

基于系统工程的航空发动机研发流程建设方法

Construction Method of Aero Engine Development Process Based on System Engineering

■ 刘晓松 韩秋冰 田文正 陈艳丽 / 中国航发动力所

航空发动机研制能力的提升，不仅仅在于单项技术，更重要的是建立健全航空发动机研发体系，掌握正向研制方法，积累研制经验，破解航空发动机的发展难题，而研发流程则是航空发动机研发体系的关键组成要素之一。

航空发动机研发能力是衡量一个国家综合科技水平、科技工业基础实力和综合国力的重要标准^[1]，需要有完整的研发体系支撑。研发流程是航空发动机研发体系的关键组成要素，反映了发动机研制规律，是产品研究、制造及装配、试验、使用维护等技术环节安排的各项技术活动的程序，包括各阶段技术活动的程序以及各项技术活动中所需遵循的规范，能够有效指导产品研发过程。以GE、罗罗、普惠等公司为代表的国际航空发动机企业经过一个多世纪的发展，建立了较为成熟的研发流程架构，形成一系列全面又实用的航空发动机研发流程。在国内航空发动机研发领域，自提出构建航空发动机研发体系以来，中国航发持续地开展流程的建设，取得了长足的进步。本文系统地分析了先进航空发动机研发流程的特点，结合我国航空发动机研发流程建设历程及问题，提出了基于系统工程的流程建设方法。

国际航空发动机研发流程分析

国际先进航空发动机企业将研发流程一般定义为所有用于航空发动机

设计、制造和验证的工作计划的集成，将不同层面上的集成产品团队的工作在时间和逻辑关系上进行了有序的安排，其中明确定义谁在什么时间节点上要交付什么结果，以及为了在一定时间节点上能够执行某项任务，必须具备哪些信息，由谁来提供这些信息。这些研发流程提供了标准的工作方式方法，从而为不同的航空发动机型号研发项目提供一个统一的工作模式。

以罗罗公司为例，基于航空发动机的整体架构建立流程架构，将流程大体划分为整机流程，发动机子系统流程和发动机零件流程。各层级流程均按“需求—概念—设计—制造—集成—试验—验证”过程建设。其中，整机流程牵引子系统流程运行，子系统流程牵引零件流程的运行。

分析国外不同企业研发流程，虽然每个航空发动机公司的研发流程在形式上有所区别，甚至于流程的架构、构建模式都有所不同，但这些流程的实质是相同的，均符合基于系统工程V模型。而分析国外发动机型号研制历程，研制的成功很大程度上在于其具备严密完整且稳定高效运行的研发流程；相反，一些不十分成功的航空发动机产品，

一定程度上也是因为其研发流程存在问题。

国内航空发动机研发流程分析

国内航空发动机研制行业自20世纪初就关注对产品研发过程的归纳总结，在型号研制和预研项目研究过程中，获得了大量的试验数据，积累了宝贵的设计经验，并在此基础上形成了一系列反映发动机研发过程的规范类文件。

“十二五”之始，随着航空发动机研发体系建设逐步深入，国内航空发动机领域也认识到流程对研发体系的重要作用，并在全行业范围内系统开展了航空发动机研发流程的建设，针对设计、试验、制造工艺和材料等领域，以各领域内专业为对象构建了一系列专业技术流程^[2]。

这一时期主要为面向专业构建流程的模式，与行业内科研院所的机构设置相匹配，能够较高效地组织流程建设工作，能够较完整地梳理出各专业的业务过程；但由于这种流程构建模式未从产品整体角度考虑流程建设，对各专业流程集合起来是否能反映整个产品的研发过程缺乏有效的评判；流程建设缺乏有效的方法论，流程主要是基于研

发人员经验建设，对流程的完整性、合理性缺乏有效的评判。此外，流程的作用一方面能够规范指导研发过程，另一方面还需能够支撑研发过程的管控，而这一时期流程建设主要侧重于技术层面，对技术管理和项目管理方面考虑较少。

基于系统工程的研发流程建设要求

基于系统工程的特点，结合国内外航空发动机研发流程建设的经验，本文提出了基于系统工程的研发流程建设要求，以供参考。

系统工程特点分析

系统工程是国内外在产品研发过程中不断总结提炼出的方法论，是一种对所有“系统”都具有普遍意义的跨学科的科学方法^[3]，具备以下特点：注重系统的整体，综合考虑系统内多个学科和专业，并关注与其他系统和环境的相互特点；注重定义用户需求，建立一个从概念、生产到运行的结构化过程，提供满足用户需求的产品；与管理紧密相连，技术与管理并重，充分考虑产品研发管控^[4]。

