

Analysis of modular design concept of aero engine

Xiangdong Lei

Jiangsu Hangdu Power Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225200, China

Abstract

The modular design concept of aviation engines involves breaking down the engine system into several distinct modules. These modules, while having relatively independent functions, share a unified interface, allowing for easy interchangeability between them. This approach enhances the assembly speed of various engine components, facilitates maintenance and part replacement, and streamlines the overall production and maintenance processes of the engine. The article analyzes the modular design concept and key technologies of aviation engines, aiming to effectively enhance the design level of aviation engines, increase design flexibility, shorten the R&D cycle, reduce design costs, and improve the operational efficiency of airlines.

Keywords

aviation; engine; Modular design

航空发动机模块化设计思路分析

雷向东

江苏航都动力有限公司, 中国 · 江苏 扬州 225200

摘要

航空发动机模块化设计理念,就是对发动机系统进行分解,将其转化为几个不同的模块,这些模块功能相对独立,但是接口统一,各个模块之间可以互换,进而提高发动机各个组件的组装速度,方便维修和更换零件,简化整体发动机生产与维修流程。文章主要对航空发动机模块化设计理念和关键技术进行分析,从而有效提升航空发动机设计水平,提高设计灵活性,缩短研发周期,减少设计成本,促进航空公司的运营效率。

关键词

航空; 发动机; 模块化设计

1 引言

为适应未来社会发展对航空飞机的实际需求,需要对航空发动机设计模式进行持续性优化,引进模块化设计理念,这样才能进一步提高发动机体系性能,并减少研发时间,控制研发成本,同时也可以对模块设计进行配置复用,这样能够结合各类飞机发动机型号的不同,对其进行模块化更换和维护,保障发动机维修效果。

2 航空发动机模块化设计优势和关键技术

在现代化航空工业高速发展背景下,模块化设计在发动机设计中发挥了越来越重要的作用,可以对传统设计方法进行创新和优化,简化设计流程,进一步提高设计效率,控制发动机维修成本。模块化设计过程中需要保障各个发动机模块接口的标准化,能够保障各个模块相互兼容。模块化设计就是对复杂系统进行分解,将其转化为相对独立的几个模

块,且各个模块之间可以互换,这样方便对各个模块进行单独维修和更换,进而提高维护效率^[1]。由此可见,模块化设计理念在航空发动机设计中的优化应用,能够提高各个模块开发速度,且标准化的接口能够实现整个系统的高效集成与调试,还能够实现设计复用,在不同项目中重复使用通过验证的模块,这样能够减少研发成本,缩短研发周期。在模块化设计理念下,需要结合不同平台发动机的实际需求展开详细化分析,进而全方位、多角度分析发动机系统功能,优化架构设计要求;在此基础上,要推动构建航空发动机功能单元模型,其中建模方法有环境背景图、活动图、矩阵等,这样能够从上到下逐级分解发动机功能,并合理分配各个功能单元;此外还需要结合建模结果,开展模块设计与验证工作,并构建更加完善的模块数据库,明确模块复用判定条件。在该过程中,需要促进单个模块性能一致与结构互换,同时要结合不同用户的实际需求,想起短时间内配置发动机产品构型;在此基础上,要结合视情维修应用场景实际需求,对模块进行重组,形成一个个独立的维修单元体,这样可以确保各个维修单元体更换后整机性能的一致性,并保障整体发动机工作状态的可靠性。

【作者简介】雷向东(1986-),男,中国贵州贵阳人,本科,从事航空发动机设计研究。

3 航空发动机功能单元建模与划分技术

发动机是航空平台的重要动力来源,随着航空飞机发展水平的日益提升,动力需求日益呈现多样化趋势,因此需要对新技术进行优化应用,才能满足航空发动机功能多样化、结构复杂化的需求。航空发动机模块化建模需要对不同功能单元边界、接口进行清晰梳理,并严格按照系统工程正向设计流程进行操作,并从上到下逐层分析,对各类功能进行优化分解分配。在建模环节中,要优化解决发动机顶层功能呈现问题,并采取科学方法针对性分解分配顶层功能,才能更加合理地划分出“高内聚、低耦合”发动机功能单元^[2]。

