

基于 PACE理论的航空发动机研发体系架构

Aero Engine R&D System Architecture Based on Product and Cycle-Time Excellence

■ 刘晓松 王相平 张德志 / 中国航发动动力所 孙永娜 / 中国航发研究院

PACE理论，即产品及周期优化法，为产品研发提供了一套标准的参考模式，对产品研发周期、成本、质量的提升收益巨大，也可使航空发动机产品研发体系架构更加科学、合理。

航空发动机研制能力的提升，不仅仅是单项技术能力的提升，更重要的是构建健全的研发体系，把先进产品的研发理念和成功经验进行结构化的整合，形成一系列可供型号重复使用的业务模型、流程、方法工具、信息化系统等要素，为产品研发提供正确的、规范化的研发模式，以及匹配研发模式的成熟技术能力，支撑最优的产品研发。

我国航空发动机研发体系，在深度和广度方面逐步扩展，架构逐渐清晰，构建了大量的技术流程和基础能力要素，在规范产品研发过程、承载研发能力、指导产品开发上起到了重要的作用，有效支撑多个型号研制及技术预研。

本文针对航空发动机产品研发体系前期建设情况，分析体系架构的演变历程及存在的问题，基于PACE理论，即产品及周期优化法，提出研发体系顶层架构，保障研发体系建设的完整性和协调性，为研发体系后续建设与完善提供借鉴。

研发体系架构的演变历程

我国航空发动机研发体系建设情况可划分为3个主要阶段，包括围绕能力要素建设的设计体系建设时期；以专业流程为核心的研发技术体系

建设时期；基于系统工程的产品研发体系时期。

围绕能力要素建设的设计体系

该时期主要侧重于设计领域专业层面的规范、软件、数据库等能力要素建设，目的是积累前期型号研制经验，提升专业技术能力。提出了“规范、软件、数据库”+“集成”的“3+1”能力要素构成，建立了一系列面向产品研发全专业的设计规范、专业设计软件、设计数据库，以及若干专业设计系统。

该时期体系架构的主要问题是仅给出了体系中底层能力要素的分类，缺少牵引体系建设的主线，对设计体系应该建多少要素缺乏统筹规划，体系架构相对薄弱。虽然体系承载的专业技术能力得到了显著提升，但专业间协同能力相对薄弱。此外，对试验、制造、保障、管理等方面涉及较少，相互之间协同薄弱。

以专业流程为核心的研发技术体系

随着体系建设的深入开展，逐渐认识到体系不仅仅是各类要素的堆砌，更要紧密围绕产品的研发过

程开展建设；在提升专业能力的同时，加强专业间协同能力的建设。因此，在体系建设过程中提出了以流程为核心的研发技术体系架构，并从设计领域扩展为涵盖设计和试验领域。

在架构上，将研发体系划分为设计体系、试验体系，再往下细分为若干专业子体系；各专业子体系均包含专业流程、工具和资源，其中流程是牵引基础能力要素的主线，流程的主体是专业流程，主要基于专业的业务现状进行梳理形成。在专业流程基础上，通过构建专业间的数据接口文件，提升专业间协同能力。

这一时期的体系架构明确提出构建发动机技术流程，以流程为核心牵引能力要素的建设，体系的完整性和指导作用得到显著提升。但仍是面向专业建立的研发技术体系，侧重于专业层面建设，对完整性缺乏有效的判定，导致基础能力建设不完整。此外，侧重于产品研发的技术体系建设，未考虑研发管理方面的流程及能力要素建设。

