

能,设立专项团队直接参与重大投资决策与战略制定。同时建立财务与业务部门常态化双向沟通机制,通过定期业财融合会议,使财务人员深入理解业务逻辑、业务人员强化风险意识,在决策中有效平衡效率与韧性。

(五)系统集成:构建韧性形成闭环

财务韧性并非静态属性,而是资源配置流程与外部环境压力持续相互作用、动态生成的能力。循环始于对外部环境的感知与韧性战略目标的确立,驱动企业通过弹性资源组合、动态调节机制及韧性文化等路径付诸实践,借助滚动预测、弹性预算及跨部门调度委员会等机制将理念转化为行动,最终形成“感知—驱动—生成—反馈”完整闭环。对大型建筑企业而言,该系统提供了将分散策略、管理工具与组织变革系统整合的框架,确保韧性培育渗透从战略到运营各环节,在与复杂环境的持续互动中实现螺旋式提升。

责任编辑 王词

主要参考文献

[1] 柳凯中.动态能力视角下基于熵权TOPSIS法的制造业企业财务韧性研究[J].高科技与产业化, 2025, (2): 112-116.

[2] 王光伟, 吴咏梅, 王燕青, 等.医院负债能力与财务韧性案例分析[J].中国管理信息化, 2017, (21): 17-20.

[3] 姜革.财务危机视角下数字化转型对企业韧性的影响[J].现代营销, 2024, (5): 78-80.

航空产品部件经济性设计的困境与改善路径探析

廖八保

摘要:随着全球航空业竞争白热化和可持续发展要求的严格落地,航空产品部件的经济性设计已从传统的成本控制议题演变为决定企业核心竞争力的战略性问题。经济性设计旨在满足严苛性能、安全与可靠性标准的前提下,实现产品全生命周期成本的最优化。然而,在实践中,航空产品部件的经济性设计面临着技术层面的多维权衡、管理流程的协同失效以及外部环境与新兴要求带来的多重困境。本文系统剖析了这些困境在材料选择、制造工艺和生命周期成本管理等方面的具体表现,并基于当前数字化转型与绿色发展的时代背景,提出构建基于模型的全生命周期成本分析框架、深度融合数字化工具赋能设计、将可持续性要求内化为核心驱动力以及建立标准化框架与行业最佳实践的改善路径。

关键词:经济性设计; 航空产品部件; 生命周期成本; 数字化转型; 可持续性

中图分类号: F275 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-286X(2026) 15-0044-04

一、引言

(一) 研究背景与意义

当前,全球航空产业正处于深度变革的关键阶段。一方面,市场竞争加剧、燃油价格波动以及供应链结构日趋复杂,对航空器制造商和运营商的成本控制能力提出了前所未有的挑战;另一方面,应对全球气候变化的紧迫性使得可持续发展成为行业不可避免的核心议题,各国政府与国际组织纷纷出台更严格的碳排放法规。在此背景下,航空产品部件的经济性设计超越了单纯降低制造成本的范畴,战略意义空前凸显。

航空产品作为技术密集型、资本密集型的高价值产品,研发周期长、技术风险高、制造成本昂贵。相关研究表明,产品约70%~90%的生命周期成本在早期设计阶段即被锁定。因此,在

核心议题,各国政府与国际组织纷纷出台更严格的碳排放法规。在此背景下,航空产品部件的经济性设计超越了单纯降低制造成本的范畴,战略意义空前凸显。

作者简介: 廖八保, 惠阳航空螺旋桨有限责任公司, 高级会计师。

设计源头系统性地融入经济性考量,通过优化设计方案来平衡性能、成本、可靠性、可维护性与环境影响,是从根本上提升产品市场竞争力、实现企业可持续发展的关键。

(二) 核心概念界定

本文所探讨的航空产品部件经济性设计,是贯穿产品全生命周期的综合性概念,其并非单纯追求最低的采购成本或制造成本,而是指在设计阶段综合运用技术、经济和管理手段,以产品全生命周期成本(LCC)最低为核心目标之一的系统性设计活动。LCC涵盖了从概念设计、研发、制造、测试、运营、维护、保障直至报废处置的全过程所产生的费用总和。经济性设计要求设计师在满足功能、性能、安全性、可靠性等刚性约束的同时,前瞻性地考虑材料的可获得性、制造工艺的可实现性、运营维护的便捷性以及最终的回收处置方案,从而在多重目标之间寻求最优平衡。

