

航空发动机研发项目的集成架构体系研究

Integrated Architecture Research of Aero Engine Development Program

■ 冯潼能/中国航发商发

对于像航空发动机这样的复杂技术产品研发项目，需要管理庞大、复杂的数据和信息。不仅要解决复杂的工程技术问题，而且还要建立高效的组织团队和有效的成本控制手段，这一切对于项目管理而言无疑是个巨大的挑战。经验和实践表明，只有建立结构化、模块化的集成体系架构，方能有效地解决此类复杂研发项目的管理问题。

现代航空发动机产品技术复杂、研制过程长，需要众多协作方参与，研发项目需要管理庞大、复杂的数据和信息，只有利用结构化、模块化的集成体系架构，才能实现对项目和产品的业务信息和技术信息进行有组织的收集和共享。

实现复杂产品的集成架构，首先应实现项目管理的结构化，即将复杂的项目任务分解成层次化的树形结构，既要表达模块的独立性也要表达模块间的关系。传统的分解结构包括产品分解结构（Product Breakdown Structure, PBS）、工作分解结构（Work Breakdown Structure, WBS）、组织分解结构（Organization Breakdown Structure, OBS）、成本分解结构（Cost Breakdown Structure, CBS）等。这些架构通常都是由不同的团队按不同的标准和用途独立构建的，彼此不能有效地关联，无法进行统一有效的管理，这是复杂技术产品研发项目管理面临的最大困难。集成这些架构的关键是建立模块化的产品分解结构，再根据产品模块配置相应的工作任务包，建立相应的工作团队，分配相应的资源并进行成本分解，从而达到集成架构的目的。

模块化的设计思想是目前解决复杂技术产品研发的有效手段。模块化的产品设计能够显著降低产品的复杂

性，有效地提高产品的可靠性和维修性，同时还可有效地进行专业分工，使每个模块部件都能采用最新的技术并由最好的团队研发。模块化不仅是为了管理的便利，更是为了适应复杂技术产品研发的趋势。

目前，国际上主流飞机制造商波音公司、空客公司等的产品结构的划分都是基于模块的，国内的C919飞机也采用模块化思想指导其产品结构的划分。在波音737-700飞机的研制中，波音公司构建了基于模块化构型控制的数字化制造信息管理系统（DCAC/MRM）进行生产流程再造。这一系统以全面采用产品数据管理、流程管理、简化构型管理、精简物料管理、实现单一数据源等技术，数字化技术的应用进一步深化。其后波音公司在研制波音787飞机中，采用了基于产品全生命周期管理（PLM）的全球协同环境（Global Collaboration Environment, GCE），通过应用统一的数字化平台、统一的方法和统一的流程，实现了135个工作地点、180个供应商的数字化协同，使波音787飞机的协同研制工作顺利进行。波音公司的GCE支持全球多个国家上百家企业进行协同研制，真正实现了从一个制造企业向系统集成商转型，其基本原理也是基于模块化的集成架构体系。

产品的结构化与模块化

产品分解结构是最常用的架构管理工具，按用途可分为研发用产品分解结构、生产制造用产品分解结构、服务用产品分解结构等，本文仅以研发用产品分解结构为例说明。

产品分解结构的实用表现形式（如报表、结构树等）又称为物料清单（Bill of Materials, BOM）。相应地，研发用产品分解结构、生产制造用产品分解结构、服务用产品分解结构的实用表现形式又称为工程BOM（EBOM）、制造BOM（MBOM）、服务BOM（SBOM）等，而模块化产品分解结构即是模块化BOM。

复杂产品研发的本身可以理解为其子系统及其关系所构成的复杂系统。系统与体系架构的关系如E.雷克廷（E. Rehtin）所描述：“系统的基本要素是关系、界面、形式、配合和功能。体系的基本要素是结构、简化、折中和平衡。”

模块化是指解决复杂问题时自顶向下逐层把复杂系统划分成若干子系统即模块的过程，模块是相对独立的子系统，同样具有关系、界面、形式、配合和功能等系统的基本要素。

素，有多种属性反映其内部特性。

模块具有以下特点：模块具有半自律性；模块之间按一定规则相互联系；通过模块组合，可构成复杂的系统和过程；在实际的工程应用中，模块通常按方式定义；模块是产品所需要的、可重用的零组件和相关元素的逻辑组合；模块包括了该模块产品定义的所有数据：零组件模型、相关元素、规范、技术通报等；模块主要用于构型管理，是一个用于管理的抽象对象，不仅仅是指实物对象；模块可用来满足选项的功能要求。

