

# 以“成功树”为技术保障的航空发动机试验质量控制方法及应用

## ‘Success Tree’ as Technical Guarantee of Aero Engine Test Quality Control

■ 陈伟博 贾琳渊 柏帅宇 姜繁生 吕春光 李天豪 / 中国航发动动力所

“成功树”技术保障分析方法是将“故障树”的事后处理变为事前预防的正向管控方法，把试验成功作为顶事件，依据关键环节、影响因素、控制因素层层分解，形成一棵试验“成功树”，提前采取针对性的措施弥补薄弱环节，确保与型号研制相关的所有产品、所有环节工作可靠。

**为** 加强试验质量管控,保证“设计一步到位、试制一次做对、试验一次成功”,确保型号首飞成功,创新团队构建了以“成功树”为技术保障的航空发动机试验质量控制方法,将试验过程管理由问题导向变为目标导向,确保了发动机飞行前考核试验一次成功和首飞一次成功。

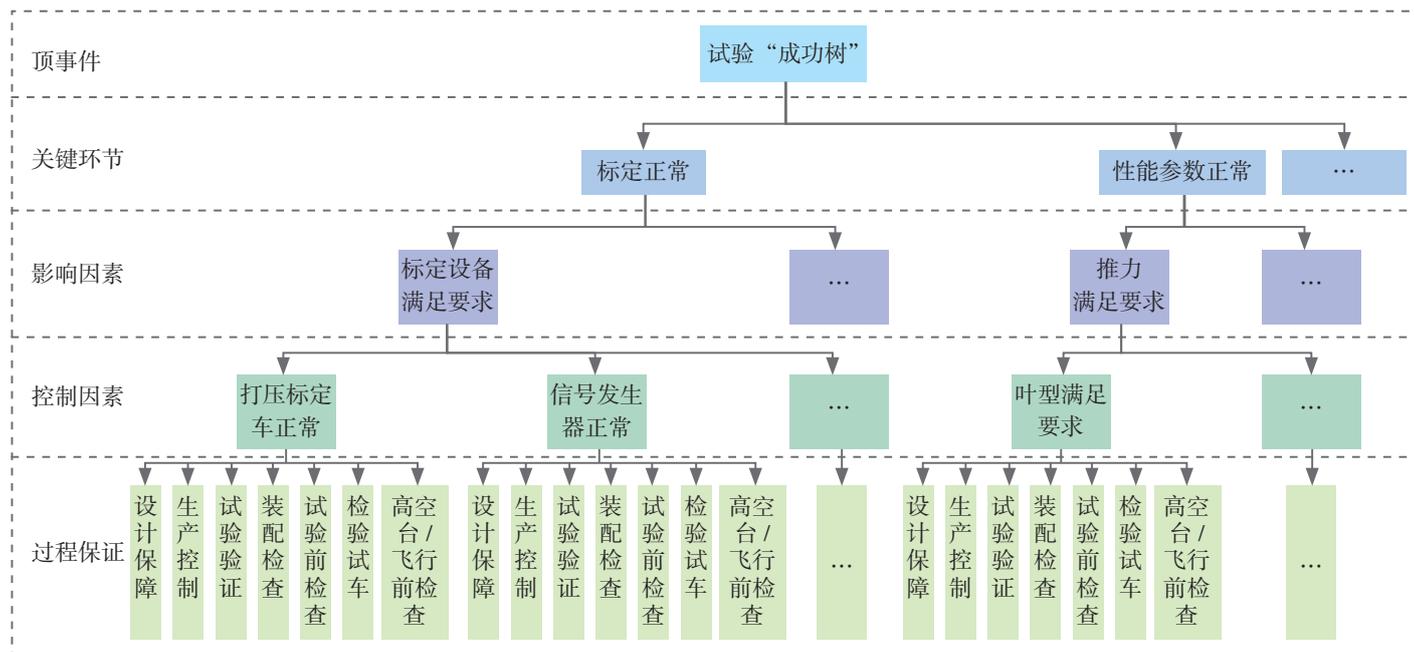
### 法构建 试验流程分解

将试验流程分解为关键环节、影响因素和控制因素。

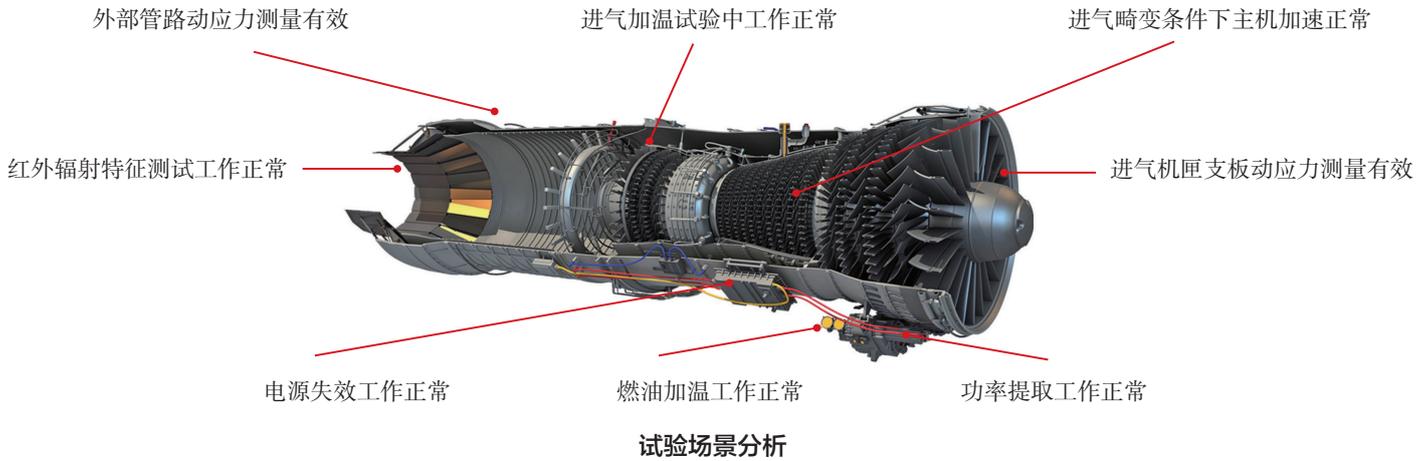
其中,关键环节是影响试验成败的关键工作项目,决定了“成功树”分析的思路,按照通用关键环节和具体场景关键环节划分为两类。通用关键环节从发动机各部件及系统等发动机硬件、工作表现进行划分,

