

# 航空发动机基础要素建设方法研究

## Research on the Basic Element Construction Method of Aero Engine

■ 刘海年 王相平 陈艳丽 张德志 刘晓松 王凤 宁怀松 史妍妍 / 中国航发动动力所

航空发动机基础要素是产品研发活动有效实施的必要载体，更是发动机研发能力的核心体现，为航空发动机型号研制提供强有力的支撑。持续提炼和总结型号/项目研制经验、开展发动机基础要素建设，对建立航空发动机自主研发体系、实现高效的发动机研发绩效具有重要意义。

产品研发体系是航空发动机自主创新发展的基石<sup>[1]</sup>。基础要素是产品研发体系的根基和前提，没有完整成熟的研发体系基础要素支撑，很难保证单个型号研制的成功具有可复制性，而成熟的基础要素可以有效地支撑当前和未来航空发动机型号的成功研制。

通过研究GE、罗罗、普惠等航空发动机公司的产品研发体系特点可以看出，除了建立涵盖产品全生命周期、全业务域、全层级的研发流程，更重要的是，其研发体系积累了大量的自主开发并经验证的先进且完备的规范/标准、指导书、检查单、工具和工程数据等基础要素，实现了对产品研发、生产制造等业务域的全覆盖<sup>[2]</sup>。中国航发运营管理体系（AEOS）建立了完整的研发体系架构，完成了产品研发主流程、基础支撑流程和职能支撑流程建设<sup>[3-4]</sup>，各直属单位通过多年的型号/项目研制经验积累，形成了大量的基础要素，能有效支撑发动机型号/项目的研制，但建设过程中仍存在基础要素对流程活动支撑不完整、工程适用性不强、先进性不足等问题，一定程度上影响了型号的研发效率和研制质量。为此，需要系统地研究基础要素的建设



图1 基础要素的组成

方法，为建立先进的、完整的、工程实用的基础要素，提升发动机自主研发能力提供有效支撑。

### 基础要素的建设原则

基础要素的建设须具备完整性、先进性和适用性。以流程活动为牵引，构建基础要素清单，做到产品研发流程中全部技术活动、技术管理活动和项目管理活动均由基础要素来承接，保证基础要素的完整性。基础要素要充分提炼、整合预先研究和型号项目的研究成果，针对成熟的技术要及时转化为基础要素并纳入产品研发体系，实现对现有和未来发动机型号研发的有效支撑。基础要素来源于型号实践，服务于型号研制，其建设必须是经型号验证

且是正确和有效的，具有较高的工程适用性，能为其他型号开展流程活动提供指导。

### 基础要素的组成、分类及定义

依据发动机产品流程架构，发动机研发体系的基础要素主要包括技术基础要素、技术管理基础要素和项目管理基础要素3个部分，如图1所示。其中，技术基础要素主要基于系统工程的技术过程和专业过程形成；技术管理基础要素主要基于GJB 8113—2013《武器装备研制系统工程通用要求》<sup>[5]</sup>的技术管理过程，从研制策划、需求管理、构型管理、风险管理等方面提炼；项目管理基础要素主要依据项目管理的领域划分，

从团队管理、采购管理、成本管理、计划管理等方面提炼。这些要素是发动机研发能力的核心体现，支撑研发流程的执行，实现型号高质量、高效率、低成本研发。

发动机基础要素主要包括规范、标准、指导书（含模板）、检查单、软件工具和工程数据库等分类。各类要素的定义如下：规范是描述流程或任务必须遵守的准则、方法和要求的文件，为流程活动或任务的执行提供必须遵守的方法、准则和要求，用来解决做什么的问题；标准是为了在一定范围内获得最佳秩序，经协商一致并由公认机构批准，共同使用和重复使用的一种规范性文件，用来解决做到什么程度的问题；指导书描述了完成流程活动或技术文件编制的方法，为活动的实施或文件的编制提供可操作性的指导，用来解决如何做的问题；检查单用于指导、校对或检查有关工作过程或结果的符合性，用来解决完整性和正确性的问题；软件工具是完成流程活动所需的软件，是用来解决研发过程中用什么做事的问题；工程数据库包含产品研发活动产生、应用并经过验证的数字、文字、图形等结果，以数据库实体的形式体现，是产品研发的条件，是指导研发人员实施研发行为时的输入。

