

航空发动机研发全过程的产品数据管理思考

Consideration of Product Lifecycle Data Management for the Research & Development of Aero Engine

■ 黄维娜 石小江 许多/中国航发涡轮院

航空发动机研发过程是一个产品数据不断产生和应用的过程，有效的产品数据管理是完成充分验证、生产规定状态产品、实现研发目标的有力保证。在系统工程方法论指导下，在实践中对“需求—定义—验证”过程建立一组相互关联的物料清单（BOM），并以之为主线，实现研发全过程的产品数据的集成管理和可追溯。以产品数据为核心，拓展数据管理的范围，将助力自主研发能力的不断提升。

产品数据是指产品及产品研发过程中，各项描述产品的方案和实物所具有或期望具有的特性的数据，包括产品架构、各级产品的需求、产品定义、计算分析结果、工艺和制造设计、实物技术状态、制造检测数据、试验验证数据和与产品直接相关的技术管理数据等。在产品研发过程中，这些数据作为研发活动的输入和技术决策的依据，不断产生、更新和应用。产品研发的正确、有效组织，依赖于其中的各个环节均能及时获得有效的产品数据。在研制过程中，很大一部分问题出现在研发活动中引用了错误的、不完整的或失效的数据。因此，确保各项产品数据受控且能及时共享，是高效优质地开展产品研发的必要条件。

航空发动机产品研发的业务模型

作为机电一体化的现代工业产品，航空发动机的产品研发遵循系统工程的基本逻辑，是需求提出、分解和逐步验证的迭代循环过程。在研

发过程中，以“需求—验证”为主线，各项需求分析、设计、试制、试验和技术管理等研发活动，按照研制程序通过系统工程“V模型”有机组织，共同实现由用户需求向产品实现的转化。而这些研发活动之间的纽带即是研发中所应用和产生的各类产品数据。

对产品研发过程进行拆解，根据研发所在的业务领域，可以使其

包含三个性质和资源需求不同、密切相关又相对独立的业务过程：设计过程，由需求得到产品定义并开展初步仿真验证的过程；试制过程，将产品定义转换为试制产品实物的过程；试验过程，对产品实物开展实物试验，通过试验结果验证需求的符合情况。