复杂的航空产品一般使用的产品分解结构、工作分解结构、组织分解结构、成本分解结构等来进行架构管理，为达到集成架构管理的目的，必须建立结构化、模块化的架构体系。模块化的产品架构是在产品研发的系统工程过程中逐步建立和完善的。

将复杂产品或过程按照一定的联系规则分解为可进行独立设计开发的半自律性子系统的工作称为“模块化分解”。模块化后的数据有如下的特点：在模块内部参数、特征和任务高度依赖。而模块之间是相互独立的，通过接口关系来建立模块间关系。对于产品研发来说，模块的独立性和依赖性可以通过设计和任务矩阵来确定。模块化产品结构管理的优势在于模块的重用性和可配置性。

模块化产品架构是一个逻辑上的产品结构，它按照产品的研制目标和业务需求定义了产品规范、模块规范和模块接口规范。模块化架构必须考虑产品的性能、价格、质量的期望值，以及产品的交付成本和进度，同时还要适应产品的研发

体制和资源限制。

模块化架构由两部分定义组成：一部分是将产品规定的功能分解成子功能和承载这些功能的组件；另一部分是这些组件的接口规范。完整的产品由组件及其接口关系组成。接口规范在可配置产品设计中尤为重要，它允许产品替换组件，配置成不同的类型而不需要做额外的工作。

航空发动机构型项的划分方法研究

构型项的概念与用途

由于航空航天产品过于复杂，人员和专业分工细，需要分解成不同的工作来完成。模块化有助于将复杂的工作分解，在实际的航空航天产品研发中，产品的构型管理的模块化是和产品模块化高度相关的，产品模块化是和产品的构型项（CI）划分一致的，也称为模块化产品构型管理。

目前在复杂技术产品构型管理（尤其是航空领域）里所说的CI，泛指模块化构型管理里的模块划分形成的能够单独管理的模块，与通用构型管理标准中所指的CI定义和用途有所差异，是为适应复杂技术产品构型管理衍生出的技术。CI的划分是实现模块化基础，目前国外的波音、空客，国内的商飞、西飞、成飞等公司在其新产品研制中均采用了基于CI的模块化构型管理。

传统的产品装配是将产品整体看成一棵完整的倒树表达（即总装—部装—组件—装配件—零件），既表示装配关系也表示层级、功能、结构分解。这样的结构对构型管理中更改的管理造成很大影响，如果零件或装配件更改，组件也得更改直

至追溯整机更改，方能达到构型管理中的一致性要求（这种现象也称为“更改扩散”或“更改爆炸”），这在实际操作中是无法实现的。

为解决以上问题，必须施行简化的构型管理，将复杂的产品按功能和结构分离面拆解成一个个小型模块（即CI）。产品是通过CI以及CI之间的关系构成，每一个CI都表示为一个可分开研制的实体，它至少完成一个最终使用功能，各个CI具有相当的独立性，可以独立地指派给一个工作包。

CI的划分本质上是基于产品的功能划分，但实际划分时还需考虑到具体产品特点，如结构分离面、更改的影响范围、产品集成方法、装配、试验、外包分工等很多因素，是相当复杂的工作。总之，CI的划分要达到CI内部关系高度聚合、外部低耦合，CI之间接口的复杂性在产品系统内应是最小的，高复杂性常常引起风险和成本的增加。一个CI的所有子装配件应具有共同的功能、任务、安装和研发要求。

在产品研发中，实际影响全局的更改很少，零部件关系在CI内部集中，更改的影响也大部分集中在CI内部，可有效防止更改无序扩散，大大简化构型管理的难度。可以和WBS、OBS做集成配套，一个WBS可含一个或多个CI，一个CI由一个人或一个集成产品团队（IPT）主责完成，理顺关系。

构型项的用途可以概括为：用于承载特定的功能需求；可独立的用于构型验证和确认；用于产品构型配置；用于建立产品架构；用于控制供应商构型管理；用于防止工程更改的无序扩散。

对于复杂系统，初步选择CI一般限于工作分解结构的主部件，其主要功能设计部件一般都列为CI。当系统设计进展时，复杂项目进一步划分为组件时可进一步优化和细化CI，CI的建立是航空产品系统工程运作的结果，一般到产品的详细设计阶段时已基本固化。