如控制系统工作正常、装机测试系统工作正常、风扇(含进气机匣)工作正常、发动机振动正常等,适用于不同的试验任务。具体场景关键环节从发动机上台后的具体工作任务及工作场景进行划分,如发动机进气加温试验工作正常、燃油加温试验工作正常、进气畸变试验工作正常等,须根据具体的试验任务制定。

### “成功树”技术保障分析方



“成功树”分解



影响因素作为关键环节部件级要素。由发动机总体设计专业根据关键环节的内容，分解找出对关键环节的完成有影响的因素，将关键环节分解到相关部件、系统层级，并确定责任团队、责任人，找出影响因素，编制关键环节与影响因素分解表。

控制因素是保障各影响因素时需要控制的底层要素，是对影响因素的进一步分解。由部件/系统专业编制控制因素分解表。通常，允许不同的影响因素分解出相同的控制因素，在这种情况下控制因素应使用统一的名称和不同的编号，以便于查找、分析。部件、系统、成附件、试验、测试等专业针对每一个控制因素过程保证环节进行分析，使每一个控制因素在形成的全过程中都能采取保障措施，确保发动机从完成装配到试验结束都能正常、可靠工作。将过程处于失常，难以保证试验过程中正常、可靠的控制因素，均列为薄弱环节。例如，在用高空台试验考核亚声速巡航状态下的耗油率时，若耗油率不达标视为高空台试验不成功。此时须将可能导致亚声速巡航状态耗油率不达标的控

