

# 适用于技术树的技术成熟度等级条件制定方法

## Technology Readiness Level Rating for Aero Engine Tech Tree

■ 宁怀松 刘太秋 王磊 杜桂贤 宋柳丽 / 中国航发动力所

为更好地把握、推动航空发动机技术研究工作，中国航发动力所开展了技术树的建设和应用工作，并使用技术成熟度作为技术发展情况的表征之一。提升技术树中相关技术的成熟度评价结果的准确性和评价工作的效率，是技术树得以有效利用的先决条件。

航空发动机的研发涉及大量复杂的多学科、多专业、综合性很强的先进技术，而且研发周期长、风险高、投资大，因此必须落实“产品与技术分离”：通过先期系统、深入地开展技术研究，夯实技术基础，强化技术储备，提前为发动机产品研发提供成熟的新技术，以降低研发风险，并促进产品不断改进完善、衍生发展。技术树类似于技术的“家谱”，是发动机研发全生命周期中应用到的技术的有序集合，涵盖设计、制造、试验、材料等全部专业领域，如图1所示。通过技术树，可基于产品研发需要，系统梳理各专业的技术，有效指导技术研究工作的开展，并促进已有能力的共享和重用；同时，技术树可作为技术研究工作的“战略地图”和“看板”，清晰、及时地展现各项技术的研究进展，有效发现“短板”技术，明确攻关方向，提升技术基金项目论证和立项的科学性。技术树中的技术是分层的，当前，对最底层的基础技术给出了其技术成熟度等级（TRL），如图2所示。针对技术成熟度评价在技术树中应用时面临的问题，按照“确定技术成熟度