基于系统工程的产品研发体系

在前期以流程为核心的体系建设思路基础上，引入了系统工程方法论作指导，由面向专业转变为面

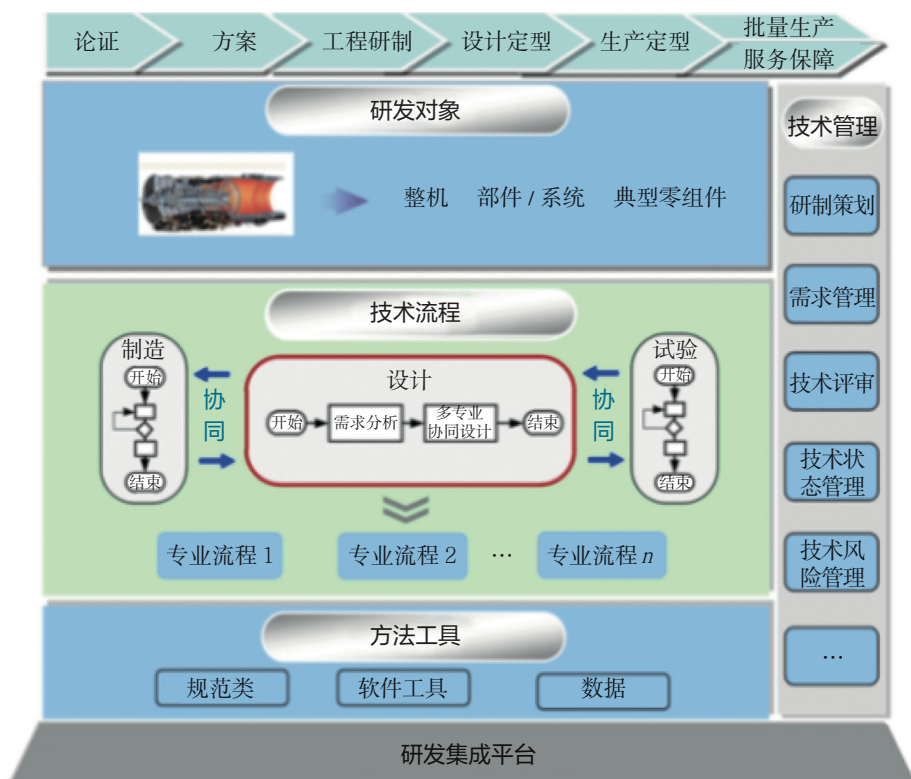


图1 基于系统工程的研发体系架构

向产品研发对象的体系建设，由设计、试验两个主业务域建设，拓展为覆盖全生命周期的各个业务域，并强调技术和技术管理并重，体系的科学性、完整性得到进一步提升。

在架构上，将研发体系构成划分为产品研制程序、面向对象技术流程、技术基础要素、技术管理要素、信息化集成平台六大要素，并理清了各要素之间的关系（见图1）。

其中，流程作为研发体系的主线，以系统工程为指导，构建了“双V”模型流程架构，支撑产品跨专业协同流程建设。

与上一时期相比，该时期的体系架构对体系的组成更细致清晰，并首次提出以研发对象通用需求为牵引，构建覆盖设计、制造、试验、质量、技术管理等领域的协同流程，牵引技术基础能力要素、技术管理

能力要素的建设，产品的跨专业协同能力得到显著提升，专业技术能力更完整。在体系的能力要素建设上，虽然考虑了技术和技术管理能力要素，但技术管理仅是研发管理范畴的一部分，体系在项目管理能力要素的建设上，考虑不足。此外，在体系覆盖范围的完整性上，主要侧重于单个产品的研发，未实现对企业层面多项目间的优化整合，实现战略收益的优化。

架构演变历程分析

通过分析国内航空发动机研发体系建设历程，不难发现体系建设的本质就是构建流程体系、再基于流程构建能力要素的过程。因此，流程是体系架构的核心，在架构的指导下，从最初的流程不显性、到基于经验构建专业流程、再到基于系统工程构建研发对象的协同流程，

流程的完整性、协同性、操作性得到了逐步的提升，在其牵引下，体系能力要素的不断丰富和完善。

因此，在后续的研发架构的优化设计上，其重点仍要放在流程体系的定义上。而PACE理论实质上是定义了最佳实践的产品开发流程，被许多公司作为最佳实践的模型用于改进产品的开发流程，因此基于PACE理论指导行业内研发体系的架构设计在理论上是可行的。