航空发动机的设计过程，主要体现在如图1所示的两个维度：从产品

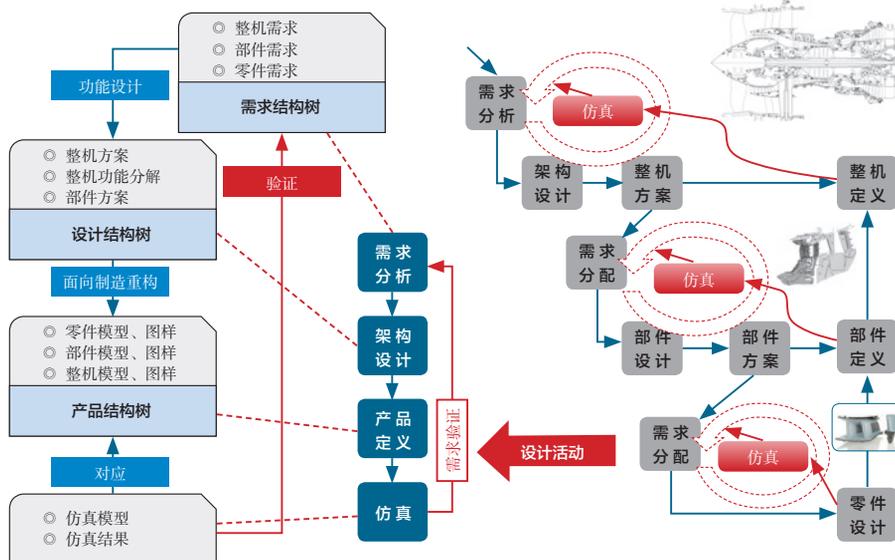


图1 产品设计过程的系统工程模型

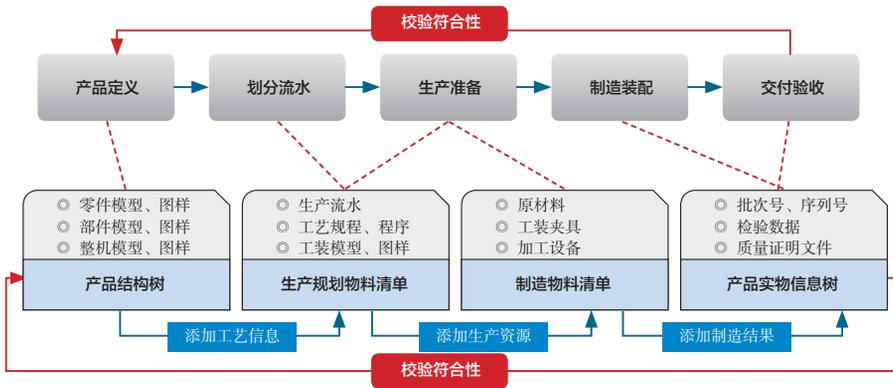


图2 产品试制过程的系统工程模型

维度上看，是发动机按照产品架构在“系统—子系统—元素”之间自顶向下的需求分配与确认，以及自底向上的产品集成；在每层级产品内部，是需求分析、架构设计、产品定义和仿真分析共同构成的“需求—验证”的循环迭代。前一个过程的数据模型，主要体现为“上一级的产品方案—下一级需求”的分解和“下一级产品定义—上一级产品定义”的集成；后一个过程主要体现为“需求—产品架构—产品设计—仿真结果—需求”的数据传递和关联。

航空发动机试制过程，主要体现为产品定义经过加工制造逐步转化为实物的过程，包括“产品定义—划分流水—生产准备—制造装配—交付验收”等的完整过程，如图2所示。在目前国内航空发动机行业制造厂与设计所分立的现状下，试制过程中贯穿了制造厂和设计所之间的业务协同与数据协同。

航空发动机试验过程，是由需求出发、根据需求验证计划，最终验证需求的过程。根据需求验证计划确定试验科目，分别提出试验要求、制定试验方案、准备试验条件、试验实施，并最终对试验结果进行分析，以完成对需求的验证，按照

试验科目组成了完整的业务和数据闭环，如图3所示。

综合设计、试制、试验过程的业务关系，可以发现在业务过程中，发动机产品数据按照研发的系统工程过程，自发形成了“需求—产品定义—仿真分析—需求”“需求—产品定义—实物—试验数据—需求”的闭环数据链条，前者封闭在设计过程内部，后者贯穿设计、试制和试验过程；同时在“整机—部件/系统”和“部件/系统—零组件/成附件”

等不同产品对象的层级之间，还存在着需求分解与确认、仿真分析和实物试验结果逐层支撑的数据关系，形成了贯穿产品研发全过程的数据链，如图4所示。从数据视角看，在产品研发的过程中，各类产品数据沿数据链条顺次产生、传递；根据数据链条中的验证关系判定是否需要迭代开展；当上游数据发生变更时，对下游数据沿数据链依次传递影响，直至验证闭环。

航空发动机研发对数据管理的要求

航空发动机是一个较为复杂的机电系统，由各个功能、结构均相对独立的部件和子系统共同组成，各部分之间高度耦合。在研制过程中，各部分研发工作高度并行，伴随着密切的协调，且需要根据协调情况经常性调整各部分的指标要求和技术方案，为保持发动机设计状态和实物状态的受控，研发数据管理的

