事财务管理、管理会计运用等工作,在装备经费管理、经济性分析和目标价格控制等领域有深入研究。

本文阐述了军用航空发动机装备经济可承受性的内涵、主要内容和研究现状,总结分析了业内在提升军用航空发动机经济可承受性方面所采取的措施,并结合国内实际,提出了我国在航空发动机装备经济可承受性发展方面应实施的举措。

2 经济可承受性内涵及研究现状

2.1 经济可承受性内涵

经济可承受性概念起源于美国。冷战结束后,美国防务预算大幅消减,为降低装备成本,美国先后开展了定费用设计、全寿命周期费用等工作,将建设经济可承受性的国防提升到战略高度。根据美国国防部《国防采办指南》,经济可承受性定义为采办项目的全寿命周期费用与国防部或国防部各部门的长期投资和部队结构计划协调程度的度量^[1]。在《国防采办指南》中,美国国防部明确要求:国防项目的里程碑决策者在每个决策点上都要考虑经济可承受性,重大国防采办项目和重大自动化信息系统项目在里程碑B和C必须进行经济可承受性评估。经济可承受性作为装备研制的重要指标,在各国大力推动下逐步成为各类新型航空装备发展计划或项目的重要研究方向之一。

根据美国国防部采办管理要求,经济可承受性包括经济可承受性考虑、经济可承受性评估、全额资助、费用作为独立变量(CAIV)4个方面:

(1) 经济可承受性考虑。

经济可承受性考虑在整个联合能力集成与开发系统(JCIDS)需求过程中能力需求识别方面发挥着重要作用。经济可承受性是确定关键性能参数(KPP)、能力开发文件(CDD)、能力生产文件(CPD)等方面的一部分。

(2) 经济可承受性评估。

经济可承受性评估的目的是证明项目的预计资金和人力需求符合现实需要且是可实现的。美国国防部《国防采办指南》确定了2种方法来实施经济可承受性评估,即项目年度资金计划分析和基于全寿命周期费用或其他类似计划的单位成本比较。

(3) 全额资助。

美国国防部的一项政策是,所有的国防采办项目都需寻求全额资助。对于里程碑B的主要国防采办项目(MDA),里程碑决策机构(MDA)必须以书面形式向美国国会证明该项目在未来几年国防计划(FY-DP)内获得了全部资助。项目资助不稳定是项目过

程成本、进度和效益不稳定的三大原因之一。

(4) 费用作为独立变量。

费用作为独立变量是美国国防采办项目用于获得和实现经济可承受性的方法。该方法是基于设定积极的、可实现的全寿命周期费用目标,并对这些目标进行必要的性能和进度权衡的方式来实现经济可承受性的目的。费用目标需综合权衡采办项目任务需求与年度预计资源,也需考虑美国国防部和工业界预期的流程改进。

2.2 研究现状

2.2.1 国外研究现状

经济可承受性概念一经提出,就引起了广泛关注。世界主要航空强国均已着力在武器装备采办过程中积极推进经济可承受性工作。美国相继在F-35战斗机、B-21远程轰炸机等重大装备项目中明确提出经济可承受性指标要求。在航空发动机研制领域,在发动机初始设计阶段就已将经济可承受性考虑其中,将其与研制周期、发动机技战术指标置于同等重要的地位。俄罗斯留里卡设计局在研制AL-41F发动机时提出,该型号的全寿命周期费用应比上一代的AL-31F发动机低25%^[2];法国更是将M88-2发动机项目全寿命周期内的经济可承受性作为该项目成功与否的评价指标。为了在航空发动机中贯彻经济可承受性的理念,GE公司开发了一套具有人工智能技术的辅助费用估算程序ACE,而后又将智能化的费用估算方法继续进行改进,形成了COMPEAT[®]模型^[3];普惠公司开发了EAGLE全寿命周期费用分析模型^[4],作为评价先进技术发动机全寿命周期费用的基础;罗罗公司发起了旨在建立费用计算能力的DATUM项目^[5],以支持产品研制周期内的设计决策;俄罗斯也开发了含有9个发动机费用估算模型及计算机程序的航空发动机经济分析评估软件。

