

基于系统工程的航空发动机研发系统平台的构建与应用

Development and Application of Aero Engine R&D System Platform Based on System Engineering

李坤 江晓磊 范凯 / 中国航发涡轮院

通过航空发动机研发系统平台构建了集需求管理、研制策划、研制过程管理、技术执行、数字化设计仿真、科研管理、知识工程、质量管理，以及数据管理于一体的综合协同工作环境，加速了研制过程迭代，节约了综合成本。

航空发动机的研发技术门槛高，集成了现代工业中的众多尖端技术，涉及众多专业的交叉，对跨行业、跨地域协同的要求紧迫且巨大。在具体的任务调控方面，过去传统的任务驱动模式无法满足现今的研制要求。在传统的知识利用中，大多基于用户搜索、分类查看等方式，对知识的利用率较低。在传统的项目运作中，管控人员所需的信息来源分散，形式多样，且信息的及时性、有效性无法得到保证。而随着行业对高端航空发动机需求的日益迫切，在现今的跨专业、跨行业、跨地域协同研发模式中，如果想要进一步提升研发能力，传统的离散式、少协同的研发模式都将成为掣肘。

方案与目标 平台方案

协同研发作为研发系统平台的重中之重，是一切工作的伊始，是全部研制工作的推手，作为产品研发全过程管理的信息化工作平台，需要承接上下游各系统对团队管理、

流程、体系要素和数据管理的工作要求，主要实现对研发全过程的团队管理、需求管理、工作策划与WBS（工作分解结构）^[1]管理、计划编制、任务进度管理、过程数据管理、跨专业协同等业务。平台的功能架构见图1，主要包含模板管理、工作项配置、需求管理、研发数据管理、检查单及系统管理等几大功能。

在平台中，数据中心是实现一切要素的核心，每一活动项均只与数据中心产生数据交互，从数据中心获取输入，将输出上传至数据中心。将需求、需求验证计划、工作项等全部活动项依托数据关系进行关联，依据用户需求灵活配置，随时动态调整需求变更，实现流程运行与动态调控。

航空发动机研发系统平台基于航空发动机产品数字主线对产品进行管理，打通从需求开始，经由定义、工程、工艺、制造、实物及试验的全流程数据链，依托产品数据进行数据链管理。其中，需求数据链、定义数据链和工程数据链由策划设计过程产生并对其结果进行管理；

同时通过设计—制造协同，与工厂的数据相关联，实现对工艺数据链和制造数据链的管理，并将装配结果数据和试验数据链关联管理，实现产品研制全流程数据的集成管理。

预期目标

通过基于需求工程方法建立需求管理体系，将需求贯彻于研发过程始终，基于需求进行项目及任务的策划和分解，研发中及时获取需求变更信息，并及时对需求指标进行验证和检查。

通过基于系统工程思想的平台框架的构建，实现型号产品的顶层策划和工作结构分解，将过程管理、质量管理、知识工程与企业真实的研制任务（设计、仿真、试验验证）关联，以研制任务工作包为基本单元对交付质量进行定义、监控和评估，对所涉及的知识、方法、手段、工具进行封装，形成开放性的架构^[2]，实现航空发动机研制的标准化和规范化，并提供平台可持续发展能力，支持新系统、新工具、新知识的持续接入，适应研制水平和计算机技术的快速发展。