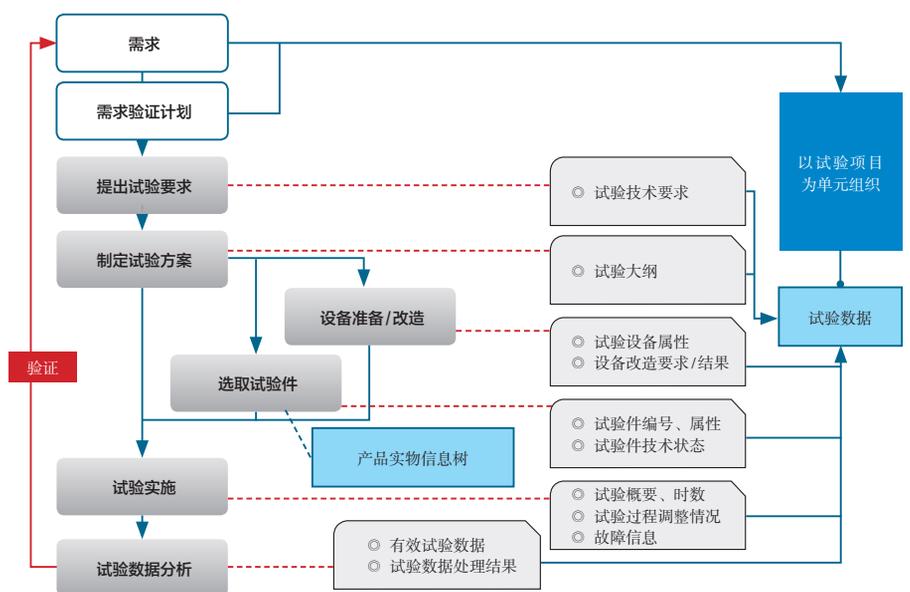


图3 产品试验过程的系统工程模型（对每试验科目）

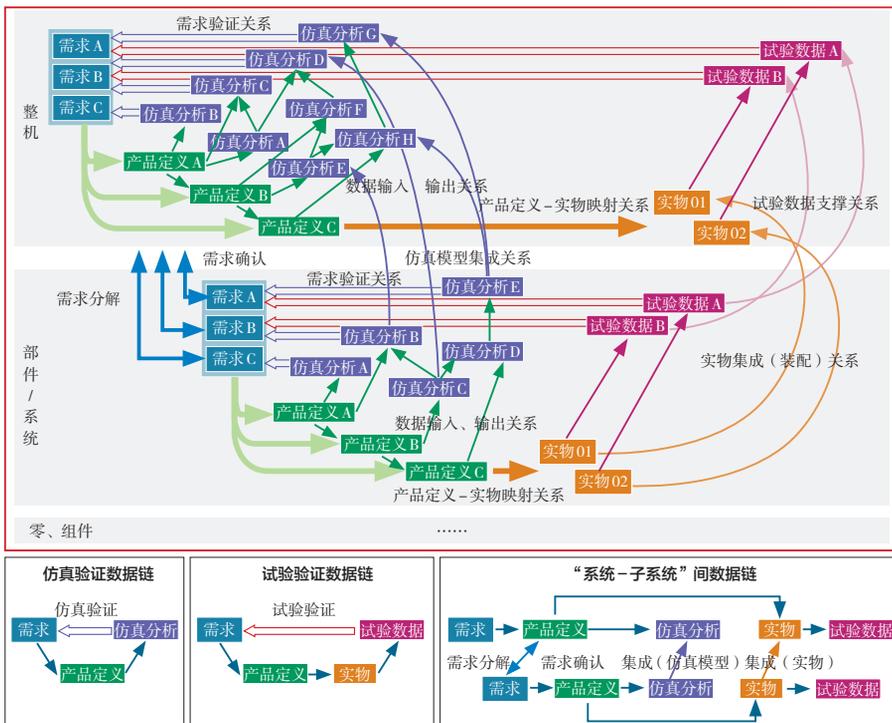


图4 产品研制过程中的主要数据链示意图

首要原则是确保研发团队能够及时、准确获得有效数据，这其中包含三方面对数据管理的要求：数据的集成管理、有效性控制和在适当的范围内高效共享。

由于设计、试制和试验领域不同来源的数据之间存在着“需求—验证”的数据链条，因此数据必须关联、集成管理，避免形成一系列分立的数据孤岛；同时，在数据的集成管理中，管理的对象不仅应包含数据，更应包含数据间完整的映射关系。同时对数据发布、审查、修改等进行控制，实现数据的权限和分发控制，并实现用户对数据的使用和检索。在数据集成管理中，也应按照特定的数据逻辑进行数据组织，既满足数据快速检索的要求又满足对不同类型数据采用不同策略进行管理的要求。

