

航空发动机正向研发模式构建方法研究

Research on the Forward Research and Development Models Construction Method for Aero Engine

■ 卢娟 / 中国航空发动机研究院 刘海年 栾旭 / 中国航发沈阳发动机研究所

伴随用户对先进动力需求的不断提升,采用基于系统工程的航空发动机正向产品研发模式已经成为航空发动机研发企业发展的必然趋势。因此,开展正向研发模式构建方法研究,对掌握航空发动机研制客观规律,建立航空发动机研发体系,支撑先进航空发动机自主研制具有重要意义。

航空发动机产品研发体系是航空发动机自主创新发展的基石^[1]。没有完整成熟的研发体系,很难保证单个发动机产品研制的成功具有可复制性,而正向自主的航空发动机产品研发体系可以有效地支撑当前和未来产品的成功研制。对发动机正向研发模式的理解和认识是构建产品研发体系的基础和前提,本文在借鉴先进航空企业研发模式实践的基础上,基于航空发动机研制的客观规律,研究基于系统工程的航空发动机正向研发模式构建方法。

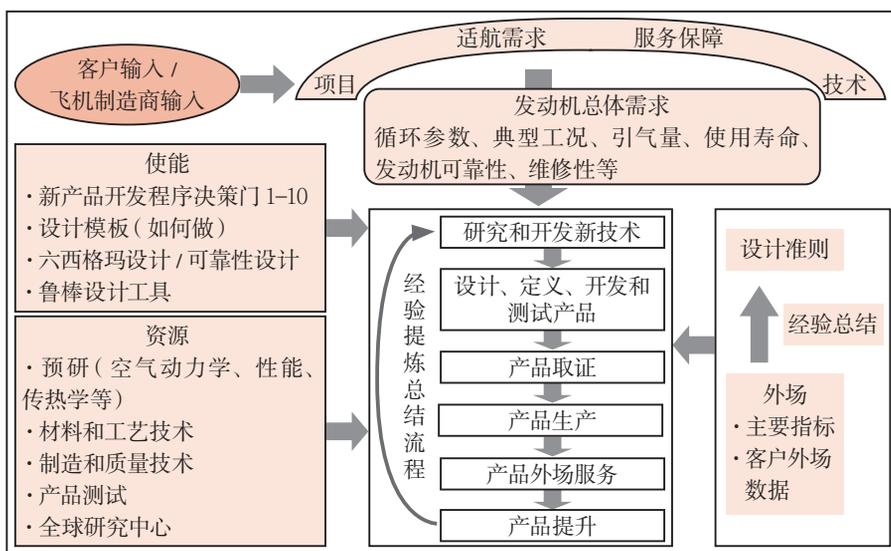


图1 GE 航空航天公司产品研发体系

航空发动机研发体系发展现状

以GE航空航天、罗罗、普惠等公司为代表的先进航空发动机企业经过一个多世纪的发展,建立起较为成熟的、体系架构基本趋同的产品研发体系,有效地支撑航空发动机产品研发,使其产品长期保持领先地位,形成了市场垄断格局。国外先进企业的产品研发以技术开发为基础,形成了涵盖技术开发—产品研制—使用维护的航空发动机全生命周期研发技术和产品相互协同的正向研发体系。GE 航空航天公

司的产品研发体系如图1所示,建立了覆盖从用户需求、新技术预研、新产品开发、产品使用维护等全部研发活动,实现对产品从技术研究到产品研发、生产制造、使用保障等业务域的全覆盖^[2]。

国内航空发动机行业经历了引进修理、测绘仿制、改进改型、自主发展的艰难历程,经过半个多世纪的发展,基本实现了主战飞机动力自主保障。近年来,中国航空发动机集团有限公司大力推进运营管理体系建设,旨在打造全集团统一的高效产品研发体系,实践过程中通过引