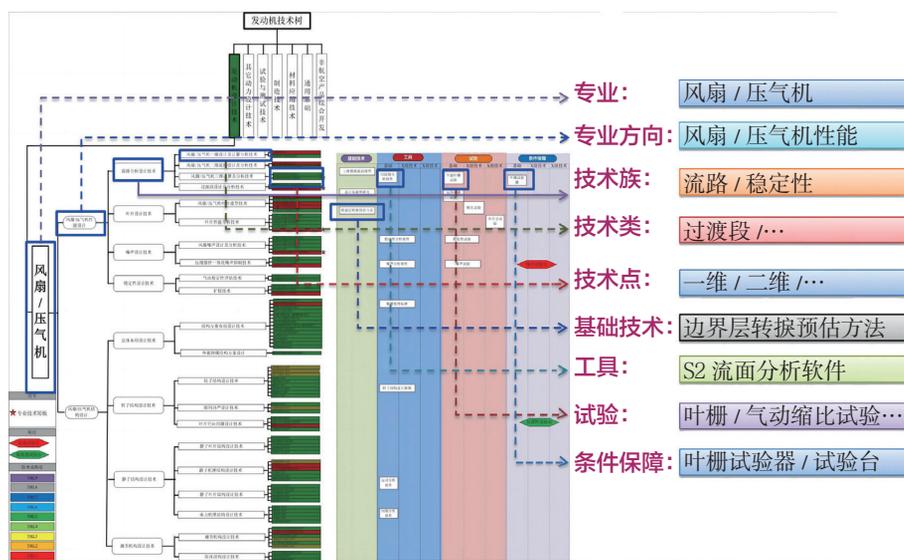


图1 技术树的架构示例

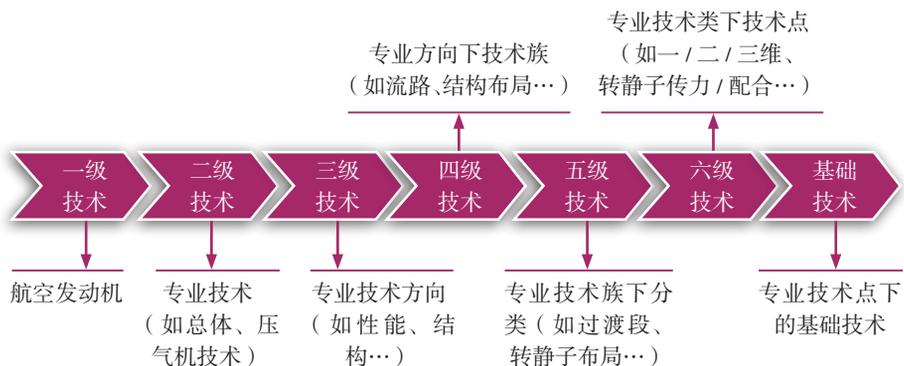


图2 技术树中技术的层级示意

评价维度—将评价维度细化为通用属性—完成技术树中技术的聚类—将通用属性转化为具体属性”的步骤，完善了技术成熟度等级条件制定的方法。

## 技术成熟度评价在技术树中应用时面临的问题

技术成熟度是指技术相对于特定项目的研发需求所处的发展状态，反映了技术对于项目预期目标的满足程度，重点从技术的形态和验证环境评估技术满足项目应用需求的情况，通常用技术成熟度等级表征<sup>[1-4]</sup>。

国军标（GJB）7688—2012《装备技术成熟度等级定义及划分》给出了一套9级的技术成熟度定义，并在其附录A中给出了技术成熟度等级条件（共计282条），为准确评判技术的成熟度等级提供了依据。需要注意的是，按照GJB 7688，相关技术成熟度等级条件的应用对象主要是以发动机产品（包括硬件和机载嵌入式软件）为技术载体（物化对象）的关键技术，这些等级条件用于技术树中技术的成熟度评价时，还面临如下问题。

一是适应技术树的实际情况。技术树中的技术种类多样且复杂，既包含了技术载体是发动机产品的技术，也包含仿真、试验、通用基础、材料工艺等方面的技术，需要针对技术树的实际情况，制定合适的技术成熟度等级条件。

二是需要兼顾技术成熟度评价结果的准确性和效率。通常，技术成熟等级条件越细致，评价的准确性越高，但评价周期也相应增加。考虑到技术树中技术数量众多，显然难以直接使用GJB 7688中提供的282项等级条件，而是要在满足国军标核心要求的前提下，合理地确定等级条件的细化程度，以兼顾准确性和效率。

三是需要兼顾技术成熟度等级条件的准确性和适用范围。技术成

熟度评价时，通常需要对每项关键技术制定技术成熟度等级条件，但技术树中有几千项技术，考虑到管理成本，不可能针对每项技术均制定技术成熟度等级条件，需要对技术树中的技术进行“聚类”，以便按类制定技术成熟度等级条件。

## 确定技术成熟度评价维度

根据GJB 7688中技术成熟度等级条件的关注重点及相关型号的技术成熟度评价工作经验，针对技术树的实际情况，设置如下5个方面的评价维度。

一是技术载体的状态。技术必须依附某项“载体”进行验证，也就是技术载体，技术载体为技术的验证提供平台。

二是验证环境。说明技术在什么“环境”下验证，如仿真环境、试验器、试车台和飞行台等。

三是验证方式。说明技术的验证方式，如分析、仿真和试验等。以试验为例，应明确各成熟度等级应完成的试验工作，确定需开展的试验项目及先后顺序，应注意“探边摸底”试验项目的开展。

四是验证指标要求。说明在各个成熟度等级要完成验证的指标，包括功能、性能、通用质量特性和作战适用性等，可结合发动机验证工作的安排，对照需求，明确各等级要验证的指标。

五是应用背景/需求的明确程度。本条主要针对技术树的特点，落实“技术与产品互锁”的要求。技术与产品的互锁是指技术研究工作均来自产品研发的需要，瞄准在产品中的应用，并且在完成相关研究工作后，技术可以应用到产品研

发中。按照上述理念，若某项技术没有应用背景/需求，则缺少了技术成熟度的对比标准，不宜开展技术成熟度评价；同时，随着技术成熟度等级的提升，相应的应用背景/需求也应该更加明确、清晰。因此，该项内容也反映了技术的成熟度程度，尤其是预先研究的相关技术。

## 将评价维度细化为通用属性

对照技术树的实际，对上述评价维度进行了细化，形成通用属性，见表1。

## 完成技术树中技术的聚类

为提高效率和可操作性，本文提出技术“聚类”的概念：将技术树中的技术按照一定的规则聚类后，针对该类技术，制定一套技术成熟度等级条件，用于该类别中所有技术的技术成熟度评价工作。

结合发动机研发实际，建议按照研发对象进行聚类，即将相关的技术聚类到研发对象上，这些研发对象是该类技术提升成熟度等级的验证平台。根据被聚类的技术之间的关联关系，可以同时在这个平台上验证，也可以分别验证。

