

航空动力控制系统研发管理变革

Management Reform on Research & Development of Aero Engine Power Control System

■ 姚华/中国航发动控所

航空发动机控制系统的研发是一项复杂的系统工程，在我国起步较晚，基础薄弱，研发管理较为落后。随着项目的增多，研发工作陷入效率低、周期长、故障多的恶性循环。为此，中国航发动控所进行了研发管理变革的探索和实践，取得了一定的效果。

自 20世纪80年代，我国开始研究航空发动机全权限数字式电子控制（FADEC）系统；2002年，完成了首个航空发动机FADEC系统试飞演示验证；2010年，我国首套航空发动机FADEC系统完成了设计定型。之后，新研发发动机大都采用了FADEC系统，项目逐年增加，最多时有几十个型号项目同时开展研制，各种故障层出不穷，使航空动力控制系统的研发一度陷入困境，其中较为突出的是管理问题。

表1 研发管理水平各等级的主要特征

等级 维度	级别1	级别2	级别3	级别4	级别5
能力表现	个人能力	功能能力	协调能力	平台能力	世界级能力
结构	不明确 不清晰	职能化	跨部门团队	异步开发的 组织平台	跨企业的 虚拟团队
流程	无纪律状态	各职能的 工作流程	统一的 跨部门流程	流程成为 战略优势	集成的 开发链管理
项目管理	无原则性	协调不畅	高效协作	管道平衡、 高效	跨地域、虚拟 的项目管理
产品战略及规划	无	无原则性 流于形式	有效引导 产品开发	杠杆利用 产品平台	创意管理、动 态仿真、突破 性技术创新

航空动力控制系统研发困境的原因分析

航空动力控制系统研发困境的主要原因还是研发管理水平的落后。国际上对研发管理水平用5个等级来评价，各等级的主要特征如表1所示。

我国的航空动力控制系统的研发采用了典型的职能化结构，各专业的功能能力已基本建立，项目管理的责权主要分配到各职能部门，但各专业部门的工作流程不成体系、没有显性化，缺统一的跨越部门的流程支持，

协调不畅，无有效的产品发展战略。对照表1，航空动力控制系统研发管理水平处于1~2级，主要问题具体表现在以下几个方面：缺乏完整的系统工程的研发理念；缺乏规范化、操作性强的流程及有效评审；缺乏标准化的共享模块和知识积累及共享机制；产品发展缺乏规划，没有形成产品系列化发展平台；对核心技术缺乏有效的识别和管理。