3.1 基于环境背景图的航空发动机系统交互分析建模技术

为了精准识别航空发动机功能单元,需要更加全面地获得发动机顶层功能,只有这样才能保障合理划分后续功能单元。在功能识别工作中,为了对需求进行精准捕获,需要做好场景分析工作。由于各类功能都需要在航空发动机运行、维护场景中进行充分体现,所以需要加大对场景建模与描述工作的重视程度。通常情况下,航空发动机主要发挥航空装备平台子系统的作用,场景分析特殊性较强,需要保障运营场景与上级装备平台的统一性,此外还需要全过程弥补维修、保障等场景。其中,以场景为中心的发动机功能分析主要针对发动机与装备平台不同级别平台、人员、设备之间信息的相互交互,只有在此基础上才能结合输入/输出捕获发动机顶层功能;环境背景图建模主要是针对系统交互对象、信息进行分析和研究,在航空发动机 SOI 系统基础上,对不同场景与上级装备平台子系统、人员等实现信息交互^[3]。通常情况下,为了精准识别发动机交互信息,吸鸦片选择合适的输入信息,如上级装备平台的功能逻辑模型、通讯接口文件、机械接口文件等,然后利用环境背景图对其开展更加精准的建模分析工作,只有这样才能对整体航空发动机顶层功能进行精准识别。

3.2 基于活动图的航空发动机功能分解建模

在实际设计环节,可以通过多样化方式实现航空发动机顶层功能,由于承载功能、指标需要利用多样化、针对性的概念方案,这种情况容易引起顶层功能分解的不同。如果概念方案与显性满足功能指标不匹配,就要进行针对性创新,但是难度较大,需要进行大量的可行性论证。其中常用的发动机功能分析方法有功能流框图法、 N^2 图、时间线分析法^[4]。现阶段, SysML 建模语言能够在系统中进行规范性表达和分析,进而在发动机功能分析工作中得到广泛青睐。在该建模语言应用中,活动图主要发挥功能流框图的功能;时序图主要发挥时间线分析的功能。当前,在航空发动机功能分解中较常使用活动图方法,这样能够有效解决顶层功能分解分配难题。活动图能够在建模结构的支持下,直接开展逻辑仿真工作,以便对顶层功能能否实现进行验证,

进而优化分析功能分解合理性。完成初步分解工作后,还要促进架构建模、功能危险性评估等工作的实现,进而推动多轮迭代,这样才能进一步明确功能分解合理性。

3.3 基于矩阵 N^2 的航空发动机功能单元定义

这是在概念方案、功能分解结果的基础上,科学分配子功能,集合而成承载功能单元。在功能单元定义过程中,需要按照以下原则进行规范性操作:①以相似性为基准进行划分;②以高内聚、低耦合为基准进行划分,尽可能降低功能模块交互接口。在活动图建模分析与迭代支持下,能够利用 N^2 图进行功能单元划分,并实现接口的规范性解耦^[5]。在具体操作中,要根据分解核心子功能对初始单元模块进行定义,并利用 N^2 图对不同子功能关联关系、接口数量进行详细分析,在高内聚、低耦合基础上,把接口封闭在功能单元内部,这样能够对发动机功能模块进行重构。

4 模块设计与复用技术

结合功能模块设计结果,需要构建数据模块构型包,这些数据包含模型、配套文件等信息。该模块构型包需要与各类航空发动机的研发进度需求、成本控制要求等进行针对性设计,使其符合未来技术发展趋势要求,保障性能一致性,能够实现各个结构模块的互换。同时,还需要利用构型配置方法,构建模块数据库,同时对模块承接性能进行分析,分层验证结构接口,进而对复用模块进行协同共用,以便结合用户个性化需求,针对性、高效化配置发动机产品构型^[6]。当前,较为常用的模块结构互换性设计方法有接口标准化规格化、尺寸计算与公差分配、转子分级高精度平衡等,然而这些都是在不同模块之间的相互匹配补偿方式实现的要多平台模块复用的多样化需求不契合,所以在未来发展中需要加大对模块性能一致性设计方面研究力度。

4.1 模块性能一致性设计

在发动机模块设计和研制过程中,往往需要通过试制、装配、测量等步骤,这些流程往往会形成一定的几何特征尺寸偏差,这样容易致使模块启动性能出现分散问题,导致整个发动机性能偏差较大。所以,要采取科学方法,对模块性能几何特征进行精准识别,同时还需要对几何特征尺寸容差范围进行量化控制。但是,现阶段该方面的技术措施还不到位,往往只能利用工程经验、整机匹配调试等方式,难以真正实现模块性能一致性^[7]。在正向设计理念支持下,尤其以多层级性能传递为基础,采取模块性能容差分配方法,这样能够利用模块关键特征公差控制,实现模块性能的一致性。例如,面向整机性能一致性的模块关键结合特征容差分配方式,需要通过敏感性分析、机器学习驱动特征选择等方式,对模块关键几何特征进行精准识别,这样可以减少关键几何特征控制采纳数量。航空发动机压气机部件性能容差分配方法技术路线如图 1 所示。