具体聚类要求如下：有独立的/可验证的功能性能等指标的载体（可以是大型组件，也可以是零件），根据各研发对象的特点，必要的话，可进一步细化，但要确保可进行试验验证；以大型组件为聚类的依据，围绕大型组件的实现，将技术树中所有与之相关的技术进行聚类，作为同一类技术开展技术成熟度等级条件的制定；聚类时，不限定聚类的技术层级，但应确保聚类后的同类技术，可以使用同一套等级条件。

## 将通用属性转化为具体属性

表1所列的属性是通用的属性，还需要针对各类技术进一步的具体化，使用发动机研发的语言描述，形成具体属性，方能用于技术成熟度评价。具体化的过程中，应充分考虑技术的特点和发动机的研发实际，尽可能将相关内容明确、细化，且应满足对应原则、具体化原则和可操作性原则。

**对应原则。**按照一一对应原则，对使用的通用属性进行具体化说明，将其转换为符合所评价技术相应工作内容的具体属性。转换过程中，不能偏离表1所示通用属性的要求。

**具体化原则。**针对不同技术，其技术载体、验证环境、验证方式、验证指标要求、应用背景/需求等都有相应的特殊性，在具体属性的确定中，须将通用属性中相关名词术语转换为符合技术特点的术语，且这些术语应是专业人员均熟悉、不存在歧义的。

**可操作性原则。**具体属性应能使评价人员更加方便、准确的判别技术成熟度等级，从而使整个评价工作具有良好的可操作性。应结合发动机的研发实际，进行具体化，采用发动机研发的语言进行描述，要能直接对应到发动机研发的工作实际，并在专业内部达成一致。

采用表格的方式将通用属性具体化，每个评价维度使用一个表格进行细化。以“技术载体状态属性”具体化为例给出示意，见表2。

表1 技术成熟度评价维度细化为通用属性的示例

评价维度	细化后的通用属性		
技术载体的状态	纸面资料(1~2级); 模型样品(5级);	简化原理样品(3级) 原型(6~7级);	原理样品(4级); 实际系统(8~9级)
验证环境	虚拟环境/数字仿真环境(1~2级); 简易实验室环境(1~2级); 常规实验室环境(3级); 简单模拟环境,可对应到部件试验器(4级); 典型模拟环境,可对应到地面整机试车台架(5级); 相关环境,可对应到地面台架、高空台乃至飞行台等(6级); 典型使用环境,可对应到飞行台,可以是预定配装的飞机或其他机(7级); 使用环境,对应到在预定配装的飞机上完成相关验证和确认工作(8~9级)		
验证方式	理论分析; 部件/子系统试验; 本机试飞;作战使用	建模与仿真; 整机试验;	零组件试验; 他机试飞;
验证指标要求	基本原理的有效性(1~2级); 技术能力预测的有效性(3级); 主要指标满足总体要求,验证了技术应用的基本功能特性(4级); 设计指标满足总体要求,功能和性能满足设计要求(5级); 设计指标满足总体要求,功能和性能满足设计要求,工艺稳定性基本满足要求,关键材料和器件通过工程应用可行性分析(6级); 设计指标全部满足使用要求,功能和性能满足使用要求,工艺稳定,具备试生产条件,关键材料和器件质量可靠,保障稳定(7级); 功能和结构特性达到实际产品要求,战技指标全部满足实际使用要求,达到可生产水平,材料和器件等有稳定的供货渠道(8级); 具备使用保障能力,具备批量稳定生产能力和质量保证能力(9级)		
应用背景/需求的明确程度	提出应用设想(2级); 明确了预期产品的应用背景(3级); 应用背景比较明确,明确了预期产品的目标和总体要求(4级); 应用目标明确,技术指标和典型模拟环境要求明确(5~6级); 使用要求明确,战术技术性能和典型使用环境要求明确(7级); 使用要求明确,战术技术性能和使用环境要求明确(8~9级)		

按照技术成熟度评价的5个维度，参照表2的方式，逐一确定成熟度评价具体属性后，即可得到该类技术的技术成熟度等级条件。以喷管气动设计类技术给出结果示例，具体见表3。

表2 “技术载体状态” 属性具体化示例

技术成熟度等级	纸面资料(1~2级)	简化原理样品(3级)	原理样品(4级)	模型样品(5级)	原型(6~7级)	实际系统(8~9级)
1						
2						
.....						