航空动力控制系统研发的

变革

研发活动是一项知识劳动者的活动，如何对知识劳动者进行管理是需要破解的问题。针对存在的问题，中国航发动控所引入科学管理理念，从五个方面实施研发变革。

按系统工程方法构建研发体系

航空发动机控制系统的研发一般包括预先研究阶段和型号研制两个阶段。预先研究是解决技术成熟度1~4级的问题，型号研制解决技术成熟度4~9级的问题。

预先研究包括基础研究和应用

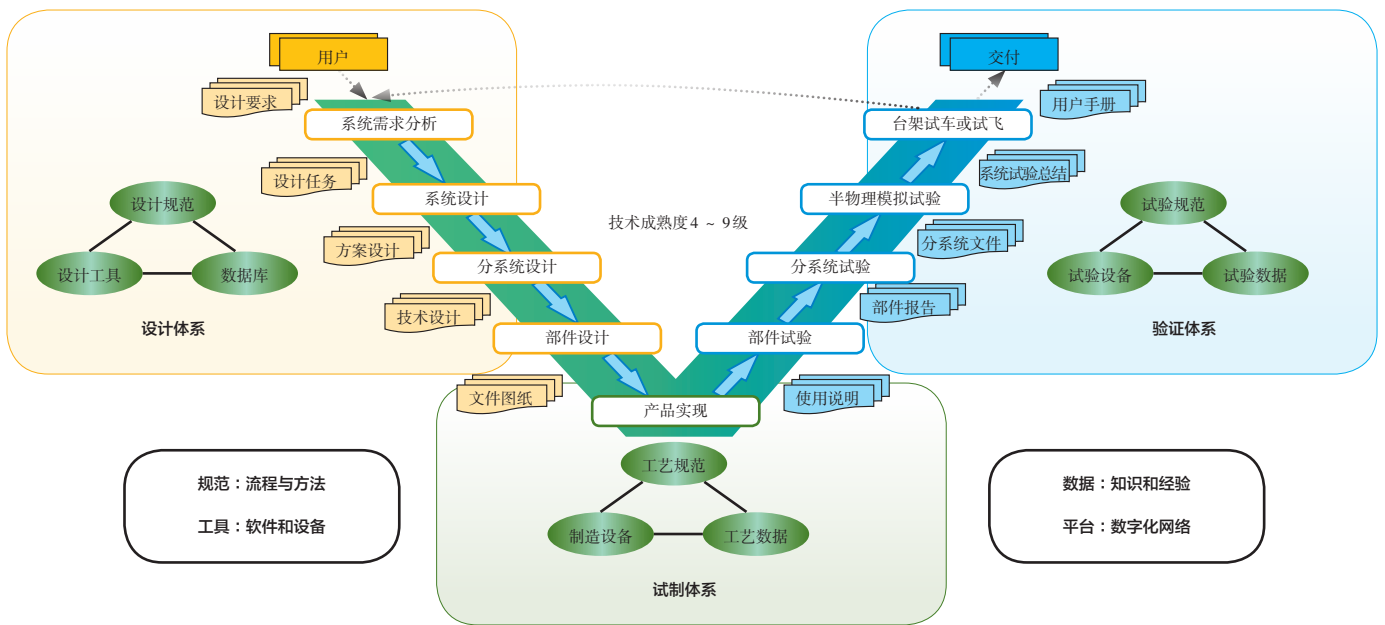


图1 控制系统型号研制阶段的研发模型

基础研究。提出新的原理并进行试验验证，这是预先研究阶段的特点，预研阶段的研发体系就是要支撑这种创新能力，因此可以称为技术创新体系。技术创新体系主要包含三个要素：技术创新的方法和平台、开放合作探索研究的模式、创新导向的机制政策。

型号研制是产品研制的重要阶段，包括产品需求、设计、试制、试验、定型交付等过程。航空发动机FADEC系统研制是一项复杂的系统工程，可以用如图1所示的V形模型来描述。

构建由技术创新体系、设计体系、试制体系和验证体系组成的航空动力控制系统的研发体系是解决研发困境的系统方案。其中，设计体系又是系统解决方案中的重点和核心。

设计体系的结构构建方法可以参照系统工程的霍尔三维结构模型，建立设计体系的三维结构模型，如

图2所示。设计体系的三维结构模型体现了系统工程方法，在每个阶段的工作内容包括用户域（如研制要求、需求分析等）、功能域（如系统功能、性能设计、控制律设计、系统仿真等）、物理域（如系统结构、

