

航空发动机功能分析方法研究

Functional Analysis Method for Aero Engine

■ 王常亮 隋岩峰 宁怀松 李昌红 谷艳萍 谈梦妮 / 中国航发动力所

功能是产品价值的核心体现，对功能的定义和设计往往可以开拓产品的创新空间，不同的功能架构会导致最终产品的多样性。在航空发动机研发领域，功能分析是实施正向研发的核心技术过程，是连接需求分析和架构设计的桥梁。

发动机的功能是为满足用户、飞机等利益相关方的期望而执行的动作或活动的抽象描述。功能分析则是一个将利益相关方需求转换为系统的功能性特征和功能架构的过程。功能分析的主要研究内容就是系统的功能以及功能之间的关联。一般在具体的型号/项目开发过程中，从顶层任务分析和利益相关方需求的捕获开始，针对其中的功能性需求开展产品的顶层功能识别和定义，再将顶层功能按一定的解构思路分解成子功能，并定义功能运行的逻辑关系，进而形成系统的功能架构。对于功能分析方法的研究，可以为中国航发运营管理体系（AEOS）中的架构设计活动提供面向功能逻辑的分析方法支撑，并与其他流程活动的开展构建广泛的关联。

功能分析的重要性

功能分析在提高需求完整性、生成功能架构、拓展创新思路等方面具有重要作用。各企业结合技术领域发展趋势分析和工程实践，相继推出基于模型的系统工程（MBSE）方法论和过程定义，但无论是基于文本的还是基于模型的系统工程，并

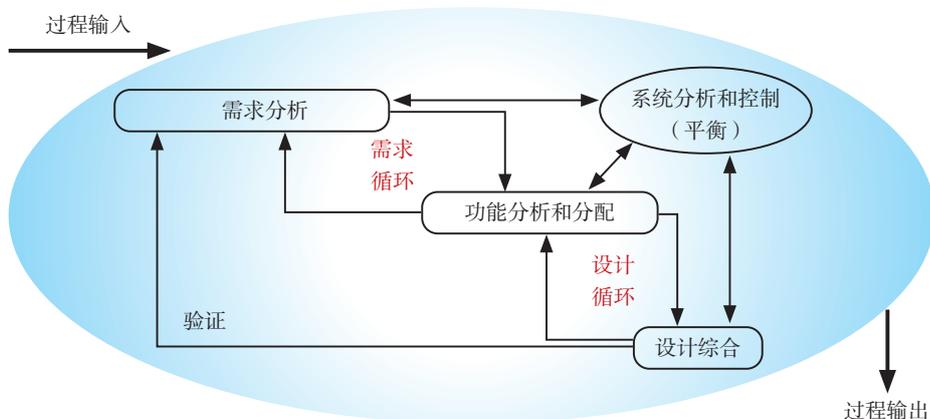


图1 美国军标中的系统工程过程椭圆形模型

未降低功能分析的必要性。基于模型化的需求，借助建模语言和工具软件的引入，使得功能分析、功能定义或者功能/逻辑架构的设计过程的内容不断丰富，对系统功能的描述更加规范统一，功能分析过程的效率得到显著提升，功能架构的权衡得以更系统地开展。

以图1所示的美国军标MIL-STD-499B《系统工程草案》中定义的椭圆形系统工程过程模型为例，反映出功能分析是需求分析、设计综合过程迭代循环的关键一环，即功能分析通过与需求分析的循环迭代不断提升需求的完整性，通过与设计综合的迭代完成功能架构的定义与确认。从系统工程过程演进来看，

功能分析始终是其中的关键环节。在2015年最新发布ISO/IEC/IEEE 15288标准和国际系统工程协会（INCOSE）发布的系统工程手册（V4.0）中，更是把功能识别、功能定义和架构定义等作为相关技术过程的重要活动。

