

成功树在发动机首飞前摸底试验中的应用

Application of Success Tree in Engine Test Before First Flight

■ 谢亚东 / 中国航发 王旭 谢荣华 杨晰琼 / 中国航发动研所

探索成功树管理工具在民用涡轴发动机AES100首飞前摸底试验中的应用，利用体系化管理思维开展全流程任务与风险管理，将事后补救转化为事前谋划，有效减少设计、试验、制造等各环节的反复迭代，从而实现“一次成功”的目标。

航空发动机的研制过程，就是持续与“风险”和“故障”角力的过程。以发动机型号为例，首飞前的设计和试验工作，需要总师单位根据对适航要求的理解进行系统研判，也需要总师单位通过设计保证体系对供应商进行延伸管控，以实现整机、系统及附件的试制质量控制。因此，首飞前摸底试验对发动机首飞，乃至整个研制过程来说，都是至关重要的。作为重点里程碑任务，首飞前摸底试验任务涉及面广，资源需求量多，任务难度大，时间进度紧张，任务完成存在较大风险，这就需要有效的管理工具来保障工作的有效推进与最终成功。

成功树技术保障分析方法源自航天系统重点型号研制实践的经验总结，基本原理是依托工程与风险管理理念，对中心任务全流程中每一子任务、子环节进行分解并深入分析，发现其中风险并采取针对性措施，以达到研制一次成功的目的。研制团队利用成功树工具，对AES100涡轴发动机首飞前摸底试验进行综合保障分析，梳理任务及风险项，制定相应举措，保证发动机

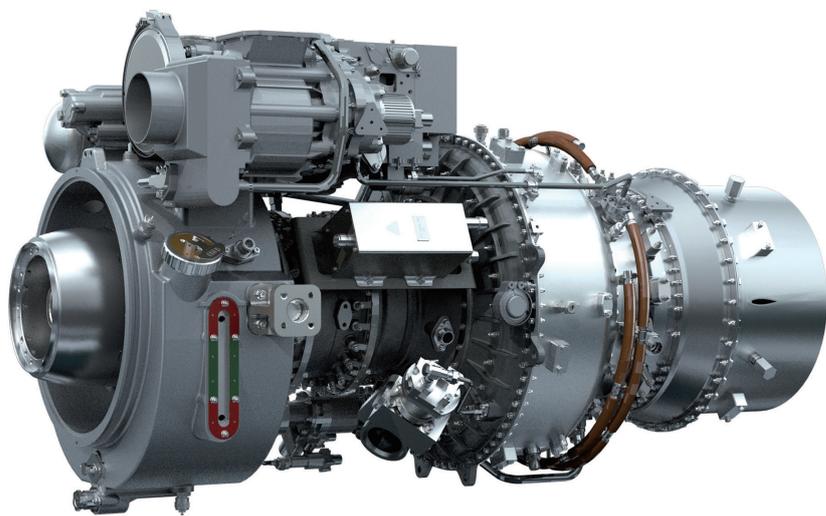


图1 AES100涡轴发动机

在首飞前摸底试验中一次成功。

成功树构建的总体思路

在总体原则上，AES100研制团队参照《航空涡轮螺旋桨和涡轮轴发动机通用规范》要求，借鉴已取证型号首飞前试验经验，严格按照CCAR-33-R2《航空发动机适航规定》确定首飞前试验要求、程序与科目。

在构建逻辑上，以“首飞前摸底试验一次成功”为顶事件，按照事件完成所需的全部条件为逻辑基点，逐级对涉及的工作项进行穷尽，分解至任务边界清晰、责任主体单

一的底事件为止。

在完成成功树整体架构后，对底事件任务进行风险识别，针对中高风险的底事件制定相应的关键影响因素分析、保障措施制定及具体计划节点安排。成功树构建完成后，通过动态管理、迭代更新，推动成功树节点任务不断达成，最终实现项目成功。

成功树应用实施步骤

根据设计流程梳理要素形成成功树基本架构

按照设计体系流程，梳理出首



图2 成功树架构（试验部分）

飞前摸底试验顺利完成所需的设计、试制、试验全部要素，分解出发动机技术状态完备、发动机实物完备和试验工作完备等3项业务域工作。

对业务域工作按层级进一步细分，可得出后续子任务。例如，对试验工作进行进一步细分，得出试验条件完备、试验方法科学合理和试验科目齐全的子任务，试验条件可分解出整机、部件、系统的车台设备、窗口周期等子任务项，试验方法可分解出整机、部件、系统试验方案、流程、数据处理等子任务项，试验科目则需明确所有首飞前整机、部件、系统和成附件摸底试验任务