(三) 研究现状与问题提出

当前,业界对经济性设计的重要性已有广泛共识,并发展出诸如面向成本的设计、成本作为独立变量等方法论。但这些理论在应用于复杂的航空产品部件设计实践时常面临巨大挑战,设计过程中的信息不确定性、多学科间的复杂耦合关系、组织流程的协同障碍等共同构成了经济性设计的现实困境。本研究的核心问题是在当前技术与市场环境下航空产品部件经济性设计具体面临哪些核心困境;在数字化和可持续发展浪潮的推动下,未来存在哪些切实可行的改善路径。

二、航空产品部件经济性设计面临的核心困境

(一) 技术层面的多维权衡困境

航空产品部件设计本质上是一个在多重约束下进行权衡决策的过程,经济性作为关键维度之一,使得这种权衡变得异常复杂。

材料选择的“性能—成本—可持续性”三角难题。航空产品部件对材料性能(如轻量化、高强度、耐高温等)的要求极为苛刻,设计中广泛采用钛合金、高温合金和先进复合材料,这些高性能材料普遍存在“三高一难”的问题:初始成本高,如新型复合材料和增材制造专用粉末价格不菲;加工难度高,相关材料对切削、成型等加工工艺要求严苛,直接推高制造成本;供应链风险高,部分关键元素稀缺,易受地缘政治等社会因素影响;循环利用难,如热固性复合材料回收技术尚不成熟,难以在保持性能的同时实现高价值再利用,既增加了产品的报废处理成本,也与循环经济发展要求相悖。设计师需在卓越性能、可接受的成本和日益重要的可持续性要求之间做出艰难取舍。

制造工艺的“效率—精度—成本”制衡。航空产品部件通常结构复杂、精度要求高,制造工艺的选择会直接影响最终成本。例如,为了实现轻量化而设计的复杂整体结构件虽然减少了装配环节,但对大型、高精度的数控加工设备和复杂的工艺规划提出了极高要求,导致单位加工成本和时间显著增加。新材料的应用也带来了工艺适应性挑战,如复合材料缺乏延展性的特点可能影响自动化生产线的效率和经济性。一个在设计图纸上看起来完美无瑕的方案可能因为缺乏对可制造性的充分考量,而在生产阶段导致成本失控。

生命周期成本的“早期锁定”与“后期优化”矛盾。如前所述,航空产品LCC的绝大部分在设计早期就被决

定。然而在概念设计和初步设计阶段设计方案的细节尚未敲定,存在高度的不确定性,这使得精确的成本估算极为困难,设计师不得不在信息不充分的情况下做出对LCC有深远影响的关键决策(如材料体系、主体结构形式等)。一旦进入详细设计和制造阶段,对设计方案进行重大修改的成本将呈指数级增长。这种“决策在前、信息在后”的困境导致许多潜在的成本优化机会被错失,使得后续的成本控制工作事倍功半。

(二) 管理与流程层面的协同失效困境

经济性设计是一个跨部门、跨学科的系统工程,其成功与否高度依赖于组织管理和流程的有效性。

“设计—成本”信息流的割裂。在许多传统的研发流程中,设计部门的核心考核指标往往聚焦于技术性能(如减重、气动效率等),而成本则被视为制造、采购或财务部门的职责。设计师在进行技术决策时缺乏快速、准确的成本反馈机制,他们可能不完全了解某一设计特征对后续制造、装配、检测、维护等环节成本的具体影响,这种信息割裂导致了“设计只管性能、制造被动买单”的局面,许多不必要的成本被“设计”出来,严重阻碍了经济性目标的实现。

成本核算模型的局限性。企业现有的成本核算模型往往侧重于核算研发和制造成本,对于运营、维护、退役等下游环节的成本考虑不足,无法全面揭示不同设计方案对整个生命周期总成本的影响,导致决策的片面性。例如,一个初始采购成本较低但可靠性差、维修频繁部件的LCC可能远高于一个采购成本稍高但经久耐用的替代方案。此外,目前行业内仍缺乏能

够精确衡量单一设计变更对项目全生命周期连锁影响(如对工期、物流、后续运维成本的涟漪效应)的成熟量化评估模型。

组织壁垒与数据孤岛。设计、工艺、制造、采购、财务、售后服务等部门之间存在组织壁垒,导致了严重的数据孤岛问题。各环节的数据标准不统一、信息系统不互通,使得贯穿产品全生命周期的数据难以被有效整合与分析。设计师无法便捷地获取经济性设计决策所必需的关键信息(如制造过程中的实际工时数据、外购件的市场价格波动、在役产品的维修数据等),跨部门协同的缺失使得全生命周期的系统性优化成为空谈。