电路结构、液压机械结构等）、过程域（如设计审查、样机试制、产品检验等）。在这些设计过程中，对应的知识可以指导设计活动。

构建设计体系工作模型

三维结构模型细化后，得到设

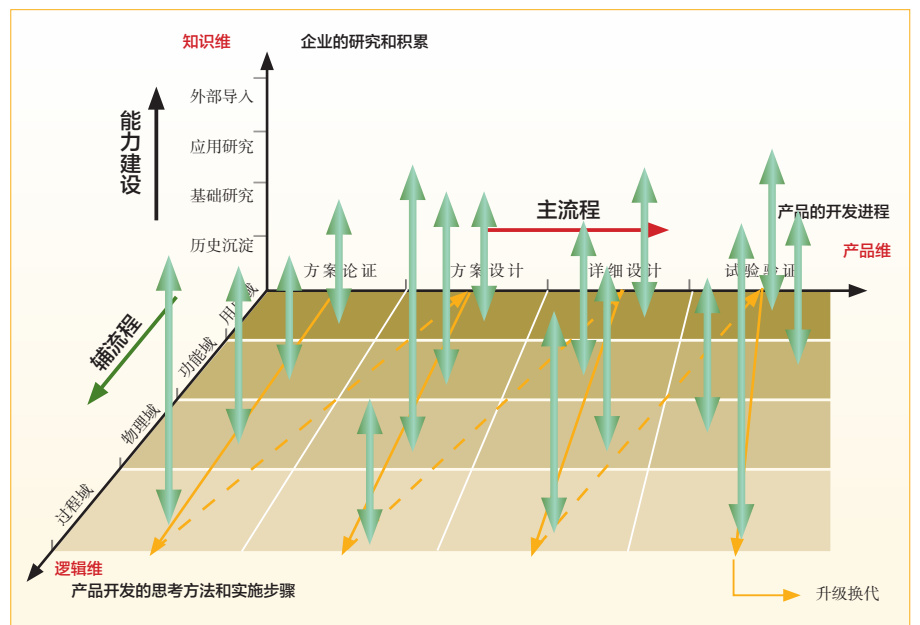


图2 设计体系的三维结构模型

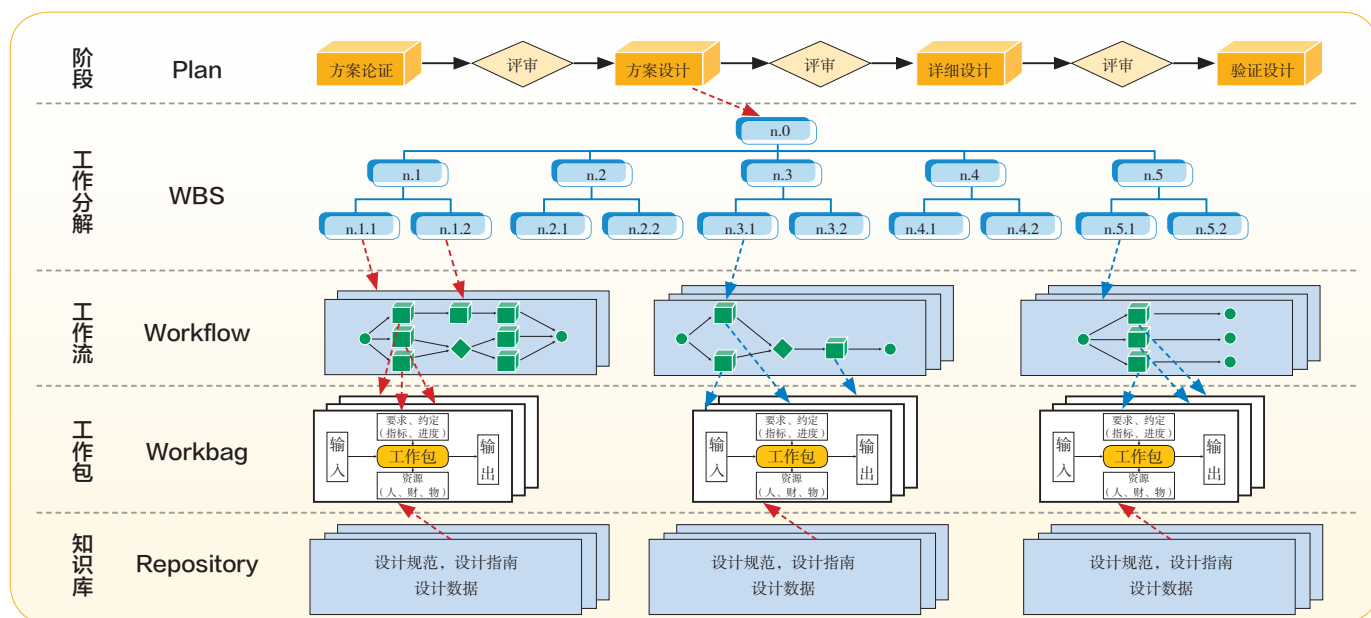


图3 设计体系工作模型

计体系的工作模型，如图3所示。

以方案设计阶段为例，按用户域、功能域、物理域和过程域对方案设计进行工作分解。工作分解属于管理层面，主要针对研发的状态和结果，提出工作分解结构和指标

要求，产品类型决定了流程的形态，流程具有一定的刚性。对工作分解中的每一项工作建立相应的工作流，工作流是实现层面，主要针对研发活动的具体执行过程，落实指标达成，工作流具有一定的柔性，取决

于研发组织的工作模式及工具能力。对工作流中的每一个节点制定工作包，工作包是设计体系的灵魂，工作包中规定了工作任务、完成该项任务的输入和输出、该任务的指标要求、遵循的标准和规范、完成的进度和质量要求、完成该任务所需要的资源（人、财、物），以及支持该任务完成的知识 and 工具。知识和工具是工作包的核心，工具主要是指完成任务所使用的设计、计算、仿真、计算机辅助设计（CAD）等通用和专业工具软件。