项，成功树部分构架如图2所示。

成功树构建的最终目的是实现复杂系统类工作的一次成功，其有别于故障树模型，在搭建过程中，十分注重工作项的完备性。在工作包逐级展开的过程中，对于展开的颗粒度可以根据项目实际需要进行调整，对分属不同任务区的任务展开颗粒度也可以有所侧重和不同。需要注意的是，为避免漏项或重项，同一任务包进行任务分解的逻辑要具备一致性，如依据产品分解结构（PBS）、工作流程进行分解等。考虑到后续工作步骤，在基本架构搭建过程中，可根据该顶层任务复杂

程度进行适度分解（一般3~5层即可），无须直接分解至最底层。

针对工作项进行初步风险识别

按照成功树构建思路，对于大型复杂任务而言，全部分解至底事件所形成的完整版成功树非常庞杂，不利于项目管理的开展。在成功树中，需要对这些任务进行初步风险识别，并用可视化手段进行备注。通常从顶事件出发，对每一层级的任务进行梳理，并对其状态进行动态管理与更新。对于风险较小或可控的任务无须进行分解，而对于较大的任务项可再向下分解一级。

在发动机的数控系统、成附件、燃烧室技术状态确定后，对应任务项仅需要持续关注，其风险若在可控范围内，可不进行后续工作包的展开，以便于管理聚焦。设计部分的风险识别情况如图3所示。

进行风险量化分析，对风险项进行全面管理

首先需对任务进行风险等级划

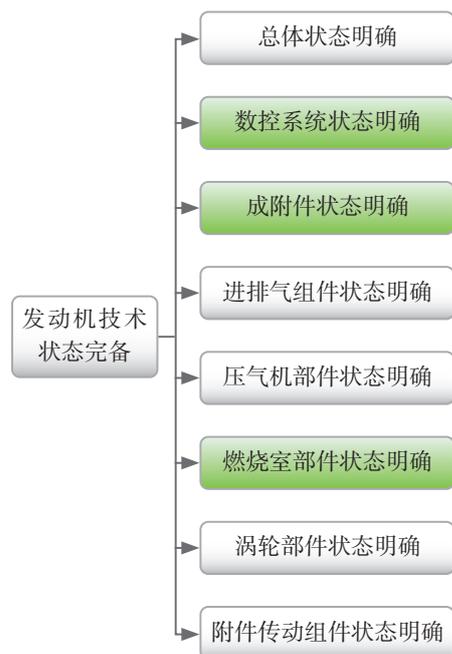
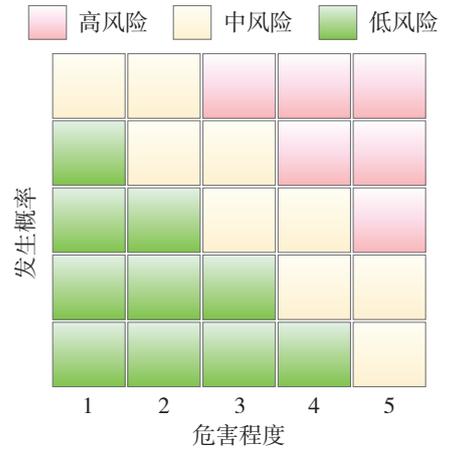


图3 成功树二级架构（设计）风险识别

表1 风险等级识别评分标准

| 评级 | 发生概率 | 危害程度/对任务的影响 | | |
|-----|---------------------|-------------|---------|------------------|
| | | 技术要求 | 节点 | 成本 |
| 高风险 | 极可能发生；存在的重大的未知的不确定性 | 需要重大改进或重新设计 | 超期3个月 | 产生原任务成本60%以上损耗 |
| 中风险 | 不大可能发生；存在未知的不确定性 | 需要局部改进 | 超期1~3个月 | 产生原任务成本20%~60%损耗 |
| 低风险 | 极不可能发生；几乎不存在未知的不确定性 | 只需少量优化改进 | 不会超期 | 产生原任务成本20%以下损耗 |



分，以便于重点管理。研制团队可采取通用的风险矩阵管理法，按照“发生概率”与“危害程度”对风险等级进行量化，并通过红、黄、绿颜色标识进行可视化管理。评分标准的设计是风险管理的难点项，须