PACE理论介绍

PACE理论是PRTM公司于1986年提出的，目前已经成为产品开发的标准化流程参考模式，提供了一个通用的框架、标准的术语、普适的流程基准，一个最佳实践的方法以及一个用于持续改进的流程^[1]。将产品研发所涉及的流程、组织结构、开发活动、技术、工具等要素结构化地综合在一起，为产品开发提供一种成功的途径。

PACE理论将产品研发模式划分为4个阶段，如图2所示。其中最后一个阶段是企业研发模式变革的最终目标。其中，零阶段是非正式的研发模式，产品开发时一个非正式的、随意的过程，企业缺乏项目管理的技巧；第一阶段以职能为核心的开发模式，产品开发和责任被分配到各职能部门，协调工作艰难费时；第二阶段是跨职能的开发模式，以项目为单位，产品开发和责任在多层面上进行跨部门的整合，其结果是缩短研制周期，减少无效开发；第三阶段是企业范围内产品开发的整合，在整个企业或跨项目层面进行整体规划，将产品战略、技术策划与产品开发联系起来，取

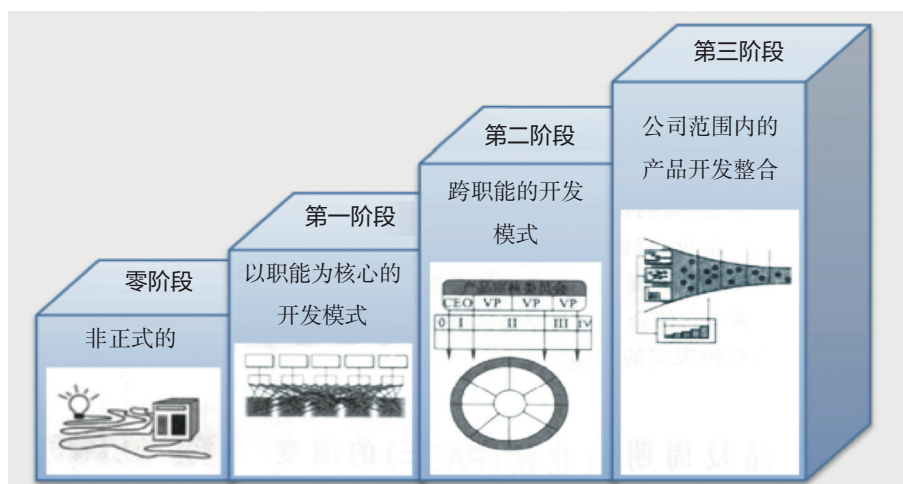


图2 产品研发模式的阶段划分

得战略收益的最优化。

考虑到PACE理论的作用与当前国内航空发动机研发领域推行的研发体系建设的目的和作用是一致的，及其在国外应用的成功经验，基于PACE理论重新审视当前航空发动机研发体系架构，解决目前体系中存在的问题是可行的。

品规划、技术规划、产品开发、技术开发等，在能力要素构成上要涵盖技术要素和研发管理要素。经过对比，前期研发体系主要侧重于产品开发，在战略、规划、技术开发方面的建设相对不足，在能力要素

建设上主要侧重于技术要素和技术管理要素，研发管理类要素建设比较薄弱。

因此，航空发动机的研发体系架构的优化完善要在原有架构基础上，扩充战略、规划、技术开发等缺失的业务范围，在能力要素建设上增加研发管理等体系要素，研发体系的顶层架构如图3所示。

架构的顶层为企业的产品战略目标，是企业未来产品发展的策略和全景视图。中间层为支撑企业产品战略目标实现的产品规划和技术规划，规划产品和技术的近、中、远期的主要型号/项目。其中产品规划与技术规划是互锁的，产品规划牵引出技术需求，形成技术规划；通过技术规划的实施保证在适当的时机提供成熟的技术支撑产品的开

研发体系架构设计

顶层架构分析与设计

当前，国内航空发动机研发模式已初步形成了结构化的、相对清晰的流程，以及配套的组织、技术要素、工具等。产品的研发主要是以单个项目为单位，在产品开发和管理的整合，提升产品的研发效率、降低成本。