近年来，尤其是面对航空发动机这种高度复杂的系统，由于用户要求不断提升，产品的功能逻辑日益复杂，在体系化、模型化趋势加速发展的背景下，对技术创新的需求比以往任何时期都更加迫切。而要实现需求牵引的研发创新，与功能分析相关的技术能力的培养是必备环节，图2反映了罗罗公司的系统工程能力框架，可以看到功能分

	项目工程主管	外场试验人员	系统工程师	开发项目主管	功能工程主管	性能/流体/气动	设计工程主管	系统设计主管	开发工程师主管	开发工程师	服务工程主管	服务工程师
系统思维	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2
系统运维和对顾客的理解	4	4	4	3	4	2	3	2	2	2	4	3
确定和管理需求	2	1	4	3	3	2	3	3	3	3	3	2
技术项目的项目领导力	2	1	3	4	2	2	3	2	3	3	2	2
系统架构	2	2	3	1	4	3	4	3	2	1	3	2
功能/属性分析和建模	2	1	2	2	4	3	3	2	1	1	3	2
对涌现特性的管理	3	1	3	3	4	2	4	3	2	2	4	
系统定义和稳健性	2	2	2	1	4	3	4	3	2	1	3	2
接口管理	3	1	3	3	4	3	4	3	3	2	3	3
验证	2	2	2	2	3	3	3	2	4	4	2	2
系统移交和运行支持	3	3	3	2	3	2	2	2	3	3	4	3

1	知晓者
2	受指导者
3	实践者
4	专家

图2 罗罗公司的系统工程能力框架

析涉及的建模能力、系统架构能力、接口管理能力等，是确保研发过程得以实施的关键能力项，尤其是功能工程主管这一角色的设置，从侧面反映了功能分析和建模能力在航空发动机研发过程和相应的职能角色定位中存在重要意义。

航空发动机功能分析流程

通过系统工程领域关于功能分析过程的通用定义和描述，结合发动机研发过程，可将发动机功能分析流程初步划分为发动机顶层功能识别、功能分解及逻辑分析、功能分配3大子过程。

顶层功能识别是基于收集到的利益相关方需求或者设计输入，从利益相关方视角，识别出军方、飞机、法律法规（如项目需遵循的适航标准、国家标准、军用标准等）对发动机产品的顶层功能需求，初步定义发动机与外部交互内容，定义利益相关方指定的发动机运行状态或

功能模式。

功能分解过程是基于已定义的顶层功能项，从发动机的视角按照一定的分解方法，完成顶层功能的分解细化。在发动机整机层，功能分解的主要结果是发动机功能清单。逻辑分析过程是结合功能分解过程，剖析功能之间的逻辑关系，开展功能流分析、功能时序分析，并在外部功能接口定义的基础上，细化定义内部功能接口等。同时，基于前序阶段定义的发动机状态/模式，分析与功能项的关联以及是否有必要对这些状态/模式做进一步的分解细化。

功能分配是基于已定义的功能子集，开展功能的群组划分及优化。这里的功能群组优化是指基于功能的可实现性和当前技术基础，将已分解的子功能进行适当的群组优化配置，为功能分配做好准备。功能的分配过程，也是对功能分解结果的一种权衡分析过程。如果所分解

的功能无法实现顺利的分配，则应重新对其进行分解；如果存在多种备选分配方式，则应进行相应的权衡。在分析过程中往往需要构建一些分配的准则，例如，基于功能间接口的复杂程度的考虑等，往往趋向于将交互关系密切，交互行为复杂的功能项尽量封闭在一个功能群组中，进而映射内聚到某一特定的逻辑组件中，实现功能到逻辑组成单元的分配。但功能的最终实现，还是要依赖物理实体。因此，对于功能分解和逻辑分配的结果，还需要通过物理可实现性分析、技术先进性分析等多维度的权衡。