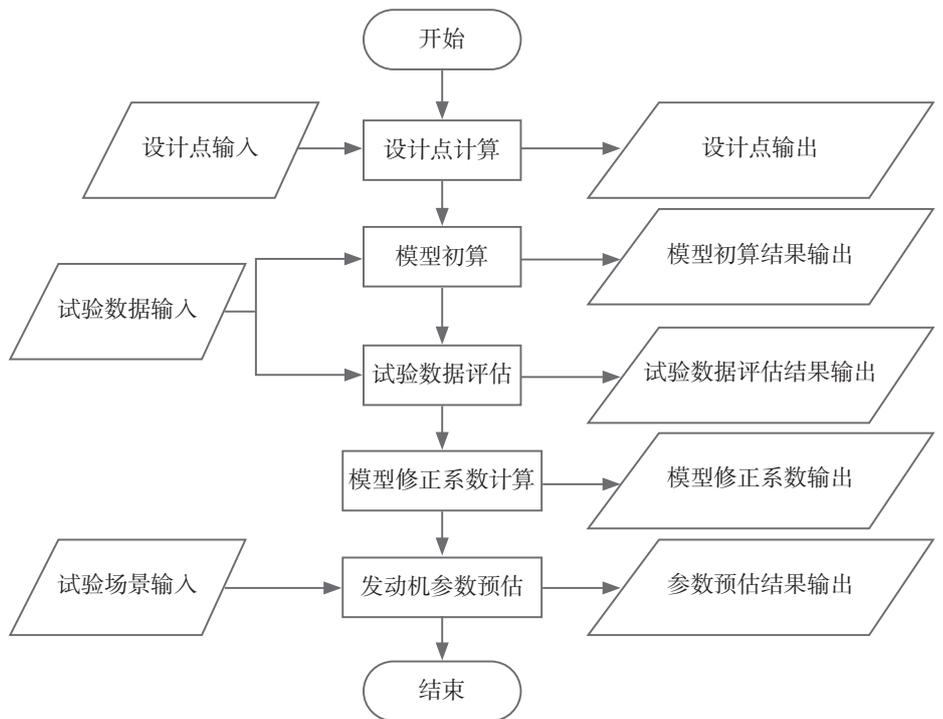
制因素列为薄弱环节，并提出解决措施。对不能完全确保的薄弱环节，进行风险分析，提出相关预案，编制薄弱环节与技术措施分析表。

### 试验场景分析

针对传统试验保障中关键、薄弱环节识别不到位等问题，创新团队提出基于场景的分析方法，识别了进气加温、滑油中断等发动机工

作场景，通过开发整机试车数据分析与性能预估系统，预测不同场景下发动机的工作参数，寻找薄弱环节，提前制定应对措施。

基于参数预估的技术保障方法是提升薄弱环节识别有效性的关键功能。航空发动机通常受零部件加工误差、装配误差等影响，整机实际性能表现偏离设计状态，为整机



整机试车参数预估计算流程

试验带来风险。创新团队自主开发整机试车参数预估系统，通过评估整机试车参数，获得发动机实际性能表现，进而预估不同场景下整机工作参数，实现“成功树”保障分析过程全程可追溯，提升各专业间数据交互的规范和效率。该系统的基本思路是以发动机已有整机试车数据为输入，采用试验数据同步分析方法实现整机参数的高精度重构，进而完成模型的自适应计算，使得模型能够反映当前发动机的真实技术状态。在此基础上，根据发动机的试验场景设定输入参数，并利用自适应模型预估不同场景下发动机的工作参数，例如，整机实际部件热负荷及轴向力等关键参数。这些预估结果可作为“成功树”过程保障分析中的输入条件，最终实现不同场景下薄弱环节的识别和预判，充分释放整机试验风险，为“成功树”技术保障分析奠定基础。