对照PACE理论提出的产品研发模式的4个阶段，行业内大体上处于“第二阶段”初期，即跨职能的开发模式。

从第二阶段向第三阶段跨越是对企业成员单位的要求，也是能力提升的必然趋势。以PACE理论提出的研发模式第三阶段为目标，研发体系在范围上要涵盖产品战略、产

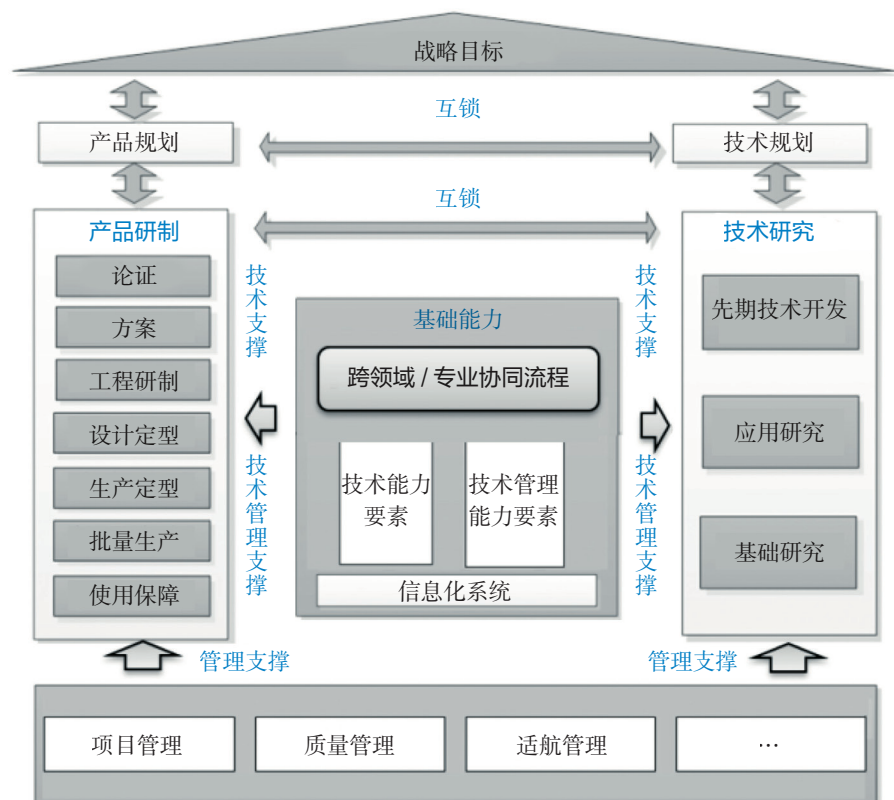


图3 基于PACE理论的研发体系顶层架构

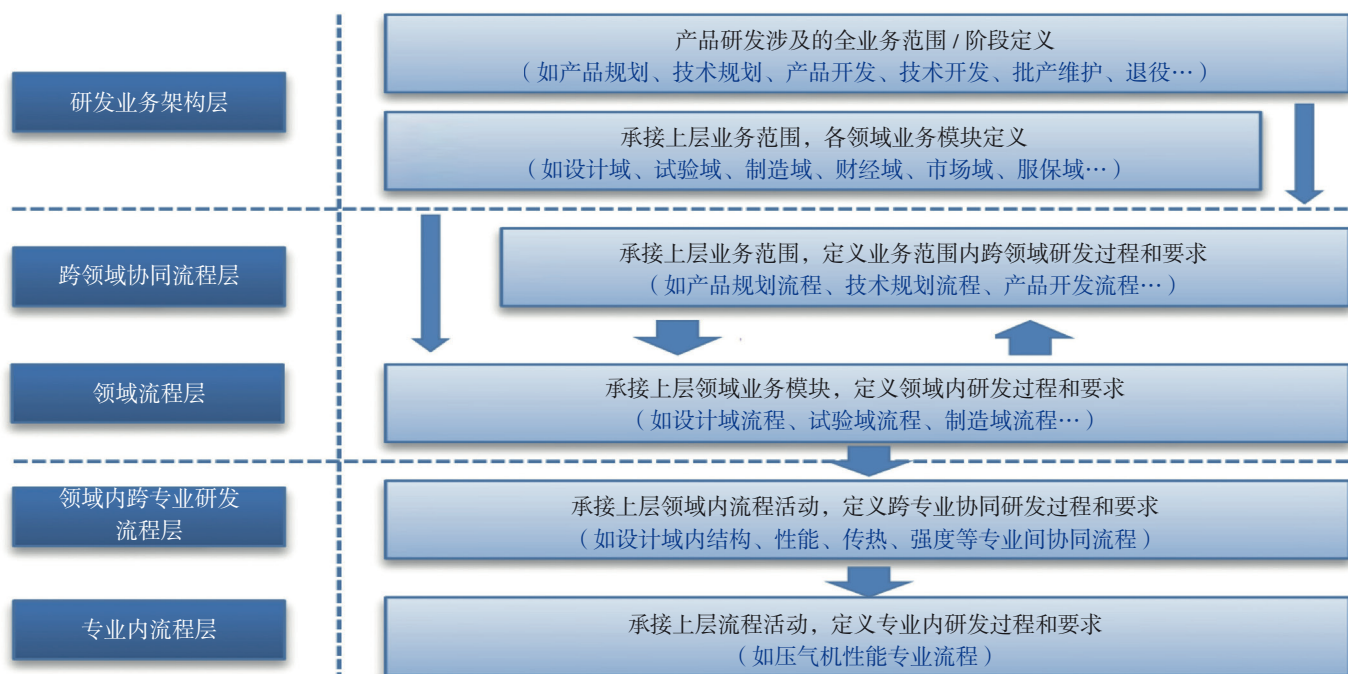


图4 流程架构逻辑

发。底层是研发体系的核心能力, 包含支撑产品开发、技术开发、产品规划、技术规划所需的协同流程、技术基础能力、技术管理能力以及项目管理能力。该层级的主线仍是流程, 牵引能力的建设。

流程架构分析与设计

参考PACE理论对流程的定义, 结合发动机研制的多领域、多专业的耦合特点, 流程架构分为5个主要层级, 包括研发业务架构层、跨领域协同流程层、领域流程层、领域内跨专业研发流程层和专业内流程层, 如图4所示。

研发业务架构层主要定义航空发动机研发业务的分类、分层, 清晰定义各层级业务模块范围, 应包含规划、产品开发、技术开发等业务, 各业务可进一步细分为各领域的业务模块。

跨领域协同流程层主要承接业务架构层中具体的业务/阶段定义, 定义业务范围内的跨领域协同过程

的要求, 通过设置若干评审点实现领域之间的协同。