(三) 外部环境与新要求带来的挑战

碳中和目标使航空业面临较大的减排压力,可持续发展已成为企业的“必答题”,这直接影响了经济性设计的边界条件。首先,可持续发展对材料和制造工艺的选择施加了新的约束,要求优先考虑环境影响小、可回收的方案,这可能与短期成本目标产生冲突。其次,全生命周期评估(LCA)正成为评估设计方案的必要工具,其复杂性对设计团队提出了更高要求。最后,碳定价等政策虽然旨在通过市场机制促进减排,但其如何定量地传导至具体部件的设计决策层面尚缺乏成熟的模型和方法论支持,给经济性权衡带来了新的不确定性。

三、航空产品部件经济性设计的改善路径

面对上述困境,传统的优化手段已显乏力,必须借助数字化转型和可持续发展理念,重塑经济性设计的方法论、工具和流程,探索系统性的改

善路径。

(一) 路径一:构建基于模型的LCC分析框架

要实现真正的经济性设计,首先必须让成本变得“可见、可算、可优化”。

建立综合性成本评估模型。核心是推动成本分析从“事后核算”转向“事前预测”。企业需投入资源开发或引进先进的成本评估工具,建立能够覆盖产品全生命周期的综合成本模型。这些模型应超越传统的制造成本估算,将运营成本(如燃油消耗影响)、维护成本(可靠性、维修性设计的影响)和报废处置成本等纳入统一框架。通过引入参数化成本估算(PCE)和基于特征的成本估算(FCE)等方法,在设计早期阶段,即使设计细节不完整,也能依据关键设计参数快速生成相对准确的成本预测,为设计师提供决策依据。

实施量化评估与权衡决策。在模型支持下,将成本与性能、重量等技术指标并列,作为同等重要的设计优化目标。例如,可构建一个包含直接运营成本(DOC)在内的多目标优化函数,运用系统性的成本效益分析(CBA)框架对不同的设计方案进行量化评估与比较。更进一步,可利用多学科设计优化(MDO)平台,结合遗传算法、梯度优化等算法,自动探索庞大的设计空间,寻找在成本、性能等多个维度上达到帕累托最优的解决方案,为设计师提供一系列经过优化的候选方案,从而实现科学决策。

(二) 路径二:深度融合数字化工具,赋能经济性设计

数字化工具,特别是数字孪生和人工智能,为打破信息壁垒、实现“设计—制造—运营”一体化协同提供了革命性手段。

应用数字孪生技术实现全流程虚

拟验证与优化。数字孪生是物理实体的虚拟镜像,打通了物理世界与数字世界的的数据流。在设计阶段,通过构建高保真度的部件数字孪生模型,可以在虚拟环境中进行装配、性能、应力等多场景仿真测试,从而在制造物理样件前就发现并修正潜在的设计缺陷。如波音777客机的研发完全依赖数字孪生技术,成功将返工量减少50%,研发周期缩短40%。在制造阶段,数字孪生可以模拟整个生产线,优化加工路径,减少设备停机时间、预测加工缺陷。如诺斯罗普·格鲁曼公司在F-35战斗机生产中,利用数字孪生技术将进气道部件的缺陷决策处理时间缩短了33%。在运维阶段,结合传感器数据,数字孪生可以实时监控部件的健康状态,实现预测性维护,从而降低非计划停机带来的高昂损失,并将真实的在役数据反馈给设计部门,形成设计迭代的闭环。

运用人工智能(AI)与生成式设计提升创新效率。人工智能特别是生成式设计正在颠覆传统的设计模式,设计师只需输入功能需求、性能约束(如材料、载荷、制造方法等),AI算法便能自主探索、迭代并生成数千种满足条件的轻量化、高性能设计方案。如空客利用生成式设计,将A320飞机的客舱隔板重量减轻了20%,直接带来了燃油成本的节省和碳排放的减少。此外,AI还可以用于分析海量历史设计、制造和维护数据,自动识别隐藏的成本驱动因素,为设计师提供数据驱动的优化建议。