发动机功能分析方法

从上述过程来看，发动机功能分析是一个综合的技术过程，需要多样的分析方法支撑。以下主要就具体分析方法进行说明。

在发动机的功能识别方面，场景是捕获识别需求及功能的有效技术手段，对于航空发动机来说，所有的功能都运行在特定的场景之中，因此，在开展功能识别时，需要考虑定义场景。在分析航空发动机全生命周期主要功能运行场景的基础上，将概念维、程序维、任务维定义为场景集构建的基准维度，将环境维和状态维定义为附加维度。基准维度用于定义场景集的主体框架，确保其主干结构的完整性和相对稳定，附加维度通常可以与基准维度叠加，形成更为具体且限定条件更明确的细化场景，各维度具体说明如下。

概念维：涵盖发动机全生命周期概念的考虑，将发动机测试、发动机制造/装配/分解、发动机运输、

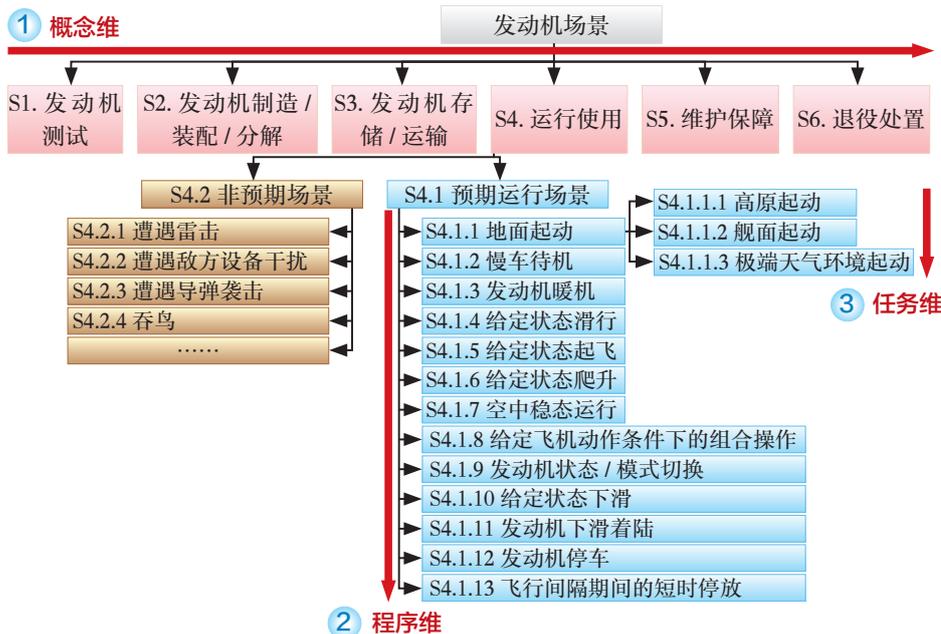


图3 一种基于维度概念的航空发动机典型场景集框架示意

运行使用、维护保障、退役处置设置为具体的概念场景。

程序维：在每类概念维度之下，必然存在相应的运行或者执行流程，遵循相应的程序或者阶段划分，例如，发动机制造/装配概念之下，必然涉及发动机制造和装配的流程，而每个流程又可以根据内容复杂程度继续划分其子流程，如装配可以依据其工艺流程进行细分。

任务维：是利益相关方明确提出的任务要求内容，例如，基于发动机的常规运行程序，或者飞机方提出的飞行剖面要求（包含了滑行、起飞、爬升、巡航等任务段），可以细化出发动机的任务内容，用以支撑上层飞机运行任务的实现。

环境维：包含了除发动机以外，所有与发动机存在关联的外部环境要素，涵盖了人员、自然环境、人造环境、相关的系统设备等，这些要素都处于发动机的外部，并通过各种方式与发动机产生交互或者造

成影响，并且与发动机之间存在接口和约束。

状态维：包括发动机运行的状态/模式，如慢车状态、全加力状态、防喘模式、防冰模式、故障模式等，这些状态和模式可以是复合的，也可以是单一的，取决于具体项目的定义。

依据上述基准维度构建的发动

机场景集框架如图3所示。

发动机功能分解

基于上述识别的顶层功能，需要按照一定的分解原则和方法，完成发动机功能的分解细化。功能分解的主要结果是功能清单或者功能分解结构。

功能分解应遵循基本的流拼接原则，如图4所示。即当一个总功能或者顶层功能被分解成子功能的集合时，必须保证上层功能的输入和输出，能够被下层子功能完全承接，并在子功能之间建立起相应的“流”动，这样才能确保功能分解过程是完整的和可执行的。

