

# 基于任务工程的发动机试验一次成功体系的构建

## Research of Aero Engine Test Once Success System Based on Mission Engineering

■ 刘晓松 王相平 何为 王常亮 / 中国航发沈阳发动机研究所

航空发动机的研制是一个技术要求极高、难度极大的系统工程，迫切需要采取非常举措，加快研制步伐。因此，中国航发明确提出了在“十四五”初期实施“一次成功”工程的战略。

对于航空发动机来说，产品的一次成功需要从设计、试制和试验等方面同时发力，而设计和试制是否到位，最终是通过试验结果呈现的。因此，试验成功内涵不仅仅是某项试验顺利完成，更重要的是在产品视角下的试验成功，即在试验对象设计结果满足需求、制造结果满足设计要求的基础上，试验环境符合需求场景，试验技术指标和子样数达到设计指标并满足分配需求的情况下，才能够称之为“试验成功”。此外，从以往的型号研制经验来看，试验过程中暴露的质量问题也是制约研制进度的重要因素，因此在试验阶段推进一次成功工程，是加快航空发动机研制的有效手段。本文以任务工程方法为指导，建立航空发动机试验“端到端”全过程分析模型，并融入航天的系统预防的理念，提出航空发动机产品研发试验一次成功体系的构建方法。

### 试验一次成功体系建设路径

航空发动机试验一次成功体系本质上是指导航空发动机试验验证，保

证试验一次成功的一套文件体系。

因此，试验一次成功体系首先要解决的是如何完整地识别航空发动机试验项目，如果试验项目有遗漏，则必然导致文件体系构建不完整，这是试验一次成功体系的前提。

其次，针对各试验项目，以试验一次成功为目标构建各试验全过程的分析模型，此时引入任务工程方法，以任务工程提供的任务方法构建试验全过程分析模型，进而建立试验项目一次成功的指导文件，同时将系统预防的技术方法、管理模式，以及文化理念融入文件，从技术和管理两个方面提升试验成功率，这是试验一次成功体系构建的关键。

最后，建立满足试验验证需求的仿真平台和验证平台，这是试验

一次成功体系构建的保障。

### 试验一次成功的前提：定义试验项目清单

航空发动机研发涉及多专业，各专业间关联性大，并存在相互制约的情况，试验层级对象、试验条件和试验环境千差万别。应用基于模型的系统工程（MBSE）技术，在模型环境中定义工作环境和设计指标、分析功能活动，建立航空发动机场景模型，基于场景模型完整地识别出航空发动机研制的需求。同时，鉴于航空发动机产品结构相对稳定，基于稳定的产品架构分析发动机的结构组成和接口关联，实现需求的分解和传递，进而分析试验内容、明确验证需求，形成结构化的试验项目清单，步骤如图1所示。

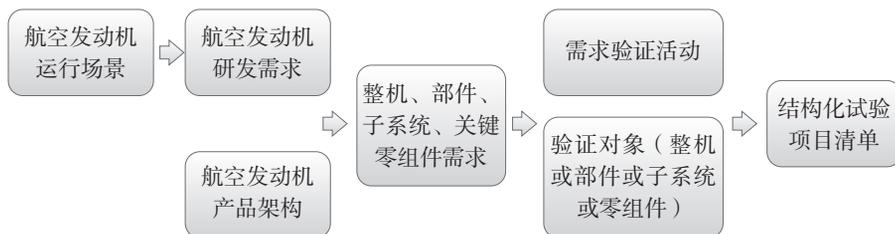


图1 结构化试验项目清单构建路径

## 试验一次成功的关键： 构建一次成功体系文件

针对各试验验证项目，承接需求和产品架构的验证要求，以任务工程方法为指导，以各试验项目一次成功为顶事件，详细定义各试验项目的“问题—场景—度量—设计—分析—效能”过程，并融入成功树、数据包络等系统预防技术方法，建立各试验项目的一次成功指导文件，全过程分析模型如图2所示。

### 设计试制问题分析

针对试验项目验证对象，以满足需求为判定标准，全面审视试验对象的“需求—设计—试制”的全过程，分析查找前期问题，制定规避措施。

“需求—设计”过程通常分析试验对象前期设计过程存在的问题。例如，试验对象在全阶段、全层级的设计任务是否都开展了，有无遗漏活动；设计结果是否符合分配给研发对象的需求；设计所用的关键技术成熟度等级是否满足要求；针对设计过程存在的问题，制定并实施设计风险规避措施等。通常可以基于产品的需求验证矩阵开展分析。