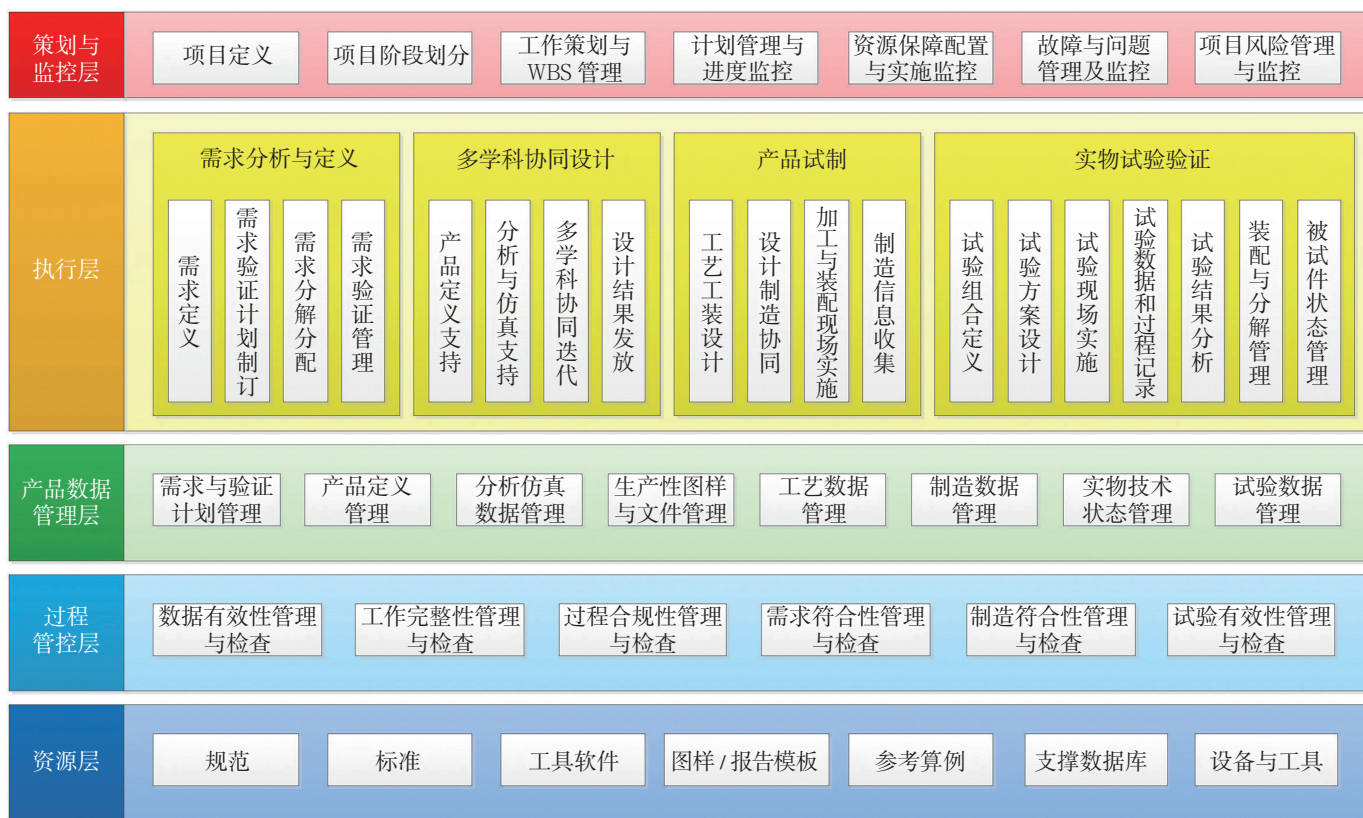


图1 平台功能架构

通过基于产品对象的统一数据中心的构建，使航空发动机研制活动过程数据及文件通过数据中心形成内部业务逻辑关系和全面的企业产品数据管理。

通过知识工程系统的构建，实现知识与设计工作的直接关联以及知识的复用，形成与设计工作紧密结合的航空发动机产品设计知识体系，打造航空动力知识工程。

管理与实施

团队运行模式

在组织团队层面，当项目启动后，项目负责人在团队模型的指导下，综合考虑可利用的人力资源与产品研制任务，面向产品对象组建项目团队。项目负责人根据项目工作任务分解结构，配置任务包的人