入系统工程方法和集成产品开发理念,建立了较为完整的研发体系架构,完成了产品研发主流程和职能支撑流程和职能支撑流程建设^[3-4],初步建立起涵盖技术开发和产品开发相互协同的集成产品研发体系。但是,在航空发动机产品和项目研究过程中,仍然存在对正向产品研发规律认识不足、技术规划与产品规划协同不足、技术攻关成果对产品研制支撑不足等问题,导致了产品拖进度、涨成本、降性能现象时有发生,对产品研制质量和用户评价带来不利影响。对此,需要开展航空发动

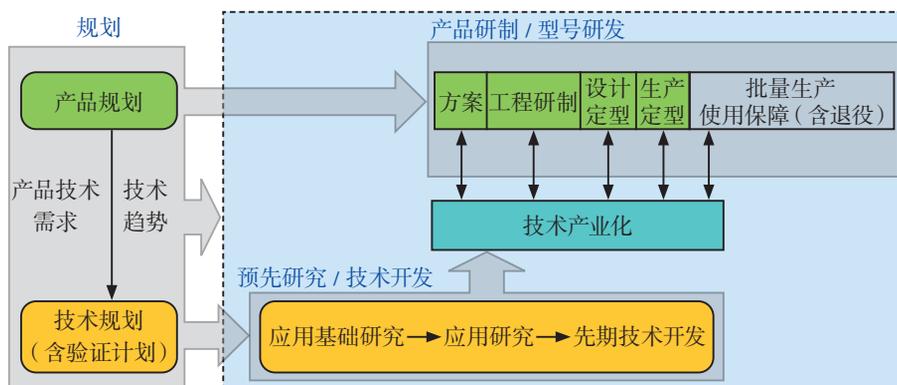


图2 航空发动机正向研发路径示意

机正向研发模式构建方法研究，建立基于系统工程的航空发动机正向研发路线，为航空发动机自主研发能力提升提供理论指导与方法支撑。

航空发动机正向研发路径构建方法

霍尔模型是美国系统工程专家霍尔提出的一种系统工程方法论^[6]，它将系统工程整个活动过程分为不同的阶段和步骤，同时结合这些阶段和步骤所必备的专业知识和技能，形成了由时间维、逻辑维和知识维所组成的三维模型。霍尔模型为人们提供了一种分析复杂系统的有效工具，航空发动机正向研发路径的构建可通过霍尔模型的系统性剖析，深化对航空发动机产品正向研发的认识。

航空发动机正向研发路径的构建是一项复杂的系统工程，依据霍尔模型，在时间维上，涵盖航空发动机研制全生命周期，包括预先研究、产品研制和使用保障3个阶段；在逻辑维上，涵盖产品需求到试验验证的全过程研发技术和技术管理活动，即产品规划—技术规划—产品研制的全部研发活动；在知识维上，涵盖发动机全层级研发对象所

需的全部知识技能。因此，航空发动机研发路径如图2所示，以规划为牵引，预先研究为基础，知识和技能为手段，产品研制和使用为目标。

航空发动机研发路径包括规划、预先研究、产品研制等3部分。其中规划包括产品规划和技术规划，预先研究包括应用基础研究、应用研究、先期技术开发等3个阶段，产品研制包括方案、工程研制、设计定型、生产定型、批量生产和使用保障等6个阶段。

产品和技术规划

规划是工业部门制订的长远发展计划，一个清晰的产品规划和技术规划是工业部门迈向成功的第一步。航空发动机的产品规划主要是根据用户的需求，在权衡发动机研制质量、成本、进度等风险的基础上对航空发动机能否立项进行论述，综合分析技术能力和研制生产条件，确定发动机产品的研制目标，为用户提供先进可靠的航空发动机产品。技术规划主要是根据航空发动机产品规划的目标，识别和确定关键技术，确定技术发展目标、技术发展策略，技术规划的制定应以产品规划为牵引，实现产品规划和技术规划的互锁，保证技术研究的成果支