图1 产品结构分层

航空发动机CI的建立过程与方法

CI的建立过程如下：

- 输入条件为总体技术方案、研制工作分解结构、各系统技术方案、工艺装配方案、分工表、外包部件工作说明书、部件接口控制文件等；
- 根据ATA章节段定义进行产品结构顶层和中间层分解，并确定构型项，形成构型项结构树文件；
- 明确装配流程、设计分离面和工艺分离面；
- 在设计定型结束前，CI结构树按照方案设计要求进行完善并固化。

基于CI的产品结构划分方法如下：

- 产品结构树建立时必须考虑设计的变动最小；
- 产品结构的组织方式需将产品的不变部分与可变部分分开；
- 链接方式可分为顶层、可配置层、和底层，如图1所示。

CI划分的一般原则：

- 从产品研制的工作分解结构的单元中选择构型项，确保构型项对工作分解结构的可追溯性；
- 系统规范、研制规范（或采购规范）及相关文档中明确的项目；
- 跨单位、跨部门研制的项目；
- 需单独交付的项目，如外包项目；
- 可单独安装的项目；
- 重要的设计与制造分离面；

- 总体技术方案中明确的选装项目；
- 选装项目安装时，可被替换的项目；
- 进行单独的更改控制部件/组件；
- 进行多构型、系列化、模块化设计的项目；
- 设计或研制采用新的或改进的技术，具有高风险特征的项目；
- 与其他项目有复杂或重要接口的项目；
- 保障与维修状况特殊的项目；

- 有外场和装配互换性要求的项目；
- 关键、重要的组件(特性分类)；
- 配套的软件项目；
- 对于具有共同组件、子系统、或支持要求的系统，在两个系统的共同的装配件层内，每一个共同项目都应设置为一个CI；
- 一个多相似的系统，其独有的唯一组件应标识为那个系统的CI。

根据CI划分原则，涡扇发动机高压压气机CI划分示例，如图2所示。

集成架构建立方法研究

航空产品研发的WBS分为通用工作分解结构和具体工作分解结构。通用工作分解结构主要是将航空产品研发中的设计、研制、生产、试验、取证和维修过程中需要做的工作按类别进行分解，这些活动很多必须按照整机进行，不能分配到特

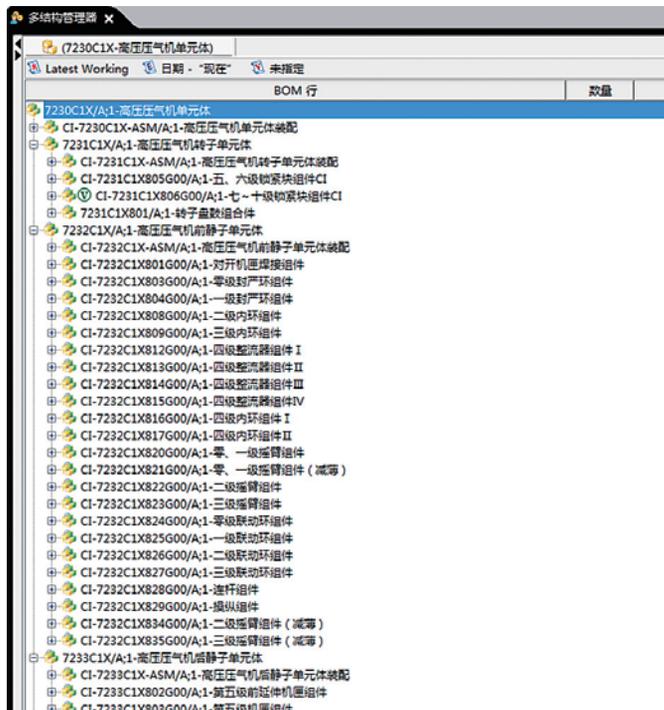


图2 CI划分示例

定的部件，如设计和认证原则、技术预研、性能、噪声控制、适航、“四性”设计、结构试验、飞行试验、地面保障、技术出版物等。通用工作分解结构不是针对具体产品，而是一类产品研发工作的汇总，是研发企业研发过程中形成的经验和惯例，通用工作分解结构工作相对固化，与具体的项目管理工作联系不是很紧密，不是项目管理重点关注的目标。