力资源需求，包含对能力和经验的需求，同时根据工作计划确定人员的工作周期及需要投入的精力比例，形成项目人力资源需求报告，经决策通过后在项目中实施。项目团队根据产品研制任务由各部门成员共同组成，根据产品研发特点及需求组建不同层级的集成产品开发团队（IPT）进行动态管理，各级负责人根据实际研发需求进行项目团队成员的实时、动态调整，各科室、部门提供资源保障及调度，保证人力资源的最大化利用，如项目范围扩展后补充团队成员、项目任务结束后释放人力资源等。在团队的筹备、组建、变更、运作及考核中，均利用了数据中心的项目实时数据，以用户最新需求和项目实际进展情况作为依据，灵活配置，动态调整。

研制策划

在研制策划层面，通过功能和架构设计逐级分解分配用户需求，实现需求牵引的研制策划。通过实践基于模型的系统工程，实现研发全过程各业务域的模型化，构建基于模型的研发能力，在用户需求牵引指导下开展研制策划、实施及验证工作。由系统工程师综合分析产品需求，在需求、需求验证计划模板支持下，根据项目实际情况实例化生成项目需求及验证计划，并在数据中心统一存储。团队各级负责人根据项目需求及验证计划，依据预定义的验证关系、数据关系等实例化生成项目实际工作分解结构，形成产品数据定义。之后，由项目实际工作分解结构形成项目计划并做出资源匹配，形成与产品数据相

互关联、可执行的项目计划。完成项目的组织和策划后，将任务关联工作包并完成任务指派。在完成任任务指派后，项目各级成员均能在数据中心实时查看到项目策划的全部信息，并能够根据工作项输入输出数据的版本和状态，实时驱动工作项的状态。

项目实施

在任务执行层面，各项目成员以数据中心为纽带，通过数据流转驱动项目协同工作。产品研发团队采用集成产品开发团队模式运行，是有明确共同目标的跨部门团队，团队内部实行分层分级及动态管理，团队具有技术决策权及相关的管理权限。产品研发团队以产品研发为主责，工作重点为产品研发过程中各业务域的策划及实施，对产品研发的业务结果负责。多学科协同设计场景见图2。

设计人员在接受任务后，由产品数据中心获取数据，依据唯一数据源，在面向端到端的流程工作APP化^[2]的工作包中开展实际设计工作；通过内部迭代的形式完成多专业协同的设计工作，项目团队共

享数据，并行开展设计工作，按版本有效性控制数据的唯一性和有效性，将技术流程体现为数据流。

通过建立设计制造联合研制团队，共享设计过程和工艺准备数据，设计工艺工作协同开展，共同确认状态作为下阶段工作输入；工艺参与设计，提前解决可制造性问题；设计参与工艺，提前确认工艺设计符合性。

试验方面，建立需求—试验端到端的业务流程，与设计—制造协同类似，试验人员参与设计过程，提前准备，缩短周期，在研发全过程通过数据共享协同工作；制造/试验/维修工程师完成工作后，将结果返回给设计师，进行基于数据共享的迭代工作。

在设计的全过程中，用户需求产生变更时，平台支持对需求验证计划进行动态配置、快速变更，保证设计工作可以随时根据用户需求新增、调整或删减。多学科协同设计的典型应用场景如图3所示。

成效与展望

基于系统工程和需求工程设计思想，

结合前期项目的建设基础，整合已有的工具软件、信息系统、设计方法、软硬件资源，构建出航空发动机研发系统平台体系。通过对平台开发及实施，实现了以下变革成效。

基于模型的系统工程应用。实现了以需求为牵引的研制工作策划，通过基于系统工程思想的平台框架的构建，将过程管理、质量管理、知识工程与真实的研制任务关联；通过基于产品对象的统一数据中心的构建，使航空发动机研制活动过程数据及文件通过数据中心形成内部业务逻辑关系，支持项目、任务、人员、工具等信息构成的统一关联数据库，形成全面的企业产品数据管理，能够有效支撑决策机构进行科学决策，满足用户需求多变情况下的及时调整，使得决策有依据，有准则。