根据顶事件总体要求把控，应尽量保证标准的可量化性。

对任务进行风险识别与量化后，对中高风险任务进行进一步分解，识别关键影响因素与具体风险项，形成保障措施与对应工作计划。

以涡轮部件试制加工为例，对该任务进行进一步分解与风险识别，在6项子任务中有3项低风险、2项中风险和1项高风险，如图4所示。针对高风险子任务进行风险分析，可得出因设计改进导致试制刀具需重

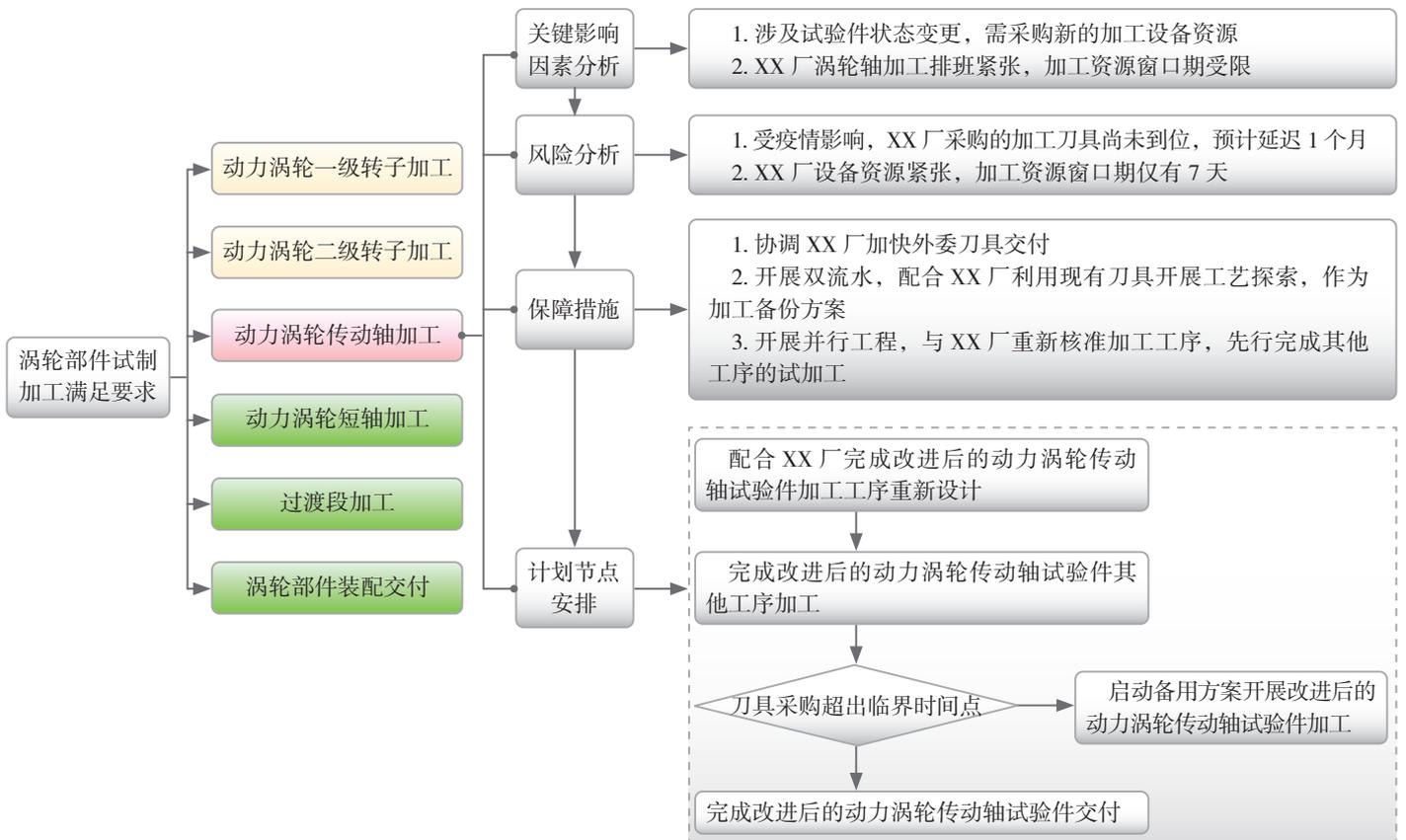


图4 涡轮部件风险任务全面管理

新采购，同时该试验件加工资源稀缺，窗口期紧张。基于以上风险分析，制定相应保障措施，对外开展刀具交付实时跟进，对内制订双流水加工方案，实施并行工程，根据倒排节点确定临界时间点进行计划安排，确保任务成功。