项目管理重点一般不是通用工作分解结构，使用的工作分解结构通常需要考虑PBS、功能分解结构(FBS)等，这种专门为项目开发的工作分解结构称为具体工作分解结构，对于具体的项目而言，通常所说的WBS即为具体工作分解结构。进行架构集成的也指此类工作分解结构。

WBS在每个层次上表现为工作包。工作包是项目管理工具，是设置、监测和控制项目所必需的。PBS与WBS集成的关键就是WBS的工作

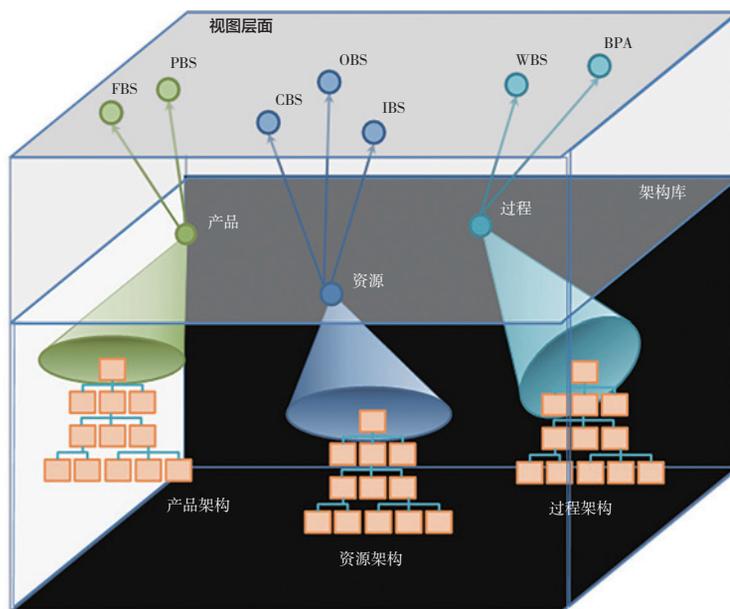


图4 集成架构示意图

包与PBS部件的关联方法。

企业的核心是产品，因此企业的工作主要围绕产品展开，集成架构也必然以PBS为核心，WBS、CBS都应该围绕PBS进行。PBS是产品的层次化分解结构，如硬件项、软件项和信息项，用于产品逻辑和功能的分解过程。PBS与WBS密切相关，WBS必然要包含PBS。通过WBS的工作包，把WBS与PBS关联起来，就是把项目管理对象与产品设计对象关联起来，从而达到产品集成架构的目的，如图3所示。

CBS和组织分解结构(OBS)、基础资源分解结构(IFS)都应该是围绕WBS的工作包来进行的。CBS为工作包提供成本分配、核算。OBS和IFS为WBS工作包的实施提供人力和物质保障。集成架构的实现首先以PBS为核心完成PBS与WBS的集成，进而以WBS为核心完成OBS、IFS的集成，如图4所示。

结束语

复杂技术产品的研发是一种高投入、高风险的工作，其项目管理一直是艰巨和困难的任务。随着高技术产品的日益复杂，复杂技术产品研发超期、超预算屡见不鲜，除了技术原因外，缺乏有效的项目管理手段也是重要的原因。传统的按专业进行的架构分解无法进行统一管理和关联是造成项目管理困难的重要原因。虽然随着互联网技术的发展，复杂技术产品研发的架构集成成为可能，但不可否认的是复杂技术产品项目管理的成败仍然依赖工程技术与管理体系的完善以及工程技术与信息技术的结合能力。

(冯潼能，中国航发商发，高级工程师，从事CATIA、Windchill、NX、TEAMCENTER的应用实施、二次开发等工作以及PDM、MBD、XML、SOA、智能制造等技术的企业应用研究工作)

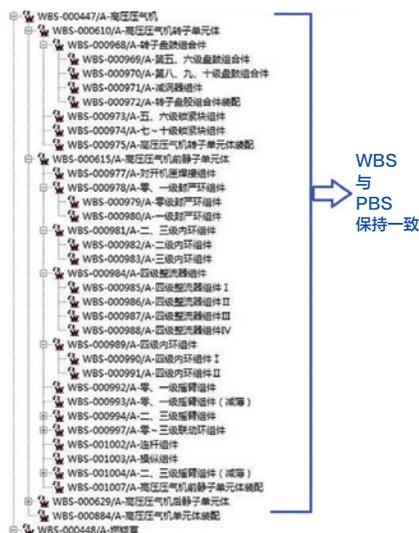


图3 WBS与PBS集成示例