撑产品研制及应用。

预先研究

预先研究项目是对产品的新原理以及概念进行相应的研究，并将其应用于产品的研制，为武器装备的研发提供技术储备。预先研究项目能够对技术的实用性以及可行性等进行相应的验证，降低新产品研制风险，缩短产品研制周期。

应用基础研究主要以探索航空发动机产品新概念、新原理、新方法的科学研究为主，为探索新型航空发动机提供理论依据和基本知识；应用研究是主要探索基础研究成果在工程应用的可能性和技术可行性的科学研究活动；先期技术开发是通过实物试验和演示，验证基础研究和应用研究的成果在航空发动机研制中的可行性和实用性的科学研究活动，为研制新型航空发动机提供实用的技术成果。

产品研制

产品研制是指按用户的技术要求和使用要求，设计和生产新产品的工程技术活动。通常产品研制在预先研究阶段之后，具备足够的技术能力储备，一般新技术的比例不应超过10%~20%；进入工程研制阶段，不允许存在任何高风险项目；产品研制的任务主要是基于特定研制背景和用户需求，将技术转化为产品，形成有保障的战斗力。

航空发动机的产品研制遵循系统工程过程（V模型）。系统工程过程在产品研制的几个阶段内可以有多个循环应用。航空发动机研制一般在方案阶段开展模型机或原理样机的研制与试验，工程研制阶段开展初样机和正样机（或试样机）的研制与试验，且在定型阶段开展定型

试验, 批量生产、使用保障阶段实现发动机的改进或改型。

方案阶段是对发动机研制多种设计方案进行论述与择优的过程。主要根据批准的发动机使用性能, 结合发动机设计方案, 提出完整、可行的技术指标, 以及科研、定型等大型试验的方案; 测算批量生产试制费、发动机采购价格和全生命周期费用; 并拟制发动机研制要求, 经批准的发动机研制要求是开展工程研制和组织发动机定型考核的依据。该阶段的技术成熟度 (TRL) 通常达到 4 ~ 5 级。

工程研制阶段主要根据批准的发动机研制要求, 进行详细设计、试制和试验 (地面试验、科研试验/试飞), 证明基本达到发动机研制要求规定的技术要求。工程研制阶段的初样机研制与试验主要验证设计指标是否都得到满足; 工程研制阶段的正样机研制与试验主要验证定型要求的所有指标是否都得到满足, 确定发动机技术状态。该阶段的 TRL 通常达到 6 ~ 7 级。

发动机定型包括设计定型和生产定型。设计定型主要考核发动机的技术指标和作战使用性能, 确认

其是否达到研制规定的规定; 生产定型主要考核发动机的质量稳定性和成套、批量生产条件, 确认其是否符合批量生产的标准。该阶段的 TRL 通常达到 8 ~ 9 级。

批量生产和使用保障阶段是指完成航空发动机批量生产和交付, 满足用户作战及其他任务的需要而进行的调配、维修、护理、退役及报废等活动, 同时为保持、恢复装备良好的技术状态或改善发动机装备性能而进行的一系列活动。

航空发动机正向研发模式各阶段内在逻辑

航空发动机正向研发模式各阶段的内在逻辑是: 产品规划牵引技术规划, 技术规划牵引技术研究, 技术研究支撑产品研制, 彼此之间是相互依存, 相互支撑, 技术成熟度逐步提升的关系。其中, 预先研究、产品研制、技术规划与产品规划的关系如图 3 所示。本文进一步阐述产品规划与技术规划的关系、预先研究与产品研制的关系、研发模式和

研制程序的关系, 对掌握航空发动机正向研发规律, 建立产品研发体系具有重要的指导意义。

产品规划与技术规划的关系

预先研究来源于技术规划, 产品研制来源于产品规划。产品规划为技术规划提供技术需求, 源头上保证技术需求与产品需求的强相关, 保证技术开发的结果“正确”和“有效”; 技术规划分析技术发展趋势, 为产品未来发展的规划提供方向和路线, 从而辅助产品发展战略的确定。