“设计—试制”过程通常分析试

验对象试制中存在的问题。例如，试验对象在全阶段、全层级的试制任务是否都开展了，概念阶段是否分析了可制造性需求的合理性、制造策略的合理性，方案阶段是否开展了工艺总方案、工艺设计与开发，开发阶段是否对试验对象的工艺性进行了审查，保证图样的可制造性；是否对试验对象生产过程及成品实物进行了全面检查，交付产品满足设计要求；开展工艺、装配过程对试验对象性能的影响；采用的制造关键技术成熟度等级是否满足要求；针对制造过程的问题，制定并实施试制风险规避措施等。

### 试验场景及能力分析

描述从试验需求到需求实现评估的“端到端”全过程和要求，确定所需的试验能力要素，分析试验环境并明确试验的假设条件，支撑各试验项目的实施部署。

一是“端到端”试验项目全过程描述。针对试验项目特点，建立试验项目的“端到端”全过程，通常包含试验需求、试验策划、试验方案设计、试验大纲、试验前评估、试验执行、试验结果分析和需求实现评估等。需说明的是，该过程主要描述的“端到端”试验全过程中

管控要求，侧重于各步骤实施要求，是从过程管控视角下建立的。

二是试验项目验证环境分析。定义试验环境的划分方式，定义试验环境的分类及内涵；针对各试验项目，确定验证环境，对比真实环境，明确试验环境的假设条件和约束，分析试验环境与真实环境的差异以及对试验结果影响。

三是试验能力分析。基于试验项目全过程，清晰界定各试验步骤执行所需的能力需求，明确实施任务过程所需的能力要素和保障条件。重点分析：试验实施的技术、技术管理、项目管理能力；试验实施的组织能力；试验实施的信息技术能力；试验实施的设备能力；意外情况（风险、安全性问题等）的应对能力。针对试验能力需求，结合企业当前的试验能力，明确能力差距，并分析差距对试验结果的影响。

### 试验度量指标定义

建立各试验项目的成功标准和度量指标，作为判定试验是否成功的判据标准。度量指标建设主要考虑以下3个方面。

一是试验系统效能度量指标（MOE）定义。包括试验成功的标准度量，试验中希望获得的功能、性能、通用质量特性、作战适用性等指标和试验效果的评价标准等，还包括试验中的主要限制参数、监控参数、测量的参数和项目等。

二是指标量化。指标必须是量化的，并包含容差要求，并应明确门限值（或阈值）和目标值，如某次试车时，发动机推力的最低值（门限值、阈值）和期望值（目标值）。需说明的是，试验项目门限值的确定需要一系列基础数据的支撑，通