2.2.2 国内研究现状

受发动机技术及产品落后的影响,我国在航空发动机装备经济可承受性方面普遍缺乏深刻的认识和充分的研究。航空工业发展研究中心是我国最早开展航空发动机经济可承受性研究的机构之一,已建立了发动机成本数据库,开展了发动机成本费用估算方法研究等工作^[6];国防科技大学基于CAIV方法建立了发动机性能与总拥有费用的综合权衡模型框架,可用于发动机设计参数与费用的决策^[7];中国航发商用航空发动机有限责任公司利用多元线性回归理论建立了参数法成本估算模型,可

用于对项目研制早期费用的快速估算^[8];中国航发湖南动力机械研究所根据航空发动机经济可承受性的定义,建立了涡桨发动机方案阶段的经济可承受性技术指标体系和全寿命周期费用指标,研究了涡桨发动机全寿命周期费用估算方法^[9];中国航发沈阳发动机研究所也针对航空发动机研制费用的测算模式、测算方法、测算流程及影响因素等做过研究分析^[10]。总体看,国内在航空发动机经济可承受性研究方面多停留在理论分析和概念阶段,工程应用研究相对缺乏。

3 军用航空发动机装备经济可承受性提升路径

经济可承受性概念革新了航空发动机使用、研制等人员对航空发动机全寿命周期费用控制的认识,经济可承受性业已成为航空发动机发展战略中的重中之重,为此采取了多种措施迎接其带来的挑战。

(1) 制定战略规划,加强对发动机经济可承受性的需求引导。

军用航空发动机经济可承受性,可以追溯到1988年由美国各军兵种联合发起的“综合高性能涡轮发动机技术”(IHPTET)计划。该计划从第二阶段开始将经济可承受性纳入到概念发动机的研究中,目标是通过IHPTET计划技术研究,将发动机经济可承受性达到基准发动机的3倍以上^[11]。在IHPTET计划后,出于战争经济性、可持续性、高战争能力储备以及维持经济强势战略考虑,美国又实施了“多用途经济可承受先进涡轮发动机”(VAATE)计划,力图将发动机经济可承受性达到基准发动机的10倍^[12]。VAATE计划中,航空发动机的经济可承受性为推进能力与全寿命周期费用之比,其中推进能力用单位油耗下的推重比(功重比)来衡量。2016年,美国军方与工业界又启动了“支持经济可承受任务能力的先进涡轮技术”(ATTAM)计划^[13]。在该计划中,美国延续了对发动机低成本目标的要求,继续将强经济可承受性作为项目的重要研发目标。

总结美国三大国家级航空发动机预研计划,IHPTET计划从最初单纯追求发动机性能的提高,到将经济可承受性纳入技术研究当中的尝试,再到着眼于降低发动机采购成本和使用成本的VAATE计划的实施,直至最新的聚焦于支撑任务经济承受能力的ATTAM计划,美国通过将经济可承受性纳入国家层面的装备需求,不断地赋予发动机新的能力,在保持其在航空发动机技术领先的同时,也促进了航

空发动机装备经济可承受性的提升。

(2) 重视成本估算,加强对项目早期的经费测算。

成本估算是型号成功的重要保障。美国F-35战斗机项目虽然在研制早期就贯彻了经济可承受性理念,但时至今日该项目成本严重超支,其主要原因之一就是设定项目基线时对经费估计过于乐观^[14-15]。另外,“全球鹰”无人机项目也存在类似问题。因此,在航空发动机立项论证或设计早期设定项目经费基线时,对研制经费需求进行快速和准确的估算非常重要。常用的成本估算方法主要有参数化法、工程费用法、类比法和仿真模型法等^[16]。兰德公司曾以几十型发动机数据为基础,采用多元线性回归理论建立了用于估算涡喷/涡扇发动机研制费用的成本估算模型,现已广泛应用于军方采办项目^[17]。F135发动机采用以工作分解结构(WBS)为基础,再在部件或零件级别上使用参数法来实现经费测算^[12]。此外,为加强国防采办项目成本控制,实现对项目早期的经费管控,美国国防部也先后发布了5000.73指示《成本分析指南与程序》、《使用与保障成本估算指南》、《备选方案分析成本估算指南》、《国防部成本估算指南2.0》等文件,用于指导采办项目的成本估算工作。