预先研究与产品研制的关系

航空发动机产品为国家战略性投资, 主要按照用户要求按时研制、生产和供应, 同时还承担提升综合国力、推动国民经济发展等重要任务。由于技术的复杂性, 某个技术的失误可能会导致产品研制的失败, 因此, 产品研制必须要以技术研究为基础和前提, 基础越牢, 产品越好, 预先研究与产品研制的关系如图 4 所示。

预先研究的成果要解决“发动机研制之所急”, 但不能代替产品研制的研究工作, 两者的目标不同。

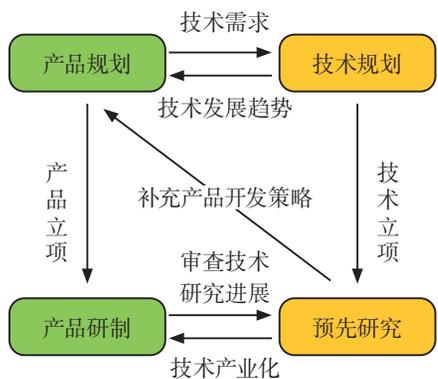


图3 预先研究、产品研制、技术规划与产品规划的关系

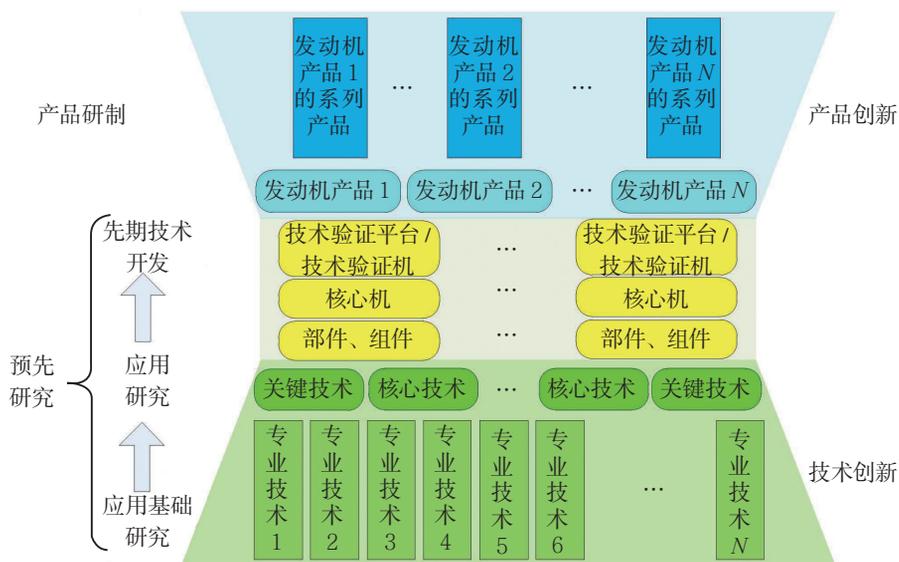


图4 预先研究与产品研制的关系

表1 预先研究和产品研制的对比

对比要素	预先研究	产品研制
目的	能力提升为导向	客户需求为导向
抓手	技术规划,以技术地图为抓手	产品规划,以产品为抓手
技术成熟度	TRL1 ~ 4	TRL5 ~ 6以上
成果导向	原则上允许失败	必须成功

预先研究中的先期技术开发主要完成部件系统或样机的演示验证,其目的是验证技术应用可行性和TRL水平;产品研制需要完成产品设计开发并验证技术指标的满足程度。此外,成果导向也不同,预先研究允许失败,产品只能成功。预先研究成果应用于产品应遵守成熟性原则。虽然预先研究允许失败,但若把不成熟的技术应用于产品研制,将会造成巨大风险以及经费和时间上的损失。预先研究和产品研制的对比如表1所示。