图4表明了设计系统与多项目管理（MPM）、数据管理系统（PDM）、设计工具、知识管理系统和质量管理系统之间的交换关系。广义的设计体系包含上述所有系统，狭义设计体系为设计系统、设计工具和知识管理系统的集合。

建立具有共享特征的产品平台

产品平台是整个系列产品所采用的共同要素的集合，包括共用的

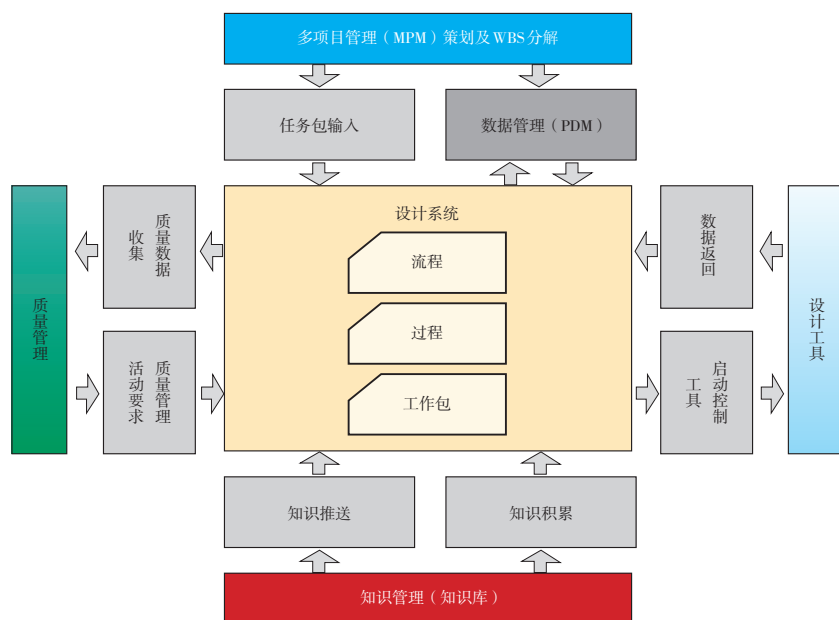


图4 设计系统与其他系统的关系

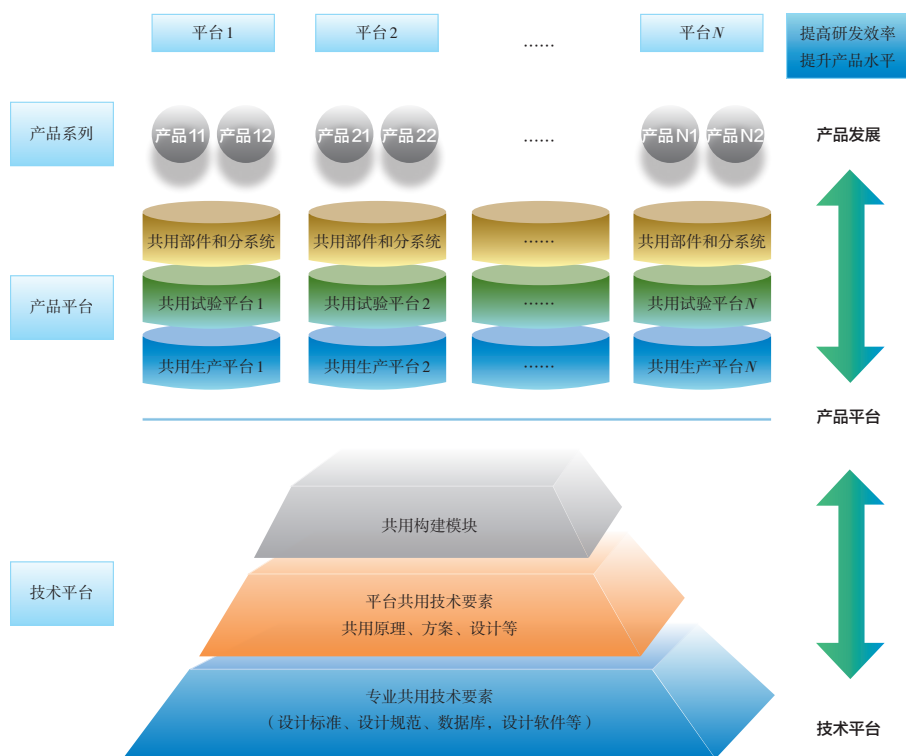


图5 产品平台的总体架构

基本架构、子系统、模块或组件、关键技术，换而言之，产品平台就是系列产品所共用的基本组件及基本技术。产品平台是产品战略的核心环节：一方面，它明确了实现核心战略愿景的基本架构，是动控所战略愿景的承载平台；另一方面，它为产品线战略奠定了基础，将战略愿景具体化，同时也为动控所设计产品线战略提供了指导，起到了承上启下的作用。对上，产品平台要承接发动机需求的不断变化；对下，它要能够把技术平台上的所有技术整合起来。

新产品的研发过程就是在产品平台上对专用技术和共用技术有机组合的过程。技术平台把研制新产品所需要的关键技术提前准备好，由此，产品平台只需要把这些关键技术与发动机需求有机结合起来就