由于发动机具有复杂的组成单元和结构层级，在自顶向下的开发过程中，要实现功能域到物理域转换不可能一蹴而就，即无法完全独立于物理方案的考虑而完成自顶向下完整的功能分解过程，所谓功能独立于技术实现也只是在本层级而言。因此，对于发动机来说，其功能的分解需要一个“之”字形的逐层分解过程（见图5），即在整机、系统/部件、零组件不同的层级，分

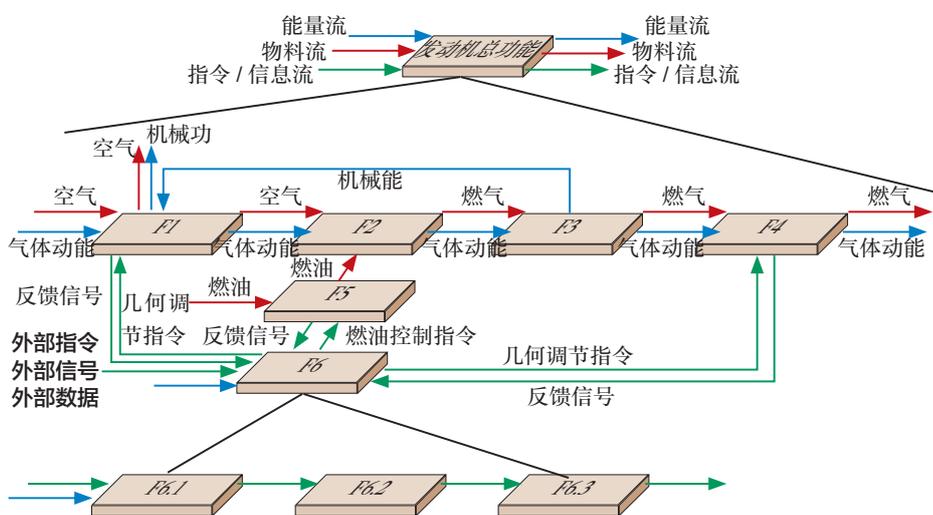


图4 发动机功能分解的拼接原则示意

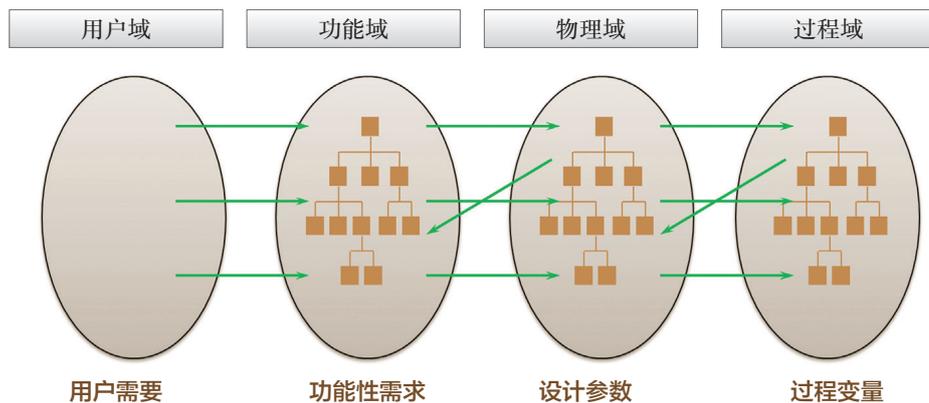


图5 发动机功能分解的“之”字分解过程

别开展功能分解，并确定可实现的物理架构或解决方案，当功能分解或解决方案的颗粒度不满足要求时，则需要下一层级递归开展这一分析和映射过程，直至分解的功能能够由具体可实现的机械结构、电子电气和软件等承接实施。