图2 基于任务工程的试验项目分析模型

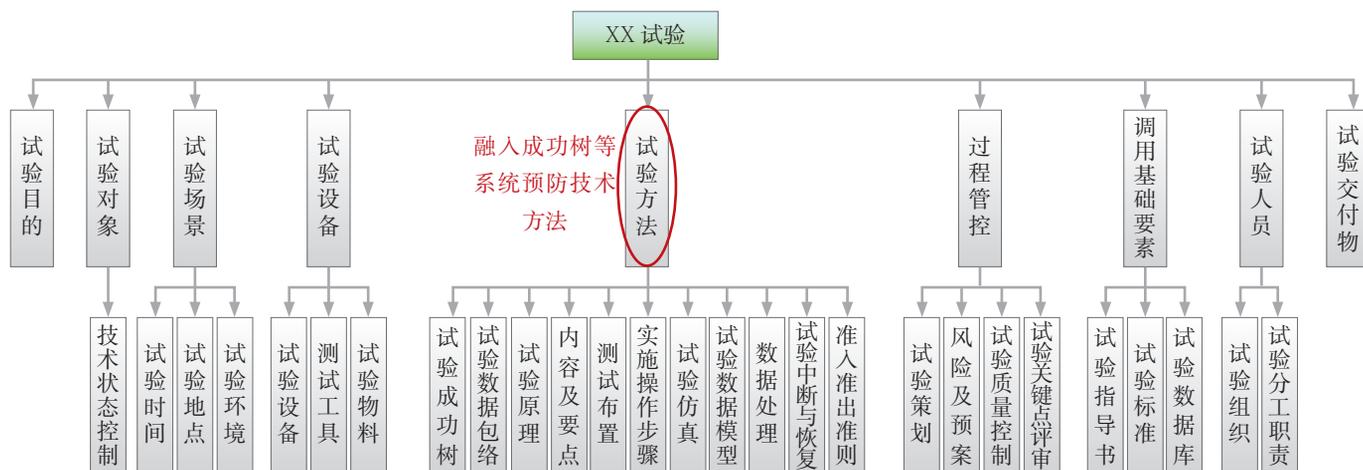


图3 试验设计和定义的要素

常需开展试验的数据包络分析、试验指标参数的探边摸底等。

三是关联的MOE分析。要说明相关度量指标和上级需求的关联关系，确保对上级试验的可支撑性。可依据MBSE中的需求模型、架构模型等进行分析。

### 试验设计与定义

详细定义具体试验项目的实施过程，包括步骤、要求、实施方法、数据模型和相关基础要素等，如图3所示，保障试验项目高效有序地开展，试验结果满足度量指标要求。

在试验任务设计与定义中，需融入成功树方法等技术，以确保试验任务一次成功为顶事件，通过由上而下逐个地进行一次成功因果逻辑分析，找出促使顶事件发生的关键环节、影响因素和控制因素，找出制约一次成功的薄弱环节所在，对各薄弱环节采取有针对性的措施，形成试验一次成功模型。

针对各试验项目，构建各场景的试验任务模型，规定试验目的、试验对象、试验场景、试验设备、试验方法、试验过程管控、通用基础要素、试验人员、试验交付件等相关内容，

用以“事前”详细检查试验前准备情况，“事中”规定试验过程和要求，“事后”试验结果处理分析。

### 试验执行分析

以试验度量指标为驱动，通过试验过程的仿真分析等，判定其与度量指标的可达性，通过试验方案的迭代调整，优化形成试验方案，保证试验结果与度量指标的符合性。迭代过程如图4所示。

### 系统预防理念的融入

系统预防理念的融入主要涉及系统预防技术、系统预防管理和系统预防文化等方面。

一是融入系统预防技术。系统预防技术是通过任务工程理念的导入实现的，通过任务工程的实施，保障在试验执行前，设计和试制问题得到全面的分析与解决、试验场景及能力定义清晰、试验度量指标及边界明确、试验实施过程详细准确、试验方案合理，并将成功树、数据包络、探边摸底和试验仿真等系统预防的技术融入试验全过程分析模型。