由于研发过程中，每批次产品存

在着表征产品设计方案的“设计状态”和表征产品实物客观的“实物状态”，且由于设计中存在变更，以及试制过程差异或验证目标差异，“实物状态”与“设计状态”之间往往存在差异(让步、偏离等)，不同台份的“实物状态”之间也存在差异，因此在设计数据有效性控制策略时，应能满足“设计状态”数据的变更管理要求和“实物状

态”的配置调整管理要求，并保持二者之间数据关联的准确。

经过多年信息化条件建设，我国航空发动机主要的设计所、制造厂均已建立了产品数据管理系统，正在建设全行业的协同研发平台，为数据在单位内部和单位之间的共享提供了软硬件条件。目前，研发全过程数据的实时共享，在单位内部均可做到，单位间也可在网络环境建设完成后，在统一的数据编码管理基础上，采用协同工作区形式对规定范围的产品数据实现准实时同步。这就意味着在产品数据产生、变更的过程中，特别是对数据条目进行增删后，无法依赖每次的人为选择确定同步的数据范围，而必须按照事先定义的数据管理结构和同步范围确定每次传输的数据，并保证传输后数据关系的完整有效。因此，为提高单位间数据协同效率，需要对研发全过程数据链中的数据，按照业务上的必要性进行组织，经济、高效地确定各项业务协同所需传输的数据范围并实现数据发放，以满足单位间数据协同的要求。