基于数据流的任务动态调控技术。在平台中，每一活动项均只与数据中心产生数据交互，从数据中心获取所需输入，输出上传至数据中心，下游活动项也仅有数据中心这一唯一数据源。将需求、需求验证计划、工作项等全部活动项依托数据关系进行关联，依据用户需求灵活配置，需求变更随时动态调整，实现流程运行与动态调控。

融入流程的知识精准利用技术。在平台中，根据一定产品业务逻辑，对专业领域的工具、方法、流程及知识进行整合，形成专业应用模块及专业应用系统，实现航空发动机研制过程的标准化和规范化。在此过程中，将知识直接推送至流程相关的专业模块中，设计人员无须人为检索、查找，所需的信息均可一站式获取，知识的利用从被动转变

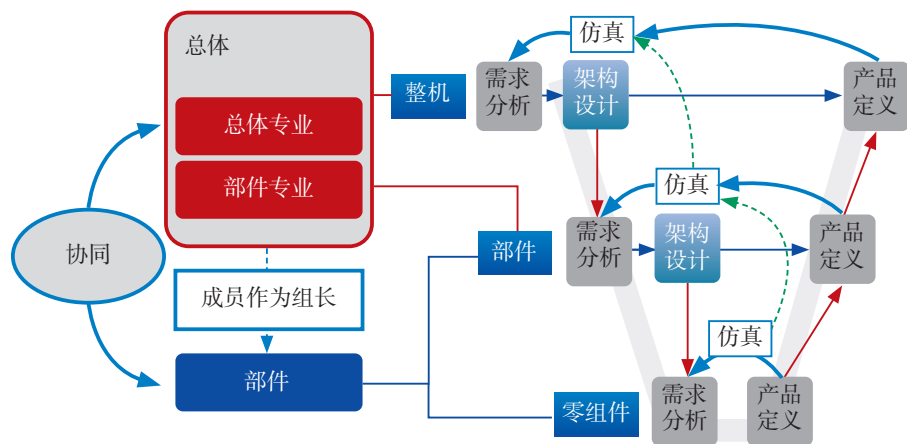


图2 多学科协同设计

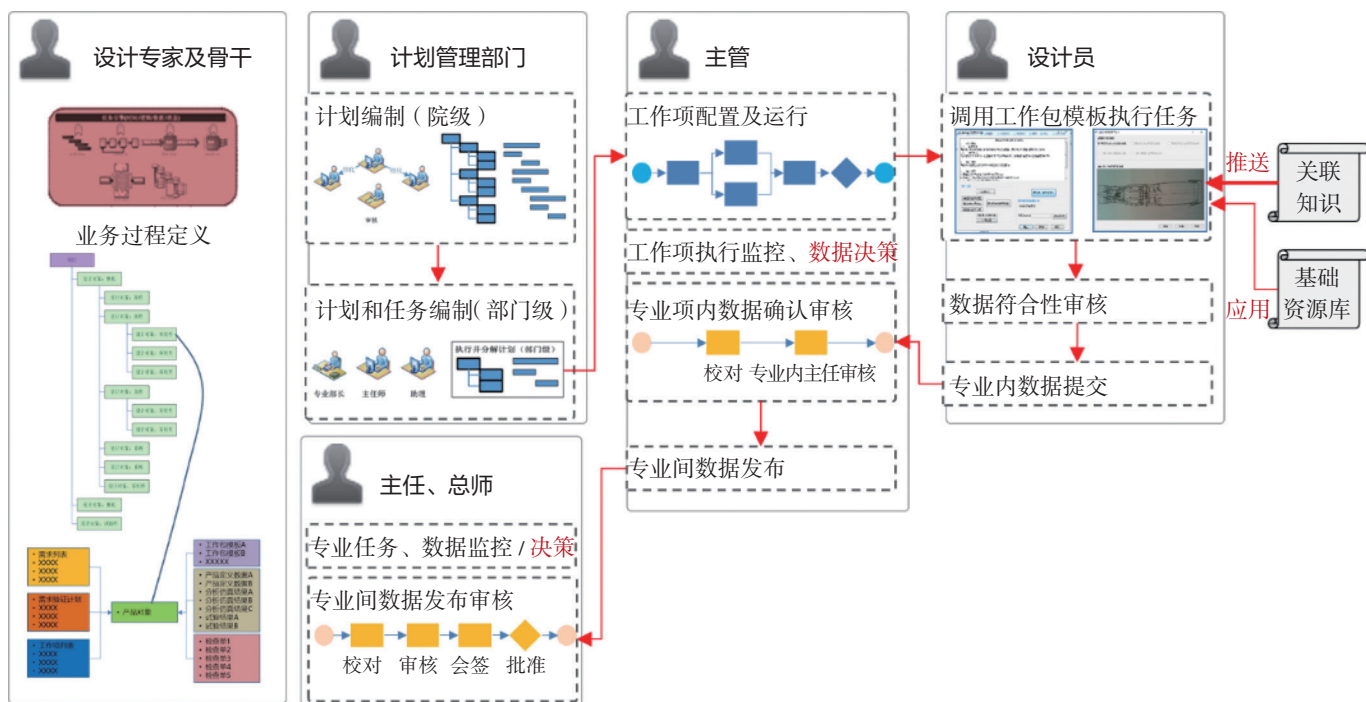


图3 多学科协同设计

为主动，发生了根本性的变化，大幅度提高了知识的利用率。

基于需求的过程管控技术。在平台中，发动机总体需求自顶向下进行逐级细分，通过各层级的逻辑关系和数据关系，形成模块化的需求模型，并通过产品对象模板实现对需求模板的分类管理^[1]。在项目策划阶段能够快速生成结构化的产品需求。通过结合产品研制各阶段过程的特点，使研发人员始终明白具体任务和工作依据，严格遵守需求版本和需求变更管理规范，保证需求可验证和需求演变的可追踪性，最终由各级管控人员信息来源集中，且有效性、及时性也得到保证。