动态管理

在完成成功树构建后，依托成功树进行任务动态管理成为成功树是否取得实效的关键环节。在项目中，主要通过分层例会的管理模式进行动态管理与风险动态清零。

项目团队可根据成功树任务与风险分解情况落实责任人，通过专业级周例会形式统筹工作推进。每周采取周例会形式，首先对任务完成情况与低风险任务风险等级情况进行迭代更新，确保任务点及时闭环，风险点及时关闭。对于原有的中高风险任务，盘点每周工作关键点进展，及时进行计划调整与资源协调；对于新增的中高风险任务，研判风险等级提升的原因，并就关联任务进行分析，同步开展新增风险任务链的全面管理。

针对重难点任务，研制团队按照民机适航体系要求，将流程管理理念与成功树创新融合，将成功树中识别的关键任务与可能风险项嵌入流程节点，便于研制团队宏观把握任务全局的前提下聚焦“关键少数”，确保试验任务在适航质量体系下取得成功。

实施效果

通过运用成功树进行全局分析，总师系统科学制定了各项任务的，系统地解决了在复杂系统性整机试

验中存在的局部技术“梗阻”、零组件不匹配、试验资源利用不合理等问题，在试验资源与试验周期异常紧张的情况下，一次性通过全部13项整机首飞前摸底试验，提前完成了项目里程碑任务。

难点及待加强事项

成功树本质上是以重大事项任务为牵引，对计划与风险管理的重新组合，其核心在于计划任务的完备性与风险识别的准确性，即“不漏项”与“无盲点”。在实际操作过程中，主要有以下两项难点工作。

一是对任务项分解程度的把控。成功树分解过粗起不到管理效果，分解过细则会导致人力资源的浪费，并容易淡化对重点任务和风险任务的关注，分解程度需要总师系统统筹决策。对于新增/存在变化/重要节点的任务，需要进行细化分解重点管控。

二是对任务风险量化评估与全面管理。风险管理是成功树管理的核心难点，管理好坏直接影响成功树应用效果。在风险识别过程中，要找出产生风险的具体事项，避免出现模糊概念与宏观描述；在风险分析中，要对其关键影响因素进行仔细研判，转化为可量化表述。在实际工作中发现，对于技术相对成熟的研制团队，一般而言，资源风险的处理难度一般大于技术风险与进度风险（技术创新点与难点攻关除外），外部风险的处理难度一般大于内部风险。在成功树的实施过程中，科研与管理双线都是执行者而非监管方，需要充分发挥各自所长，守好各自阵地，才能确保重大项目的“一次成功”。

结合该项目成功树的应用情况，在后续的工作中以下几点有待加强。

一是促进“一次成功”管理理念与设计体系的深度融合。成功树工具是在设计体系不断走向完善的过程中应运而生的，通过成功树的运用，实现了一批重难点任务工程“一次成功”。将“一次成功”管理理念与方法融入设计体系流程，将“任务型”成功树逐步转化为“项目型”成功树，乃至“体系型”成功树。

二是促进仿真工具在成功树中的有效应用。目前成功树构建主要利用了项目管理与风险管理的理念，属于技术管理范畴，通过体系流程保障一次成功。后续可从技术端探索，以数据为基础，利用仿真工具通过线上模拟减少线下科研试验的频次，对高风险任务通过线上迭代试错查找问题，确保“线下”的一次成功。

三是促进成功树在重点管理项目中有效推广。成功树作为重点工程的有效管理工具，其内在逻辑与方法对于管理类工作也有很好的启发，通过在具体复杂管理工作项中成功树的应用，必将成为管理能力提升的优秀工具与作业指导。

结束语

随着航空发动机自主正向研发的不断加快，针对研制全过程、全流程开展型号研制“成功树”保障分析将成为未来项目推动的管理方式，通过成功树的有效运用，可有效减少“低层次”反复，提升型号研制效率，加快研制进程，保障型号研制成功。

航空动力

（谢亚东，中国航发，工程师，主要从事航空发动机项目管理与综合管理工作）