(三) 路径三:将可持续性要求内化为经济性设计的核心驱动力

可持续性不应被视为对成本的额外约束,而应被看作是激发创新、重塑价值链、实现长期经济性的新机遇。

推行面向循环经济的设计。设计师必须从产品生命周期的终点出发,思考如何最大化产品和材料的价值。这包括:采用易于拆解的设计,方便维修、升级和零部件回收;采用单一或兼容性好的材料,简化回收过程;采用模块化设计,使失效模块可以被方便地替换而非整体报废。虽然这些设计可能增加初始的复杂度和成本,但通过延长产品寿命、回收高价值材料,可以在整个生命周期内创造更大的经济效益。

以LCA指导决策。将LCA作为设计方案评估的标准流程,定量分析不同材料、工艺选择对能源消耗、温室气体排放、资源枯竭等环境指标的影响。LCA的结果可以转化为环境成本纳入LCC模型,从而使设计决策能够更全面地平衡经济效益与环境效益,避免因追求短期制造成本降低而导致长期环境成本和社会成本激增。

主动应对碳定价等政策的经济性设计策略。碳价将碳排放的外部成本内部化为企业的运营成本,为减重设计和提升能源效率的设计方案提供了更强的经济合理性。例如,当碳价较高时,采用更昂贵的轻质复合材料所增加的采购成本可能在飞机全寿命周期内通过节省燃油和减少碳税支出而得到充分补偿甚至带来净收益。经济性设计模型必须将碳成本作为一个关键变量,动态指导材料和技术选择决策。

(四) 路径四:建立标准化框架与行业最佳实践

系统性的改善离不开标准化的流程和知识的沉淀。

制定经济性设计准则与标准化流程。企业内部应制定明确的经济性设计指南和审查标准,将其融入到产品

开发流程(如集成产品开发)的各个阶段。例如,在概念设计阶段就要求进行初步的成本评估,在详细设计评审中将成本目标作为与技术指标同等重要的否决项。推广“三化”(标准化、模块化、通用化)设计,通过提高零部件的通用性,大幅降低采购、制造、库存和维护成本。同时,应积极遵循行业和国际标准,夯实设计质量、可靠性和互换性基础,拓宽广义经济性设计的价值边界。

推广价值工程(VE)与案例库学习。系统性地设计过程中应用VE方法,对产品功能进行深入分析,以最低的生命周期成本可靠地实现必要功能,剔除不产生价值的“过度设计”。同时,企业应建立经济性设计案例库,收集和整理成功的降本增效案例(如通过增材制造和创新设计将关键飞行部件成本降低20%~35%,或通过设计优化大幅减少C-17飞机部件的零件、紧固件和工时数量),推广最佳实践,形成持续改进的组织文化。

责任编辑 刘霖

主要参考文献

- [1] 王晓东, 李明. 航空部件全寿命周期成本分析模型研究[J]. 航空工程进展, 2023, 10(4): 112-119.
- [2] 张磊, 陈建国. 先进复合材料在航空结构中的应用现状与发展趋势[J]. 复合材料学报, 2022, 39(7): 1685-1692.
- [3] 李宁, 高山. 航空制造业供应链管理中的材料稀缺性与成本风险[J]. 物流工程与管理, 2021, 43(3): 57-62.
- [4] 王建华. 热固性复合材料回收技术及其在航空业的应用前景

[J]. 材料导报, 2024, 38(2): 45-51.

[5] 陈晓光, 黄河. 航空部件经济性设计中的“早期决策”风险分析[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(12): 2805-2812.

[6] 赵敏, 刘涛. 基于数字孪生的航空部件全流程质量控制技术研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(10): 78-85.

[7] 李春晖, 孙浩. 航空发动机部件生命周期管理与维护策略[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 23-30.

[8] 周云, 王磊. 可持续航空材料的环境影响评估方法研究[J]. 环境科学与技术, 2023, 56(9): 5234-5242.

[9] 王志强, 刘欣. 碳定价机制对航空业技术创新的影响分析[J]. 经济管理, 2024, 46(2): 102-110.

[10] 陈旭, 李宁. 价值工程在航空产品设计中的应用研究[J]. 工业工程与管理, 2022, 27(1): 85-90.

[11] 王鹏, 赵丽. 基于案例学习的航空部件降本增效策略[J]. 航空技术与装备, 2024, 33(1): 112-119.

[12] 李强, 陈浩. 航空部件数字化孪生平台的构建与应用[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(11): 2221-2228.

[13] Huang Y, Lee J. Generative Design in Aerospace: A Review of Recent Advances and Future Prospects[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, (115): 107056.

[14] Smith A, Zhou Q. Multi-Disciplinary Design Optimization for Cost and Performance in Aircraft Structures[J]. Journal of Mechanical Design, 2023, 145(4): 041402.