领域流程层承接业务架构层中具体的领域业务定义, 定义领域内研发过程和要求, 其评审点设置与跨领域协同流程层一致。

领域内跨专业研发流程层是基于上层领域流程中具体的活动, 进一步展开为领域内跨专业的协同过程, 流程活动颗粒度一般要求到领域内某一专业独立承接即可。

专业内流程层是承接跨专业协同流程层中的流程活动, 展开为某一专业内的流程, 流程活动颗粒度一般要求到可由单人承接或独立工具支撑即可。

基础能力要素架构分析与设计

通过流程体系能够完整定义航空发动机全业务、全领域的研发过程, 基础能力要素只需结合各层级流程活动, 匹配建设即可。

基础能力要素按作用可划分为

技术、技术管理、项目管理三大类。按要素载体形式可分为输入/输出数据要求、方法、工具、数据库、标准、制度等基础能力要素。

结束语

航空发动机研发体系架构是研发体系建设的蓝图, 架构建设不是一蹴而就的, 更不是一成不变的, 其覆盖的范围、构成、运行模式等是随着研发人员和体系建设人员认识的不断深入而螺旋迭代上升的。作为众多企业普遍接受且广泛用于实践的理论, PACE理论在产品研发的周期、成本、生产力、收益方面的提升成效显著。因此, 指导构建研发体系架构符合行业当前的发展趋势, 能够解决当前体系架构的问题。

航空动力

(刘晓松, 中国航发动力所, 高级工程师, 主要从事系统工程、航空发动机研发体系建设研究)