可以形成新产品。产品平台在发动机需求与技术之间起到了一个相互承接的作用，其本身是组织核心技术

技术和共用技术积累而成的。

根据发动机控制系统的特点，产品平台总体架构如图5所示。最底层是共用技术平台，是各产品平台共用的技术要素和技术资源，设计体系就是这些共用技术的集合。产品平台主要按共用部件、共用分系统、共用试验平台、共用生产平台来划分，产品平台支撑产品线，产品线上的产品具有基本相同的系统架构，根据发动机要求的差异，在产品线上衍生发展系列产品。向上，技术平台支撑产品平台，产品平台支撑产品发展，从而提高研发效率，提升产品水平；向下，产品发展牵引平台发展，平台发展牵引技术发展，促进构建共用技术，实现知识共享。

其中，共用构建模块（CBB）是指可以在不同产品、系统间共用、并可在制造物料清单（BOM）中体现的零部件、功能模块，以及被专业确认或认可、以设计数据存在、可在不同产品和系统设计中调用、

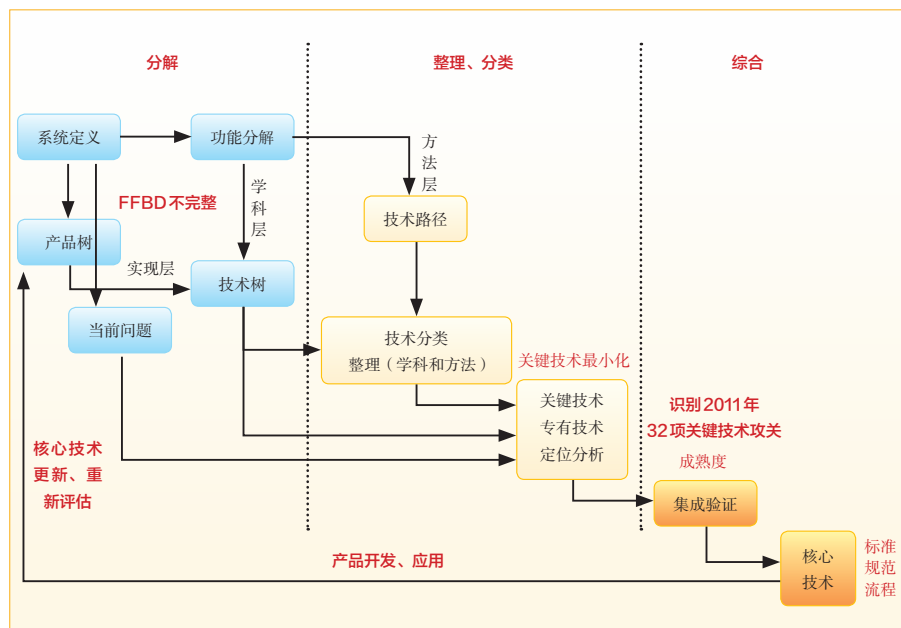


图6 基于FFBD的技术树分解活动

形成固定原理和架构的软硬件功能模块，是产品平台的重要技术要素。CBB一定是成熟的技术和标准模块，并且不需要再验证和再测试，使用CBB可以提高设计效率，减少低级错误。