表3 喷管气动设计类技术的技术成熟度等级条件

技术成熟度等级	技术载体的状态	验证环境	验证方式	验证指标要求	应用背景/需求的明确程度
1	研究报告或论文	虚拟环境/数值仿真环境	概念描述	喷管可将发动机燃气排出, 发动机产生推力或燃机输出功率	了解潜在用户(型号、项目)
2	研究报告、论文、仿真分析报告	虚拟环境/数值仿真环境	理论分析/数值仿真	喷管可将发动机燃气排出, 发动机产生推力	提出喷管排出燃气, 发动机产生推力的应用设想
3	喷管内流气动模型试验件/内外仿真模型流气动模型试验件, 或喷管仿真模型	喷管模型试验器, 或经试验校核的仿真分析软件	建模、仿真及气动模型试验	喷管推力系数、推力矢量角等性能能够满足预期的应用要求	明确了该技术的应用背景, 喷管用于航空涡喷/涡扇发动机
4	全尺寸喷管试验件, 制造能力和最终状态可不一致	全尺寸喷管/加力燃烧室试验器, 或其他发动机验证	全尺寸喷管部件试验	喷管推力系数、推力矢量角等性能能够满足目标发动机推出的总体要求	明确了计划使用该技术的喷管的研发目标和总体要求
5	全尺寸喷管试验件, 制造能力和最终状态可不一致	地面整机试车台架	地面台架整机试验	喷管性能指标满足目标发动机提出的总体要求	按照预期应用该技术的喷管的要求, 气动性能设计类技术指标已经明确, 对典型模拟环境的定义和要求已经明确
6	发动机喷管部件、单台制造能力, 关键材料和最终状态一致	高空台或飞行台	高空台试验或飞行台试验	喷管性能指标满足目标发动机提出的总体要求, 可生产性满足要求	按照预期应用该技术的喷管的要求, 气动性能设计类技术指标已经明确, 对典型模拟环境的定义和要求已经明确
7	发动机喷管部件、制造能力稳定, 更多的材料和最终状态一致	飞行台、目标平台或其他机平台	飞行台试验、本机试飞或其他机试飞	喷管设计指标全部满足使用要求, 可生产性、通用质量特性满足设计要求	按照预期应用该技术的喷管的使用要求, 气动性能设计类技术的使用要求、战术技术性能已经明确, 对典型使用环境的定义和要求已经明确
8	设计状态冻结的喷管部件, 小批制造能力, 所有材料和最终状态一致	在目标装机对象上的鉴定试飞	状态鉴定试飞	喷管战术技术指标全部满足实际使用需求(含性能指标、结构指标等), 可生产性、通用质量特性等均满足实际使用要求	按照预期应用该技术的喷管的使用要求, 气动性能设计类技术使用要求、战术技术性能已经明确, 对典型使用环境的定义和要求已经明确
9	真实喷管部件、大批量制造能力(含材料)	装机批量使用	战评使用及功能延伸	作战适用性满足要求, 具备使用、批量生产和质量保障能力	使用要求、战术技术性能已经明确, 对使用环境的定义和要求已经明确

## 结束语

针对技术树的实际, 结合发动机型号技术成熟度评价工作经验, 构建了适用于技术树的技术成熟度等级条件制定方法, 在技术研究项目中进行了应用, 实现了预期目标。后续, 将结合产品研发体系建设工作, 同试验项目清单等工作结合, 进一步丰富、完善等级条件, 提升适用性和可操作性, 并为型号的技术成熟

度评价工作提供有效支撑。**航空动力** (宁怀松, 中国航发动力所, 高级工程师, 主要从事系统工程研究、发动机研发体系建设、喷管和排气装置设计技术研究)

### 参考文献

[1] 张新国. 国防装备系统工程中的成熟度理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013:47-48.

[2] 金慧萍, 孙杨慧, 刘晓松等. 技术成熟度在航空发动机研制中的应用研究[J]. 航空动力, 2018,(4):58-62.  
 [3] 张川, 索建泰, 金如山. 民用飞机低污染燃烧室的技术成熟度划分[J]. 航空工程进展, 2010,1(1):85-89.  
 [4] 李瑶. 航空发动机技术成熟度评价方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2010,23(2):47-51.