### 基础要素的建设方法

基础要素的建设方法主要以产品研发流程活动或任务为牵引。首先，通过梳理支撑流程活动或任务实施所需的基础要素和型号/项目基础能力的挖掘和提炼，构建先进、完备的基础要素清单，形成开发计划；其次，建立基础要素文件的标准化

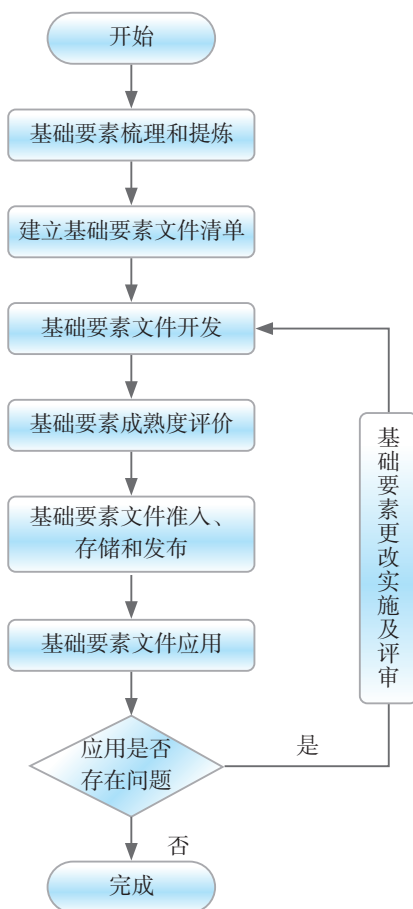


图2 基础要素建设工作流程

要求，完成基础要素文件开发；再次，完成基础要素文件的成熟度评价，针对评价结果为5级以上的基础要素，完成基础要素的准入、存储

和发布；最后，制定基础要素的型号应用策划，并跟踪基础要素的应用效果，完成基础要素的改进完善，提升基础要素的成熟度和工程的适用性，基础要素建设工作流程如图2所示。

### 基础要素的梳理

依据航空发动机研发流程架构，针对流程活动逐项分析各项活动承接的基础要素。其中，针对复杂的跨专业流程活动，通过建立多专业协同流程，并明确流程中的各项任务，梳理支撑任务的基础要素；针对单一专业的流程活动，梳理支撑活动实施的各类基础要素。梳理流程中的每一项活动或任务均应有相应的指导书进行承接，其中活动或任务强制执行的准则和要求要形成规范。关键流程活动的交付物形成文件编制类指导书（含模板），关键活动的执行过程形成检查单，同步明确流程活动实施的软件工具和数据库，保证基础要素的完整性。系统分析与设计流程中流程活动的基础要素梳理案例如表1所示。