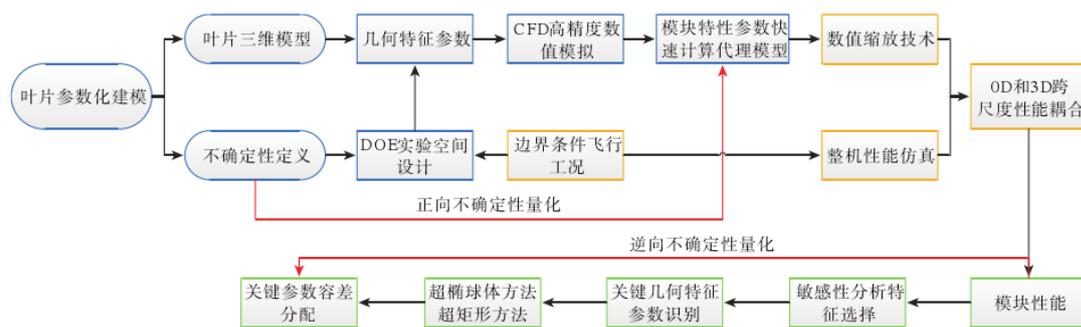


图 1 航空发动机压气机部件性能容差分配方法技术路线

4.2 模块库构建与管理构型

在信息化数据库支持下构建模块库，这样才能把模块解耦后的各类信息进行结构化、数字化处置，包含功能性能属性、接口属性、寿命属性、技术成熟度属性等。以模块信息属性为中心，对模块库准入准则进行优化设计，只有符合该准则的信息才能归集到模块库进行存储和应用。对现有模块数据版本开展定期升级管理，且需要提前利用准入准则进行判断才能进行模块升级操作^[8]。在模块库支持下，需要形成发动机产品构型结构树，其中包含顶层、配置层、设计层等，三个层次的类型分别为多层结构、单层结构、一至多层结构。在此基础上，需要利用配置层对模块进行筛选，使其与设计要求保持契合性，然后高效完成发动机性能模型、物理模型构建工作，同时在仿真系统支持下，做好发动机功能性能、结构强度等进行仿真验证，保障设计方案的可行性，进而确定产品设计方案，提高验证速度，实现高效研发。

4.3 模块匹配定量决策

结合航空发动机研发和制作需求，往往需要通过配置构型的方式进行操作，但是这种方式往往会形成不同类型的产品设计方案，基于此需要构建模块匹配权衡决策模型，这样可以为设计方案可行性论证提供依据。

5 结语

综上所述，模块化设计是航空发动机研制工作的创新和优化，能够进一步提高航空工业效率和性能。在模块化设计支持下，能够对不同组件进行单独设计和测试，进而提高研发速度，减少维护、维修成本。在未来发展中，要在设计技术层面和验证体系层面进行更加深层次的研究，并对现代

数字化技术、人工智能技术进行优化应用，进而促进发动机研发工作向数据驱动层面转型，这样才能进一步提高发动机研发速度，并减少研发成本，强化综合性能。同时还需要对设计、仿真、测绘验证等流程进行集成化开展，强化数字孪生与模型协同、虚拟仿真装配试验等数字化方法的应用，促进虚拟验证与实物测试的相互融合，有效控制验证成本。

参考文献

- [1] 黄维娜,朱晓泉,潘辉,等. 航空发动机模块化设计关键技术与展望[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2025, 38 (02): 4-12.
- [2] 徐劲松,黄国勇. 航空活塞发动机机电硬件的模块化设计与实现[J]. 电子测量技术, 2021, 44 (16): 37-44.
- [3] 张成武,郝朝杰. 基于模块化设计的工程设计数据管理[J]. 航空发动机, 2019, 45 (02): 97-102.
- [4] 潘柏霖. 基于UG软件的航空发动机外部系统设计二次开发[J]. 中国设备工程, 2018(05): 123-125.
- [5] 马勃勃,董素艳,李宗耀,等. 航空发动机空气系统图形化建模软件设计[C]// 中国航空学会动力分会燃烧与传热传质专业委员会. 中国航空学会第十八届燃烧与传热传质学术研讨会论文集. 西北工业大学动力与能源学院;中国航空工业集团公司沈阳发动机设计研究所, 2015: 573-579.
- [6] 刘圣宇. 某型飞机发动机性能检测系统的设计与实现[D]. 吉林大学, 2012.
- [7] 郭旭,王凤君,赵曦. 浅谈航空发动机专用工位器具模块化设计[J]. 中国新技术新产品, 2011(24): 14.
- [8] 慈元卓. 装备模块化设计中的模块创建研究[D]. 国防科学技术大学, 2004.