研发模式与研制程序的关系

航空发动机规划、预先研究和产品开发全过程如图5所示。从用户视角,通常认为航空发动机研制应始于使用部门批准的装备研制决策,止于生产定型报批,前期的预先研究仅是为了发动机研制提供技术储备,不应作为产品研制的一个阶段;

后期批量生产和使用保障是装备后的使用保障工作,亦不属于产品研制范畴。从工业部门视角,基于产品规划和技术规划,预先研究作为产品研制的技术能力储备阶段,应该在用户装备研制决策之前,就开展动力技术的预先研究工作,加强技术开发和技术验证工作;批量生产和使用保障阶段,工业部门需要根据用户使用的数据,持续开展发动机的服务保障工作,支撑产品设计改进和系列发展。因此,图5中虚线表示的批量生产和使用保障阶段从用户视角不属于产品研制,而从工业部门视角属于产品研制过程中使用发展阶段。

技术和产品要异步开发,技术一定要先行开发储备,一项关键、核心技术从开发到应用需要很长的匹配验证周期,理想的条件应是技术就像货架上的产品,产品开发的

本质就是把货架上成熟产品根据用户的需求进行组合运用,形成具有某种特定功能或特性的功能模块(零部件),然后把这些功能模块组合在一起形成满足用户要求的先进可靠的航空发动机产品。

结束语

航空发动机是事关国家战略安全的重要装备,其关键技术既买不来,核心内容也无法靠逆向研发掌握,必须在遵循航空发动机发展的正向研发模式的基础上,坚定不移地建立基于系统工程的航空发动机产品研发体系,加强以产品研制需求为牵引的技术研究,实现技术和产品的互锁,持续积累和提升产品研发能力,才能实现航空发动机自主研发和制造生产。

航空动力

(卢娟,中国航空发动机研究院,高级工程师,主要从事航空发动机基础研究、综合技术论证及科技项目管理)

参考文献

- [1] 王桂华.关于产品研发流程及流程架构的探讨[J].航空动力,2020(5):48-52.
- [2] 温泉.对中国航发集团标准体系建设工作的几点思考[J].航空动力,2020(4):59-61.
- [3] 韩秋冰,栾旭,宋柳丽,等.航空发动机产品开发流程阶段划分[J].航空动力,2020(3):48-50.
- [4] 宋柳丽,张德志,李娜,等.基于集成产品开发的构型管理流程设计[J].航空动力,2020(5):53-55.
- [5] 张宇,程中华,连光耀,等.基于霍尔三维结构的装备测试性验证试验框架设计[J].测控技术,2023,42(3):44-49.

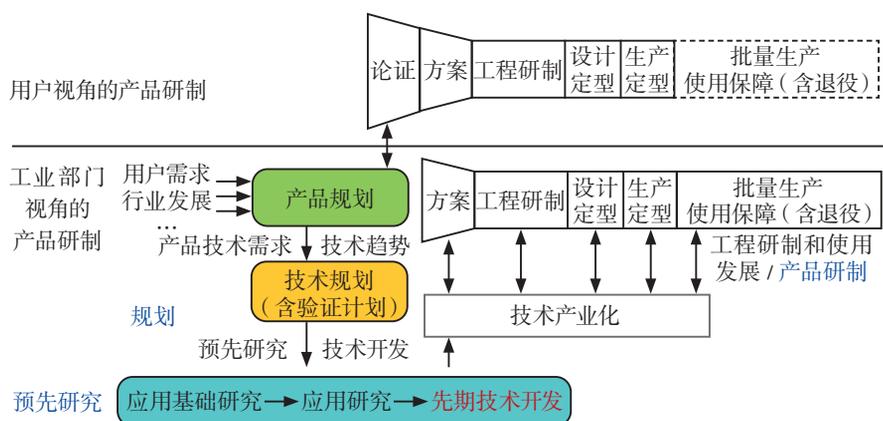


图5 航空发动机规划、预先研究和产品开发全过程路线图