核心技术和关键技术的管理方法

核心技术是产品的关键性或基础性技术，是组织独有的、不可替代的、竞争对手难以模仿的技术，是产品广泛应用的并成为竞争力的基础的技术；而关键技术不一定是核心技术，但关键技术不突破，产品就不能成功。因此，核心技术和关键技术的管理对产品的发展非常重要。

对核心技术和关键技术的管理主要包括两个方面：一是通过技术树的梳理，得到完整的核心技术和关键技术清单；二是对已掌握的核心技术模块化和标准化，对未突破的核心技术和关键技术进行技术攻关。

技术树梳理采用功能技术特性分解定义方法（FFBD），将产品功能有序转化为技术需求，如图6所示。产品功能是由技术实现的，顶级系统功能决定了产品实现技术，产品结构分解形成产品树，对产品实现技术分解形成技术树。产品树上的每一个部件都有独特的功能和实现功能的技术，对技术的可实施性进行逐一检查，要求外部分解到可找到成熟技术，内部分解到员工可按规范实施的程度，将每个部件、功能、技术进行整理归类，可发现共性技术、短板（关键）技术和不同的技术路径。

核心技术的形成按FFBD方法经过分解和整理、归类和攻关及集成验证等三个过程的循环迭代而不断累积、加强。组织关键技术攻关应按照目的明确、路径清楚、过程可控、交

付物可测试、符合性准则可量化的SMART目标管理原则，组织立项评审，纳入计划考核。

评审的有效性管理方法

针对评审有效性问题，结合GE公司主审官制度和华为公司主审人制度的最佳实践，在三个方面对传统评审体系和方法进行了变革。

明确专家责任，建立主审人责任制。每个项目、每个部件明确主审人，形成“高手”互评的机制，使用权、经验和教训共享；对专家意见和参与度进行绩效考核；主审人要对应评审意见的正确性负责。

明确评审有效性测量标准。改进评估方式，从评审计划执行性、评审组织质量、专家参与度、意见有效性、意见落实率等六个方面进行数据统计和分析，寻找不足。

建立结构化的检查单和流程。借鉴适航审查的模式，建立输入、输出、方案、工程设计等系统和部件不同的评审检查单，建立评审标准，实施项目组、预审、评审，保证评审内容的完整性。

研发变革的主要成效

根据动控所的情况，分阶段推进研发管理变革。第一阶段目标是建立以知识驱动的设计体系，以CBB为核心的具有共享机制的产品平台，加强核心技术和关键技术的管理，加强评审的有效性管理。设计体系基本建立后，利用多个项目的设计数据进行了试运行，针对存在的问题，对体系进行了不断完善。

电子专业开始在所有新研项目中应用CBB，电子控制器的研制周期缩短了1/3，元器件种类减少50%。相比过去同样复杂度的项目，

由于低级错误造成的设计更改减少了80%，新研电子控制器外场故障大大降低。软件专业在建立体系后，各项目大量采用通用标准库函数和标准的板级支持包（BSP）驱动程序，使软件的研发效率得到了提高，软件交付后故障率大大降低。

产品平台的建立提高了平台内新研产品的开发速度。例如，利用涡轴平台，将一个已定型的涡轴发动机控制系统的主要部件用于一个新研发发动机的控制系统，软件架构不变，功能进行适当修改，项目人员基本共用、试验设备共用、测试设备共用，半年内就完成了发动机台架试车，在竞争中取得了主动权。

通过对核心技术和关键技术的梳理，形成了达成共识的技术谱系，并对其中的部分关键技术进行了攻关。许多关键技术得到了突破，许多核心技术经过集成验证后成为CBB，在新研项目中得到应用，发挥了作用，新研型号需要补充攻关的项目显著减少。

评审的有效性得到提高，特别是采用评审检查单后，评审的内容更加完整有效，主审专家的责任心更高，评审提出的意见比过去大大增加，评审意见的质量和价值也有提高，评审走形式的情况得到了较大转变。

研发管理变革是一个不断迭代、不断完善的过程，也是中国航发运营体系（AEOS）建设的重要内容。从前期实施的效果表明，AEOS体系建设是正确的方向，应坚定不移向前推进。

航空动力

（姚华，中国航发动控所科技委主任、副所长，研究员，长期从事航空发动机控制系统研究工作。）