发动机的功能逻辑分析

发动机的功能逻辑主要应用功能流框图、功能时序、状态/模式定义及功能关联等方法开展分析。

其中，功能流框图法是经典的功能流分析方法，其目的是显示系统所有功能的逻辑顺序关系，引导功能逻辑分析过程。功能流框图自顶向下开发，将高层的单一功能分

解为低层功能。在每个层次展示所有功能的逻辑和顺序关系，并且可以实现自下而上的追溯，图6给出了航空发动机转速控制功能的分析示例。功能流框图显示了功能的逻辑顺序，是功能架构的主要表达视图。当采用模型视图表达时，通常可用活动图的方式呈现。

功能时序分析法增加了对功能持续时间的考虑，特别适用于功能执行过程有严格的时序逻辑的情况，发动机的时序分析多用于控制指令时序、响应时间、执行间隔等存在严格要求的功能活动分析过程，此类过程基本都有控制器参与，或者从功能映射的角度说，在航空发动

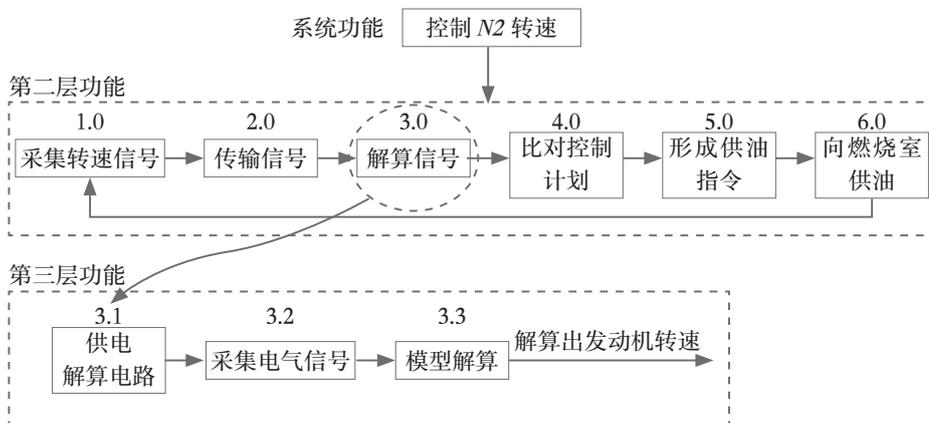


图6 发动机“控制N2转速”功能流分析示例

机上需要精确地执行时序或响应特性的控制功能，一般都是由控制器这个物理实体完成的。通常情况下，分析功能的逻辑时序可以有多种方式，例如文字描述、图表、模型语言（序列图）等。

状态/模式的定义以及功能的关联分析是依据飞机的要求和发动机研发需求，通常会定义一些状态/模式，并与功能构建起相应的关联。在发动机研发过程，该状态/模式的定义和关联分析过程是非常必要的，因为先进发动机的工作状态和模式复杂多变，功能逻辑复杂度显著增加，如果没有清晰而严格的状态/模式定义，很容易在复杂的运行条件和工况下出现功能性问题，甚至有可能导致严重的功能失效故障。因此，通过早期的状态/模式与功能的关联分析，明确指定状态/模式下应该或者禁止执行的功能等，有助于在设计早期阶段发现问题。

结束语

综上所述，功能分析工作在航空发动机研发过程中意义重大，是实现基于系统工程的正向研发的关键一环。近年来，功能分析在发动机需求迭代和架构生成方面的作用越发凸显，尤其是在技术创新层面，功能组合的变化可能直接影响到发动机物理架构的选择。可以预见，随着系统工程技术领域基于文档向基于模型的技术变革推进过程，功能分析将会在发动机功能逻辑建模和架构设计方面发挥越来越重要的作用。

航空动力

（王常亮，中国航发动力所，工程师，主要从事系统工程、研发体系建设、航空发动机总体性能设计研究）