工作模式变革。通过平台的实施应用，保障了跨地域、跨专业、跨部门的协同工作模式变革；使得工作模式由传统的线性模式向并行模式转变，有利于项目快速迭代，

缩短研制周期；通过航空发动机全过程数据的掌握，能够对策划、设计、试制、试验等的全流程工作进行量化管理，便于对团队运作情况进行考核，且能够在同一平台中通过数据关系实现过程质量管控；通过对全流程工作的量化管理，实现了团队资源的动态调整，避免人力资源浪费，提高了全员劳动生产率。

结束语

通过平台的建设和应用，能够缩短项目研制周期，加速研制过程迭代，减少了实物试验，最终实现缩短单轮研制迭代周期，并大幅度节约了人力成本及试验费用；通过对多次试验集合的试验科目整体进行考察，试验一次成功率大幅提升；同时，由于实物试验需求减少，仿真分析和虚实结合的精度提高，减少了所需试验件的试制数量，单轮

次试验件从方案论证策划到研制加工，最终完成验证并交付的综合周期缩短数月，进一步节约了综合成本。平台从基于需求的研制工作分解分配、基于数据的任务动态调控和基于研发流程的知识精准推送等几方面入手，解决了航空发动机研发环节面临的一系列实际问题与痛点。

航空动力

(李坤，中国航发涡轮院，工程师，主要从事航空发动机研发体系及信息化建设与研究)

参考文献

- [1] 李伦未,王小瑞,蔡祥,等.航空涡喷涡扇发动机研制通用WBS构建和应用[J].航空标准化与质量,2015(2): 5.
- [2] 张舰.我国工业APP发展的特征、前景及建议[J].中国经贸导刊,2021(22): 41-44.