在研发过程中，各单位间主要数据传递关系如图5所示，主要包括

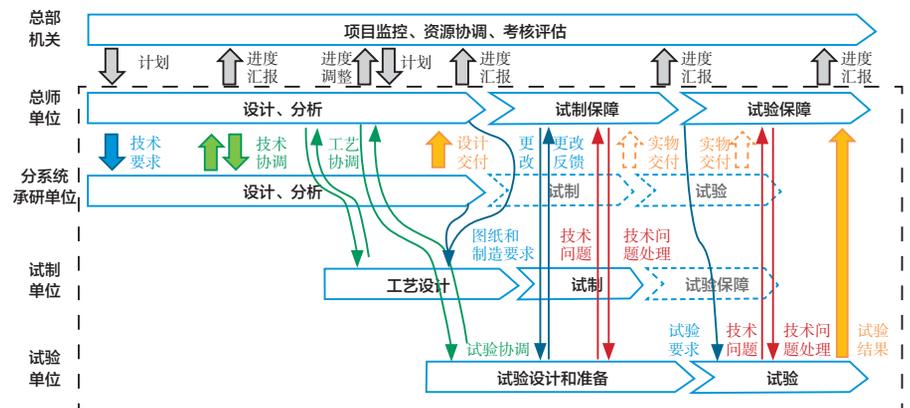


图5 航空发动机研制过程中单位之间主要业务协同关系

以下业务协同活动：

协同一，项目管理部门向各参研单位下达科研计划，各单位向项目管理部门提交进度汇报；

协同二，参研单位向项目管理部门申请科研任务调整，项目管理部门对调整申请进行批复；

协同三，总师单位向分系统承研单位传递技术要求/需求，分系统承研单位向总师单位传递模型图样、文件、仿真数据等形式的设计结果；

协同四，设计单位向试制单位传递模型图样、文件，试制单位向设计单位反馈实物状态信息数据；

协同五，试制单位向设计单位提出加工、装配中现场技术问题，设计单位向试制单位反馈对现场技术问题的处理决定；

协同六，设计单位向试验单位传递模型图样、试验要求和实物状态信息数据，试验单位向设计单位传递试验数据、试验结论；

协同七，试验单位向设计单位提出试验中现场技术问题，设计单位向试验单位反馈对现场技术问题的处理决定。

协同一、协同二的内容主要是管理数据，协同三~协同七的数据为产品数据。

在协同三中，“总师单位向分系统承研单位传递技术要求/需求”传递数据主要包括参研单位所承研的分系统需求，“分系统承研单位向总师单位传递模型图样、文件、仿真数据等形式的设计结果”传递数据主要包括分系统承研单位所承研的分系统需求、包括模型和图样在内的产品定义、分析仿真数据、试验数据等。在协同四中，“设计单位向制造厂传递模型图样、文件”传递

数据主要包括按产品装配结构组织的模型、图样和生产技术条件，目前在“设计—制造协同”试点项目中，试制单位还需向设计单位同步工艺规程等相关信息；“制造厂向设计单位反馈实物状态信息数据”传递的数据主要为产品配置情况和实物状态信息，包括检测数据、超差和偏离、更改贯彻情况。在协同五中，双方主要传递基于产品配置情况的实物状态信息，主要包括检测数据、超差和偏离等。在协同六中，设计单位按照试验科目向承担试验单位传递被试件状态、试验要求等，承担试验单位向设计单位传递试验设备信息、试验数据等信息。在协同七中，双方主要传递被试件状态、试验要求、试验设备信息、试验数据等信息。

对产品数据的管理中，应能对每组协同的数据“打包”管理，使得单位间的数据发包和数据同步能够准确、高效开展。

基于BOM的产品数据管理模式

电子数据通常以BOM为主线贯穿了整个设计/制造过程。为满足业务需求，可以根据数据产生和应用的阶段、基于该数据协同的范围和对应的追溯关系、不同类型数据的管理策略等，根据数据之间的关联关系，面向数据协同，将研发全过程的各类数据分类组成若干数据组，按照特定的数据结构关联形成数据表BOM。数据按照特定的BOM组织，便于数据应用者能够根据逻辑关系准确检索并关联查询；同时，数据产生者产生的数据按照规则存放在BOM结构中，在数据的跨组织协同中便于按照BOM进行数据发放，保障发放

数据的完整和关联关系的正确有效。

可以将发动机产品研制过程中由需求到验证的数据，按照数据产生的逻辑关系和时序关系组合为7个相互关联的BOM，依次为需求BOM (RBOM)、定义BOM (DBOM)、工程BOM (EBOM)、工艺BOM (PBOM)、制造BOM (MBOM)、实物BOM (BBOM)和试验BOM (TBOM)，管理的主要数据和搭建BOM依据的数据关系如表1所示。

其中，RBOM、DBOM由设计人员在项目实施前期搭建，主要用于设计环节内部协同、管控和项目的工作策划；EBOM由结构设计人员搭建于结构设计过程中，主要用于“设计—试制”环节的交互和协同；PBOM和MBOM由制造人员基于EBOM搭建于制造环节，主要用于工艺设计、制造实施环节；BBOM由设计、制造人员依据EBOM的装配结构，根据实物的生产安排搭建，用于实物交付前的制造人员向设计人员反馈制造信息，交付后设计人员也将继续基于BBOM实现对实物的技术状态记实；TBOM在试验策划阶段，由设计、试验人员根据策划开展的试验科目搭建，实现按科目对“需求—试验要求—试验结果”的闭环控制。

DBOM是对RBOM提出要求的落实和回答，DBOM中各数据项包含对RBOM中各项需求的验证关系；EBOM对象和DBOM对象之间存在映射关系，DBOM中划分的各功能对象均承载于EBOM中的一个或多个零组件、成附件；PBOM和MBOM是EBOM中提出的设计向工艺和制造方向的进一步延伸；BBOM中各级零组件实物均对应于EBOM中的零组件设计；BBOM中的整机、核心机