### 规范实施过程

试验“成功树”技术保障工作涉及到多专业、多岗位，在项目实施过程中，明确了每个专业的任务分工，并在每个环节设置了责任人，有助于各专业快速协调沟通，最后由技术专家对保障分析结果审阅把关，形成制度化、系统化管理模式，大幅提高团队工作效率。经过项目团队对“成功树”分析方法的不断完善，“成功树”分析已纳入到试验前评审及高风险试验质量管理流程中，助力考核试验一次成功。

### 闭环迭代提升

在应用实践中，发现在“成功树”保障分析过程中存在部分场景分析偏离、部分整机参数缺失等问题。为完善“成功树”分析方法，

开展“成功树”分析应用总结工作，将试车后总结纳入到下一轮“成功树”分析工作中，细化场景分析要求、完善整机参数计算，复查“成功树”分析工作是否全面、准确、到位，以改进完善分析工作。

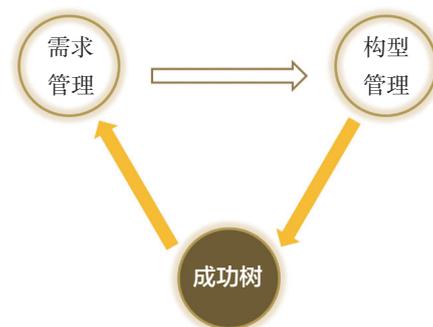
通过开展闭环迭代提升工作，加强了“成功树”理论分析保障方法与实际试验的关联优化迭代关系。创新性地形成“保障分析—开展试验—总结完善”的闭环质量迭代提升过程，加强技术分析和薄弱环节解决措施的经验积累，进一步提高后续试验的一次成功率，实现“成功树”的改进完善和不断成长。

## “成功树”技术保障分析方法应用

在将“成功树”应用于发动机试飞前的考核试验中，识别出薄弱环节40余项，所制定的应对措施能成功规避全部试验风险。首次开展的进气加温、燃油加温、高空进气畸变、滑油中断等高风险试验项目均一次成功。

在型号首飞应用中，识别出关键环节26条、影响因素149条、控制因素609条。针对识别的加力燃烧压力脉动偏大、外流道豁口裂纹等薄弱环节均制定了技术保障措施，全部薄弱环节通过正向质量管控成功规避。实现装机检查一次成功，地面滑行一次成功，型号首飞一次成功。

通过“成功树”的应用，创建了“正向设计—正向集件装配—正向试验保障”的全流程正向设计方法。基于需求管理设计试验任务，基于构型管理确定技术状态，基于“成功树”保障一次成功，补齐了研



优化研发流程

发流程的短板，提升了正向设计能力。同时提高了试验保障质量，为遏制质量问题增量提供了技术支撑，落实了集团“质量制胜”发展战略，探索出一条缩短研制周期，保障研制成功的可行路径。

## 结束语

本项目的创新点主要包括：突破试验过程管理思维，将试验管理由问题导向变为目标导向，将要素主导转为过程主导；创新试验场景分析方法，开发整机试车参数预估系统，通过整机参数预估来提升薄弱环节识别的有效性；创建了试验保障正向设计方法，补齐了正向研发流程的短板，提升了正向设计能力。本项目为集团战略中“一次成功”的工程落地提供了方法和应用支撑，形成了规范化的试验过程保障正向设计方法，编制了相关的规范、标准等体系文件，支持了中国航发运营管理体系（AEOS）的建设，并纳入质量工具包作为集团案例推广应用于其他型号，使“成功树”的种子不断在航空发动机行业的沃土上生根发芽。

航空动力

（陈伟博，中国航发动力所，工程师，主要从事航空发动机总体性能设计技术研究）