(3) 纳入设计指标,加强对发动机设计过程的成本优化。

航空发动机的设计对发动机全寿命周期费用有着重大影响。航空发动机在立项论证阶段结束时做出的决策,对全寿命周期费用的影响程度达到70%,到初步设计结束时的影响程度达到85%,到详细设计及研制阶段结束时的影响程度达到95%^[18-19]。美国国防部在1975年发布的指令DoD5000.28中,就已把成本视为与技术指标、研制进度同等重要的限制条件^[20]。20世纪90年代,鉴于传统的定费用设计在全寿命周期费用控制方面存在着局限性,美国军方又提出了CAIV方法,来实现对装备采办费用的管理。CAIV的核心思想是强调将成本作为发动机设计过程中的输入而非输出,在发动机新项目发展中必须及早实施发动机性能指标和经济可承受性之间的权衡,以达到控制和降低航空发动机全寿命周期费用的目标^[21-24]。CAIV方法对降低航空发动机研制和论证阶段费用带来了深远的影响,是航空发动机实现经济可承受性的基础技术之一。此外,价值驱动设计作为另外一种发动机设计过程中的成本优化方法,也被纳入到航空发动机经济可承受性的研

究视线。此方法为工程设计提供了设计参数到产品外在价值的映射,使得工程设计活动更加具有实际意义。罗罗公司基于价值驱动设计方法,完成了涡轮前温度设计、风扇叶片选材等研究工作^[25-27]。

(4) 创新研制手段,提升发动机研制项目实施的效费比。

航空发动机全寿命周期经济可承受性的实现,不仅与发动机本身的技术相关,而且与研制过程中的研制手段也分不开。先进的研制手段,尤其是航空发动机仿真技术,不仅可以大大减少发动机试制台份、试验次数从而降低发动机研制费用,也可以大幅提升航空发动机的研制效率。20世纪80年代后期,鉴于传统串行设计方法在航空发动机早期设计过程中存在的优化设计和制造局限性,世界主要航空发动机研制厂商开始尝试应用新的工程研制方法。如普惠公司在F119发动机研制中采用的并行工程方法^[28],这种方法在设计阶段就尽可能地考虑产品全寿命周期可能出现的所有问题,有效保证了型号设计、试制、试验等的一次成功,大大节省了发动机研制费用。伴随着人工智能、大数据等新一代信息技术的发展,航空发动机的研制方式正在发生巨大变化。GE公司积极在发动机领域实施数字孪生技术,不断向数字化企业迈进;罗罗公司提出“智慧发动机”概念,积极推动人工智能和大数据技术与发动机深度融合。

(5) 重视技术继承,降低发动机项目研制风险。

航空发动机的研制途径通常包括改进改型、派生发展和全新研制3种方式。全新研制尽管是保证发动机各项指标均满足作战飞机需求的最佳方法,但是也需要大量新技术的集成,在研制过程中所需的技术验证和技术状态变更也会随之增多,从而必然导致所需费用的上涨和研制风险的增大。派生发展相较于全新研制,由于继承了部分成熟技术,在研制风险和作战要求之间进行了权衡,但在其研制过程也应确保新技术尤其是高风险技术占比不应过多。GE公司研制的YF120发动机在竞争中败给普惠公司的YF119发动机的主要原因,就是发动机中新技术占比偏高,导致其研制风险陡增、研制费用过高,且存在导致项目进度不可控的问题。美国F-35战斗机项目成本超支除了研制早期成本预测不足外,大量新技术的引入也是重要的影响因素。因此,发动机研制过程中,无论采用何种研制方式,都应当尽量多地继承成熟的或使用通过大规模验证后的先进技术,慎重选用风险较高的新技术,以规避发动机