国内军工行业也逐步认识到系统工程的上述特点对军工产品研发的重要作用。2013年，中国人民解放军总装备部发布了国军标（GJB）8113—2013《武器装备研制系统工程通用要求》，依据系统工程理论，提出了武器装备研制系统工程的技术过程（见图1）和技术管理过程，其实质就是产品研发的顶层流程^[5]。

对比前期流程建设中存在的问题，以系统工程作为方法论指导流程建设，能够有效解决前期流程建设中的问题，同时也是落实GJB

8113—2013的有效途径。

流程建设原则

借鉴标杆企业流程架构，以系统工程方法为指导，以需求为牵引，面向产品各层级研发对象，构建跨领域、跨专业协同研发流程，具体建设原则包括以下几个方面。

一是基于产品分解结构，构建流程的架构V模型，保障流程覆盖产品全层级。由面向专业构建技术流程转为面向研发对象构建研发流程，以产品分解结构为基础，综合考虑各类预研项目、型号产品的结构特点，构建完整的研发对象清单，形成流程的架构V模型，如图2所示。

二是以系统工程为指导，定义研发对象的实体V模型，保障流程覆盖产品研发全过程。结合系统工程对产品研发技术过程的定义，发动机各层级研发对象研制均遵循“需

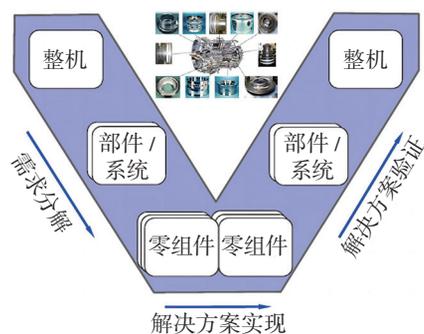


图2 流程的架构V模型

求—设计—制造—验证”的通用V模型。结合航空发动机的研制特点，基于系统工程的通用V模型，构建发动机各层级研发对象的实体V模型，将各层级研发对象的研发过程抽象为“需求分析—技术要求分析—结构设计—制造—装配集成—验证—确认”，如图3所示。各层级研发对象的研发流程需符合实体V模型，保障流程覆盖产品研发过程的完整性。

三是研发流程须覆盖产品研发所涉及的全领域，以及领域内全专业，保障流程覆盖领域和专业的完整性。航空发动机研制涉及设计、制造、试验、服务保障、财经、采购、项目管理等领域，各领域内又包含若干专业，在各研发对象流程开发中须全面考虑上述各领域及专业。此外，设计在产品研发中自然地起牵头纳总的的作用，是一切研发活动的源头，在设计过程中要考虑各领域/专业相关要求，即流程中须包含面向产品全生命周期的设计（DFX）工作。

四是以需求为牵引的各层级研发对象流程的构建，保证流程中技术活动的完整性。系统工程重视对需求的分析与管理，产品研发的最终目的就是要实现各层级的需求，研发流程中的各项活动逻辑上是能