二是融入系统预防管理。针对单一试验项目，在试验项目的“试验设计与定义”中设置了过程管控

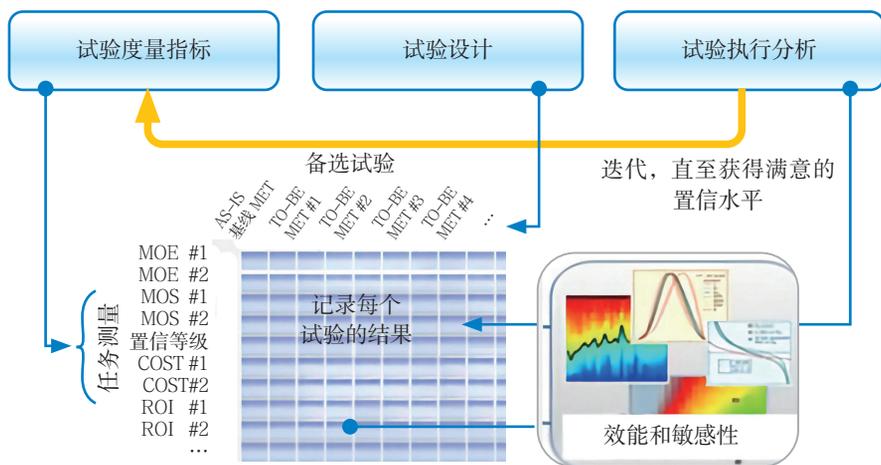


图4 试验分析与试验度量的迭代过程

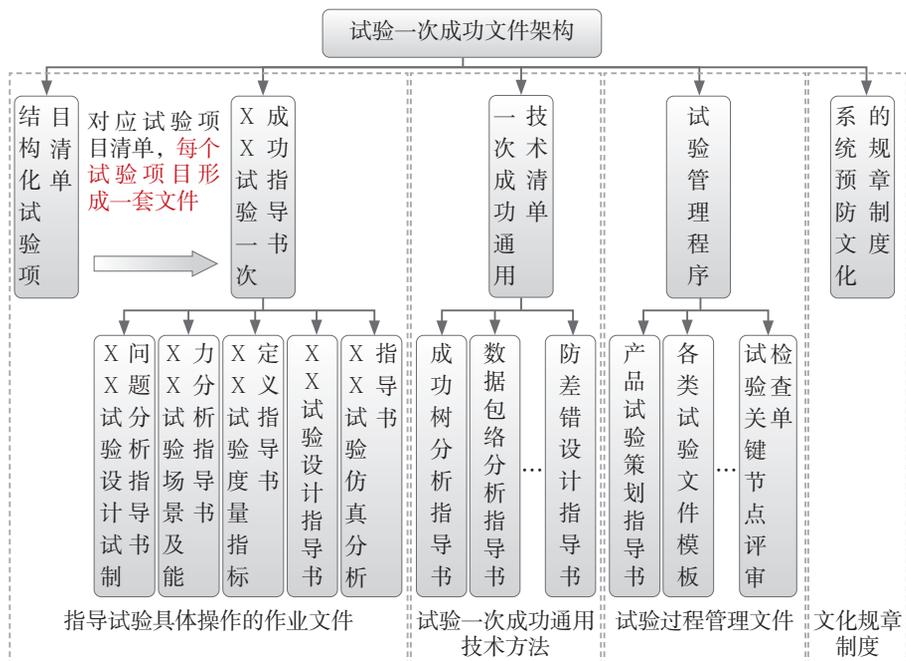


图5 试验一次成功文件架构

要求，从试验策划、试验风险、试验质量控制、试验关键点评审等方面，增强单一试验的系统预防管理能力。同时，在产品层面，产品设计之初需开展产品的总体试验策划，通常与产品架构设计并行，对试验项目和试验资源进行统筹规划并合理安排试验资源，确保科研试验全过程的质量、安全和保密等管理到位，提升科研试验效能和管理水平。对重要项目试验和重要科研试验进行重点管控和监督，以此促进各单位对其他科研试验的统筹推进，确保试验总体目标实现。

三是融入系统预防文化。对于系统预防文化一般不能直接融入试验指导文件中，通常是通过培训学习、评优评先和特色活动等方面的规章制度实现。但需说明的是，这类规章制度需要服务于试验文件体系，二者需相互协同。

### 试验一次成功文件架构

综合上述分析过程，构建试验一

次成功文件体系，试验一次成功文件体系大体包含4类文件，如图5所示。

一是指导试验具体操作的作业文件，包括结构化试验项目清单、各试验项目一次成功指导书以及下层作业指导书。该类文件是试验一次成功体系的核心文件。

二是试验一次成功的通用的技术方法，如试验成功树分析指导书、数据包络分析指导书等，体现的是系统预防基础技术能力。主要用于指导各试验项目开展自身的成功树分析、数据包络分析等，形成适用于具体试验项目的模型并融入第一类文件中，提升各试验系统预防技术能力。

三是试验过程管理文件，包括试验管理流程、产品试验策划指导书、试验方案/试验大纲/试验结果分析报告等交付物模板和试验过程关键点检查单等，体现的是系统预防管理能力，是对第一类文件实施过程的管控要求。

四是系统预防文化的规章制度。

## 试验一次成功的保障：构建仿真和验证平台

验证大体上划分为仿真验证和实物验证，试验一次成功文件的执行离不开试验仿真平台、实物验证平台的支撑。目前国内航空发动机试验验证所需的试验技术和试验设备，尤其是整机验证平台（包括地面室内试验、露天试验、高空台试验和飞行台试验等）与国际先进水平还存在一定的差距。

因此，验证平台的建设也是试验一次成功体系的重要建设内容。从仿真和试验验证需求出发，建立配套的仿真平台、验证平台（试验件、试验台/器/设施），为产品各层级验证提供能力保障；同步厘清企业现有的试验资源，通过改造等建立先期验证平台，验证试验关键技术，提升试验技术成熟度；摸底探边，暴露风险，降低正式考核试验的风险。

## 结束语

基于任务工程构建航空发动机试验一次成功分析模型，能够有效指导航空发动机试验任务的全过程分析，保障在试验前，影响试验的各方面因素得到全面识别，提升试验成功率；将系统预防技术、系统预防管理、系统预防文化融入试验一次成功分析模型，强调在试验执行前积极预防、试验执行中过程的管控，从管理上进一步提升试验成功率。

航空动力

（刘晓松，中国航发沈阳发动机研究所，高级工程师，主要从事航空发动机产品研发体系建设和系统工程研究）