研制风险可能带来的成本增长问题,在发动机性能、成本和研制风险之间做好综合权衡^[29]。

4 启示与建议

未来先进作战飞机对发动机综合性能提出了更高要求,未来军用航空发动机的研制将更为复杂,不仅要不断提升发动机技术水平,也要时常面临因作战模式、作战需求变化而导致的频繁的技术变更和迭代,更要确保降低全寿命周期费用目标的实现。军用航空发动机经济可承受性是一项复杂的系统工程,贯穿于发动机各个研制环节、流程,影响着发动机全寿命周期的成本费用,需要战略上重视,做好顶层策划,更需要加大对基础支撑技术和理论的探索,真正将装备经济可承受性贯彻到航空发动机的全寿命周期研制过程,为用户交付买得起、用得起、打得起的发动机。为此提出如下建议:

(1) 加强航空发动机装备经济可承受性的顶层策划和协作。

装备经济可承受性是包括航空发动机在内的整个军工装备制造业的共性问题,美国在该领域初期尽管也是由各家单位单独开展研究,但最终都在美国军方的牵头下走向了协作研究。以美国国防部早期用来评估飞机发动机潜在变化的成本效益工具——成本效益分析(CEA)模型为例,CEA模型最初由普惠公司开发,为了使从事工程变更项目(ECP)研究的发动机承包商之间的成本分析标准化,在美国空军的推动下,组建了由陆军、海军和空军等发动机系统开发的项目管理人员和工程师组成的联合推进协调委员会(JPCC)来推动模型标准化工作,将模型在发动机全行业推广应用^[30]。加强航空发动机装备经济可承受性的顶层策划和协作,是缩小国内与国外发动机技术水平差距的必有之路。

(2) 加强航空发动机历史成本数据的积累和归集。

在航空发动机研制过程中,无论是早期方案论证还是设计开发,发动机的成本估算和优化均需依赖翔实的历史数据。美国等国家研制的航空发动机型号众多,对历史成本数据的积累和管理也较完善。而我国自行研制的涡喷/涡扇发动机较少,发动机样本明显不足,加之多渠道管理的问题,对技术、经济数据的积累也严重不足,导致发动机成本估算和优化均存在一定的局限性。加强航空发动机历史成本数据的积累和归集,是开展精细化的成本分析

业务的重要数据保障。

(3) 加强航空发动机装备经济可承受性理论和方法的探索。

相较于国外在航空发动机全寿命周期内开展的大量有实际成效的装备经济可承受性研究,国内无论是在研制早期的发动机成本估算,还是在设计开发过程中的成本约束优化均存在明显不足,对装备经济可承受性理论和方法的探索缺少适于自身发动机实情的原创性研究,且受限于发动机数据不完整的事实,对装备经济可承受性的方法研究大多不太深入。加强航空发动机装备经济可承受性理论和方法的探索,是实现航空发动机全寿命费用有效管控的关键。

参考文献:

- [1] 胡 飞,谢 宜. 经济可承受性对航空装备成本管理的启示[J]. 中国总会计师,2010,(1):104—106.
- [2] 吴静敏. 经济可承受性——军用航空发动机发展的一项重要指标[J]. 国际航空,2010,(9):47—49.
- [3] Watson P, Curran R, Murphy A, et al. A cost estimating model for aerospace procurement Pro-COST EST[R]. AIAA 2004-6237,2004.
- [4] Evans J W, Mehta P P, Ludwig A L. Advanced interactive cost analysis tool(AICAT) - an environment for evaluating affordability[R]. ASME GT2005-68283,2005.
- [5] Scanlan J, Rao A, Bru C, et al. DATUM project: cost estimating environment for support of aerospace design decision making[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(4): 1022—1028.
- [6] 刘 芳,张海涛. 小样本理论在航空发动机研制费估算中的应用[J]. 北京航空航天大学学报,2014,40(11):1518—1525.
- [7] 谭云涛,郭 波. 基于CAIV的航空发动机性能与费用的综合权衡模型框架[J]. 航空动力学报,2007,22(8):1309—1314.
- [8] 刘 锦,张海涛. 航空发动机研制费估算工作的现状与展望[J]. 航空发动机,2014,40(1):75—78.
- [9] 李佳妮,唐正佳,阮华波,等. 涡桨发动机方案阶段经济可承受性分析[J]. 燃气涡轮试验与研究,2016,29(5):58—63.
- [10] 尹 峰. 航空发动机研制费用测算方法分析[J]. 航空发动机,2013,39(3):89—94.
- [11] Viars P. The impact of IHPTET on the engine/aircraft system[R]. AIAA 89-2317,1989.
- [12] 郭 琦. IHPTET计划的后续计划VAATE正在展开[J]. 燃气涡轮试验与研究,2002,15(2):43.
- [13] 晏武英. 美国新一代国家级军用航空动力预研计划分析[J]. 航空动力,2018,(2):35—39.
- [14] 但星亨,张海涛. 美国典型军用飞机项目成本增长原因分析[J]. 航空科学技术,2013,(4):13—17.
- [15] Maurer D. F-35 SUSTAINMENT: enhanced attention to and oversight of F-35 affordability are needed[R]. GAO-21-505T,2021.
- [16] 姚纳新,潘红九,张艳春,等. 国外复杂系统成本管理和成本估算发展概况[J]. 导弹与航天运载技术,2008,(2):24—29.
- [17] Younossi O, Arena M V, Moore R M, et al. Military jet engine acquisition: technology basics and cost-estimating methodology[R]. MR-1596,2002.
- [18] 韩景倜. 航空装备寿命周期费用与经济分析[M]. 北京:国防工业出版社,2008:70—73.
- [19] Wagner W. Engine design decisions impact aircraft life cycle costs[R]. AIAA-P-77-916,1997.
- [20] 孙 亮. 武器装备研制过程中的CAIV方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.
- [21] Kaye M A, Sobota M S, Graham D R, et al. Cost as all independent variable(CAIV) principles and implementation [R]. AIAA 99-4411,1999.
- [22] Koreisha N A, LaPlaca-Mars V. Cost as an independent variable(CAIV) acquisition strategies: a brief overview [C]// 9th International Cost/Schedule Performance Conference. 1997.
- [23] Marc Trevor Lewis. Integrating cost as an independent variable analysis with evolutionary acquisition - a multi-tribute design evaluation approach[D]. U.S.: Air University,2003.
- [24] 谭云涛,郭 波. 以费用为独立变量的随机机会约束规则模型研究[J]. 数学的实践与认识,2007,(13):73—78.
- [25] Cheung J L, Scanlan J, Wong J. Application of value-driven design to commercial aeroengine systems[J]. Journal of Aircraft,2012,49(3):688—702.
- [26] Ghisu T, Shahpar S. Affordable uncertainty quantification for industrial problems: application to aero-engine fans[J]. Journal of Turbomachinery,2018,140(6):061005.
- [27] Mehta P P, Evans J W, Ludwig A L. Determining the affordability of advanced propulsion systems[R]. ASME 99-GT-393,1999.
- [28] 李华文,梁春华. 航空发动机研制降低费用、缩短周期技术综述[J]. 航空发动机,2006,32(4):54—58.
- [29] 江和甫,蔡 毅,斯永华. 对航空发动机研究和发展规律的认识[J]. 燃气涡轮试验与研究,2001,14(3):7—10.
- [30] Reed E J. Life cycle cost methodology for preliminary design evaluation[R]. ASME 86-GT-37,1986.