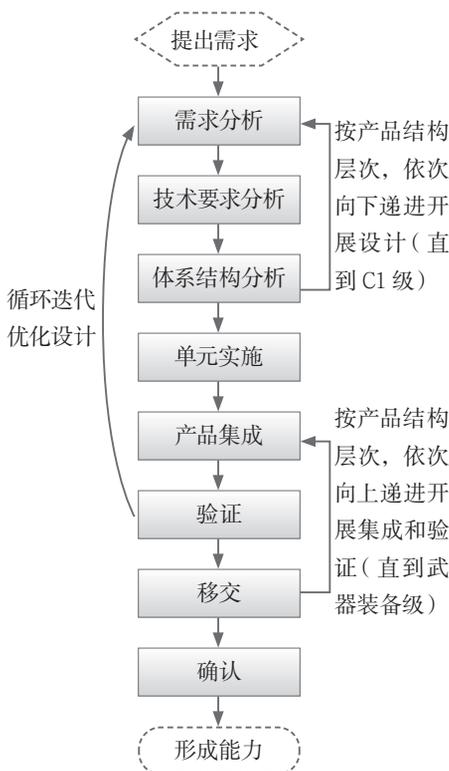


图1 系统工程技术过程示意

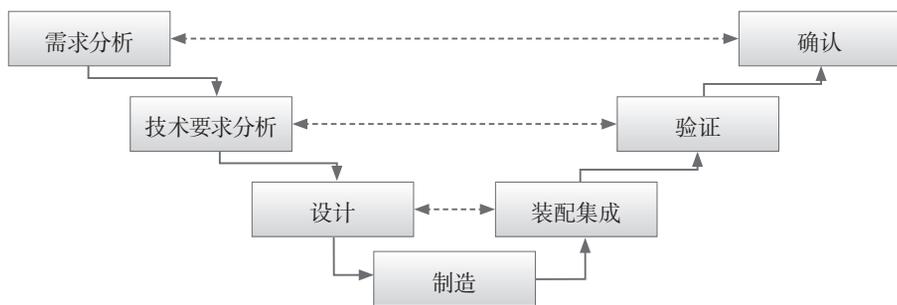


图3 流程的实体V模型

够映射到需求条目上的。因此，在流程开发过程中，以各层级研发对象的通用需求条款为牵引，系统梳理各项需求对应的设计、设计验证和实物验证活动，并融入流程，能够有效避免技术活动（尤其是多专业共同承接的需求所涉及的活动）的缺失，提升流程中技术活动的完整性，如图4所示。

五是技术管理、项目管理活动融入研发流程，提升过程管控能力。系统工程提出技术过程和技术管理过程并重。技术过程通过实体V模型落实，而技术管理过程主要包括研制策划、需求管理、技术状态管理、接口管理、技术数据管理、技术风险管理、研制成效评估、决策分析等8个过程，是对产品研发过程的管控手段。在研发流程的开发过程中，各技术管理相关的活动要融入研发流程中。此外，项目管理也是产品研发中的重要环节，在产品研发过

程中对进度、质量、成本等项目管理相关要求，要提炼形成一系列项目管理活动，融入研发流程中。

六是以流程活动牵引基础能力要素建设，支撑基础技术能力的统筹发展。基于系统工程理论背景环境图，能够相对准确地梳理流程中每一项技术活动执行所需的规范、指导书、模板、检查单、软件工具等基础能力要素，形成较为全面的基础能力清单，以清单为依据，结合现有的能力基础，能够有效地呈现缺失、待完善的能力要素，为研发能力的统筹规划建设提供依据。

流程运行模式

流程的执行是研发体系运行的难点，也是研发体系发挥作用所必须解决的问题。而流程主要包含的是流程活动和活动间的逻辑关系，流程活动实质上是研发人员需要制定的一系列研发任务，而活动之间的关系实质是流程活动的输入/输出数据的

对接。因此，流程的运行可结合航空发动机工作分解结构（WBS）去执行，将研发流程中各流程活动映射到WBS中形成工作任务，将流程活动的输入/输出数据映射为WBS工作任务的输入、输出数据要求，通过基于WBS构建型号计划，实现流程的落地执行。

结束语

以系统工程方法为指导构建航空发动机研发流程的方法，可以保障流程覆盖航空发动机产品研发的全层级、全过程、全领域、全专业，覆盖技术、技术管理、项目管理过程，使各领域/专业技术人员、技术管理人员、项目管理人员应用同一套流程开展产品研发，提升流程的协同能力，促进航空发动机研发体系的建设。

航空动力

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

参考文献

- [1] 徐俊恩,陈海鹏.基于系统工程的航空发动机协同研制流程设计[J].现代信息科技,2017,1(1):3.
- [2] 王永明,卫刚,兰发祥,黄顺洲.航空发动机设计体系的建设与发展[J].燃气涡轮试验与研究,2007,20(3):7.
- [3] 兰影铎,于武,周鑫.航空发动机系统工程技术浅析[J].智能制造,2018(6):3.
- [4] 张玉金.商用航空发动机系统工程及实践[M].北京:科学出版社,2021.
- [5] 中国人民解放军总装备部电子信息基础部.武器装备研制系统工程通用要求[S].北京:国家军用标准出版发行部,2013.



图4 基于需求的流程活动梳理示意