### 基础要素的提炼总结

基础要素提炼总结流程如图3所示，基础要素提炼总结方法主要包括成熟技术提炼（技术成熟度至

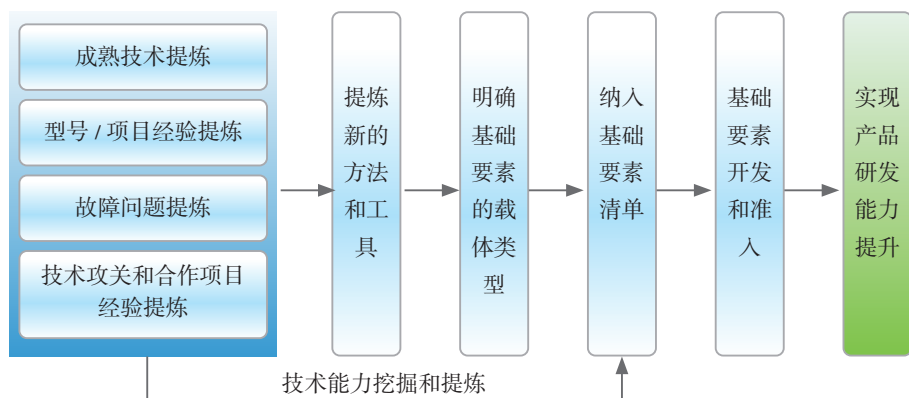


图3 基础要素提炼总结工作流程

表1 基于流程活动的基础要素梳理清单

流程名称	流程活动	任务	子任务	基础要素				
				规范/标准	指导书	检查单	软件工具	工程数据库
系统分析与设计流程	系统需求分析	—	—	—	· 发动机系统需求分析指导书 · 发动机功能清单	—	—	—
	部件/子系统	涡轮气动技术设计	叶片造型设计	叶片造型设计规范	· 涡轮叶型设计优化指导书	涡轮叶型设计检查单	涡轮叶片设计软件	—
			叶片积叠设计	叶片造型设计规范	· 叶型设计指导书 · 涡轮全三维优化设计指导书	—	涡轮叶片设计软件	涡轮叶片叶型数据库
			...	...	...	...	...	...
	部件/子系统	涡轮结构技术设计	冷热态流道尺寸换算	—	· 冷热态流道尺寸换算指导书	—	—	—
			转子结构技术设计	—	· 转子结构技术设计指导书 · 篦齿封严环设计指导书	—	—	—
			静子结构技术设计	涡轮后机匣单元体设计规范	· 静子结构技术设计指导书 · 涡扇发动机涡轮后机匣单元体设计指导书	—	—	—

少为5级以上)、型号/项目经验提炼、故障问题提炼、技术攻关和合作项目经验提炼等4个方面。其中,基于技术树的提炼方法主要针对5级以上成熟技术提炼基础要素;基于型号/项目经验的提炼方法主要从型号/项目研制过程中产生的专有规范/标准、指导书等文件中提炼基础要素;基于故障问题的提炼方法主要针对型号研制中故障和问题的解决措施提炼基础要素;基于技术攻关和合作项目经验的提炼方法主要针对研究内容新掌握的方法工具提炼基础要素,并纳入基础要素清单,完成基础要素的开发,保证型号/项目的最新研制经验和研究成果导入到基础要素,实现增量能力的积累和提炼,提升基础要素的先进性。

### 构建基础要素清单

首先,根据基础要素梳理和提炼结果,对强度、“六性”、材料工艺等共性的基础要素进行整合,明

确各基础要素的类别、文件名称、责任单位和责任人,形成完备的基础要素清单;其次,明确各项基础要素的文件状态,针对待建/待完善的基础要素明确完成时间,形成基础要素开发计划。

### 基础要素文件的开发

基础要素文件的开发主要依据GB/T 1.1—2020《标准化工作导则第1部分:标准化文件的结构和起草规则》<sup>[6]</sup>规定的标准化文件编制要求,制定各类基础要素文件的标准化模板,编制基础要素文件。其中,规范类文件,应详细说明各操作步骤必须遵守的方法、准则和要求;指导书类文件,应详细说明操作步骤执行的方法和准则;文件编制类指导书,主要内容不仅包含文件的编制模板,更应包含各章节内容的编制要求;检查单应根据活动或交付物的审查要点,明确检查项目和检查内容,保证检查单内容的完整性

和可执行性。

### 基础要素的评价方法

基础要素成熟度评价结果表征基础要素文件的工程适用性。基础要素的成熟度评估方法主要从基础要素的型号/项目应用背景、技术状态、系统的集成程度、验证环境的逼真度等4个维度完成基础要素成熟度评价,明确基础要素的成熟度等级,并根据成熟度评价结果开展基础要素的准入和基础要素的能力提升;同时,根据型号/项目研制过程中分阶段选用对应成熟度的基础要素,保证型号研发过程和研制结果的可信度。