表1 研制中各BOM基本信息

序号	BOM	管理的主要数据	主要作用	依据的数据关系
1	需求 BOM (RBOM)	<ul style="list-style-type: none"> · PBS (按功能分解) · 需求 · 需求验证计划 	需求管理、分配、传递与确认	PBS (按功能分解)
2	定义 BOM (DBOM)	<ul style="list-style-type: none"> · PBS (按功能分解) · 需求 · 产品定义数据 · 计算分析结果 · 实物检测结果 · 试验结果 	基于产品对象的工作策划和研发管控 多学科协同设计分析	PBS (按功能分解)
3	工程 BOM (EBOM)	<ul style="list-style-type: none"> · PBS (按装配结构) · 模型/图样 · 生产技术要求 	工程图设计 设计—制造协同	PBS (按装配结构)
4	工艺 BOM (PBOM)	<ul style="list-style-type: none"> · PBS (按装配结构) · 模型/图样 · 生产技术要求 · 工艺规程 	设计—制造协同 工艺设计	PBS (按装配结构)
5	制造 BOM (MBOM)	<ul style="list-style-type: none"> · PBS (按装配结构) · 模型/图样 · 生产技术要求 · 工艺规程 · 制造设备 	生产准备	PBS (按装配结构)
6	实物 BOM (BBOM)	<ul style="list-style-type: none"> · 实物台份信息 · 实物配置信息 · 实物技术状态信息 · 实物装配、分解和试验历程 	制造信息反馈 实物技术状态纪实 设计—制造协同	实物台份—装配次
7	试验 BOM (TBOM)	<ul style="list-style-type: none"> · 试验科目 · 试验技术要求 · 试验方案 · 试验设备状态和试验改造方案 · 被试件信息 · 试验历程记录 · 试验数据 · 试验结果分析 	试验数据管理 设计—试验协同	试验科目

或其他试验件作为TBOM中管理的被试件，同时TBOM中记录的试验时数、试验历程等作为被试件历程记录的一部分，在BBOM中管理。

其中，对于RBOM、DBOM、EBOM、PBOM和MBOM中的各类数据，记

录的是产品设计方案数据，按最新版本有效进行管理；BBOM为产品实物历程的纪实，其中的各类数据均按唯一版本进行管理；TBOM中除试验原始记录和试验测量数据按唯一版本管理外，其余数据按最新版本

有效进行管理。

这样，在协同设计中，总师单位搭建RBOM，并向承研单位按功能分解的范围分发RBOM，承研单位基于DBOM反馈设计结果；“设计—制造协同”中，设计单位和试制单位加工前交互主要采用EBOM和PBOM，加工后基于实物的交互主要采用BBOM；制造过程内部管理主要依托PBOM、MBOM和BBOM；设计试验协同在试验方案阶段主要依托DBOM和TBOM，在试验实施阶段主要依托BBOM和TBOM。

结束语

目前，除了还需要对航空发动机研发全过程数据管理在发动机研制实践中进一步验证完善外，还存在以下几个问题：第一，依托7个相互关联的BOM，对研发中结果数据实现了管理，但是并不适用于对研发过程中动态迭代的过程数据进行管理，还需要建立其他管理系统，对设计迭代中的过程数据进行管理，同时实现设计过程数据与对应结果数据的关联映射；第二，目前的管理方式仅实现了对制造和试验数据的记录，数据的采集和录入的环节并不受控，需要建立实物加工信息收集到BBOM、试验测试采集系统到TBOM的数据关联管理功能，打通数据管理的“最后一千米”；第三，目前产品数据与项目管理数据尚未打通，后续还需建立与产品数据相关联的项目管理系统，为精细化项目管理提供数据基础。

航空动力

(黄维娜，中国航发涡轮院副院长，总设计师，研究员，主要从事航空发动机基础研究、预先研究和型号研制工作)