### 基础要素的准入

基础要素的准入主要包括准入申请、校对审查、评审和审核批准等4个步骤。其中,准入申请主要完成准入申请单编制、准入资料准备和准入资格审查,保证准入的基础要素文件符合基础要素文件清单和

表2 基础要素型号应用效果汇总表

	基础要素	型号	型号任务	计划完成时间	流程活动应用负责人	完成情况说明	型号交付物	具体应用内容	发现的问题/建议	问题/建议的落实情况	后续工作计划
编制要求	填写文件名称	填写型号项目代号	科研管控平台中的科研任务名称	与科研计划保持一致	填写科研工作负责人	说明型号应用是否完成, 针对未完成型号应用项目说明原因	明确型号研制各项科研任务的交付物文件名称	说明体系成果的具体应用章节内容	说明型号应用过程中体系要素存在的完整性、适用性和准确性问题	针对已经完成问题整改落实的体系成果, 说明落实情况	针对尚未完成文件修订/体系要素完善的, 形成后续的工作计划
示例1	S2流场分析指导书	发动机1	S2流场分析	20XX年10月30日	XXX	完成	XX设计分析报告	S2流场分析指导书4.3节内容	缺少关于流场网格划分的说明	建议补充网格划分的准则或要求	已完成落实, 在S2流场分析指导书中补充网格划分的准则和要求

标准化要求；校对审查主要由专业组确认文件内容编制的完整性和准确性；评审主要根据基础要素的效力、使用范围等特点确定相应的评审级别，完成基础要素文件的评审和专家意见落实，确保文件的正确性、合理性；审核批准由主管专业副总师完成文件的批准和发布，保证基础要素文件的编制质量和工程应用的适用性。

### 基础要素的型号应用

按照“建用结合、着力于用”的原则，以研发流程活动为牵引，针对流程活动实施的基础要素，匹配型号/项目的科研任务，推进已准入基础要素的型号应用，验证体系成果的完备程度，制定基础要素型号应用工作策划；应用工作策划应明确基础要素的应用对象/型号/项目、应用时间和应用责任人、完成形式等内容。同时，结合型号的应用情况，从型号应用交付物、型号应用内容、发现问题/建议、问题/建议的落实情况等方面跟踪并记录基础要素的应用效果和存在问题，

如表2所示，为持续优化和完善基础要素奠定基础。

### 基础要素的更改实施和评审

基础要素的编制人结合型号应用过程中存在的问题和完善意见，提出更改申请，按照标准化管理规定进行更改实施和评审。首先，基础要素的责任人按照更改规定在基础要素管理系统中提出更改的申请；其次，按照标准化管理规定完成基础要素的开发和完善；最后，根据评审和准入的要求，完成基础要素的准入和发布。

### 结束语

研发体系基础要素建设是一个持续开发、验证、应用、优化、完善的迭代提升过程，需要长期的积累和坚持，基础要素应用于型号研制，同时型号研制中积累的先进经验应及时提炼总结和转化，持续提升基础要素的先进性和成熟度，最终实现自主研发能力和产品研制质量的有效提升。

航空动力

(刘海年, 中国航发动所, 高

级工程师, 主要从事航空发动机系统工程方法研究及研发体系建设工作)

### 参考文献

- [1] 王桂华. 关于产品研发流程及流程架构的探讨[J]. 航空动力, 2020(5):48-52.
- [2] 温泉. 对中国航发集团标准体系建设工作的几点思考[J]. 航空动力, 2020(4):59-61.
- [3] 韩秋冰, 梁旭, 宋柳丽, 等. 航空发动机产品开发流程阶段划分[J]. 航空动力, 2020(3):48-50.
- [4] 宋柳丽, 张德志, 李娜, 等. 基于集成产品开发的构型管理流程设计[J]. 航空动力, 2020(5):53-55.
- [5] 中国人民解放军总装备部. GJB 8113—2013 武器装备研制系统工程通用要求[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2013:7-8.
- [6] 国家标准化管理委员会. GB/T 1.1—2020 标准化工作导则第1部分: 标准化文件的结构和起草规则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020:8-10.