

# 技术成熟度在航空发动机研制中的应用研究

## Application of Technical Readiness for Aero Engine Development

■ 金慧萍/中国航发动控所 孙杨慧/中国航发商发 刘晓松/中国航发动动力所 张超凡/中国航发涡轮院  
于加辉/中国航发东安 迟杰/中国航发哈轴

技术成熟度是衡量技术对项目目标满足程度的一种度量方法，是项目风险管理的重要手段。通过对技术成熟度等级的演变历程、技术成熟度的应用情况开展研究，得出技术成熟度评价在航空发动机研制中的切入点与着力点。

**技**术成熟度是衡量技术对项目目标满足程度的一种度量方法，是项目风险管理的一种有力手段。从当前能获取到的公开材料来看，技术成熟度评价工作在国防采办的项目管理中的应用较多且取得了明显的效果，但在航空发动机领域的应用及效果还鲜有报道。本文以航空发动机为对象，通过调研与分析，研究技术成熟度在航空发动机产品研制中的应用场景、应用目的以及在实施技术成熟度评价过程中采用的标准、方法及工作的组织形式，提出技术成熟度评价在航空发动机研制过程中的应用建议。

### 技术成熟度概念的提出

20世纪60年代末，美国国家航空航天局（NASA）在一份报告中指出，预算成本的增加与进度的拖延是产品研制项目中普遍存在的现象，并提出在未来的产品研制项目中引入新技术时，需要开展技术准备就绪评审，由此提出了技术成熟度等级（TRL）的概念。随后，美国国防部（DoD）、欧洲航天局（ESA）、国

际标准化组织（ISO）等均以此为基础，发展了面向各自领域的技术成熟度等级。在技术成熟度评价细则方面，美国空军研究实验室（AFRL）、NASA等机构做了大量的工作，提出了TRL计算器，推动了技术成熟度在产品研制中的应用。

2001年至今，美国国防部在美国审计署（GAO）的建议下，通过DoD.2-R《重大防务采办项目和重大自动化信息系统采办项目强制程序》和DoDI5000.2《国防部采办系统运行》等一系列法规，逐步将技术成熟度引入到国防采办项目的管理当中，同时发布了《技术成熟度评价手册》，用于规范技术成熟度评价工作，这一系列举措也得到了其他国家的效仿。当前，在重大的研制项目或采办项目中应用技术成熟度评价来降低项目的风险，已经成为工业方、采办方的共识。

在科研计划管理和航空领域方面，以NASA、波音等标杆企业为主要代表，探索并实践了基于技术成熟度的科研管理模式。将技术成熟度评价用于重大科研项目管理中，比较典型的例子有早期木星探测器、

下一代运输系统等，技术成熟度在技术发展路线图以及项目的重大决策中都有体现。

### 技术成熟度评价的标准 NASA技术成熟度等级

TRL划分及定义最早由NASA的萨丁（Sadin）提出，并于1989年正式发布。之后，曼金斯（Mankins）在此基础上对TRL进行了扩展，由原来的7级扩展到当前的9级，形成9级TRL定义，并于1995年在TRL白皮书一文中正式发布，其中包括了对TRL各等级定义的描述及应达到的标准。

#### DOD技术成熟度等级

1996—1999年，GAO的多份研究报告显示，由于DoD在产品开发中采用了技术成熟度较低的新技术，导致项目存在很大的风险。因此，GAO建议在将新技术导入前，采用TRL标准对其进行评价。

2001年，DoD要求重大的武器装备采办项目采用技术成熟度进行评价。同年，DoD发布的国防采办条例DoD D5000.1和DoD I5000.2中给出了技术成熟度评价的指导意见。

在此背景下，DoD在NASA的TRL

理论上研究并形成了一套自己的TRL定义,并于2003年正式发布了《技术成熟度评价手册》。此后在2005年、2009年、2011年分别进行了三次补充修订。其中2011年更名为《技术成熟度评价指南》。

### DOE技术成熟度等级

GAO在2007年发布了一份关于美国能源部(DOE)项目执行情况的报告,其中指出DOE过早引入未成熟的技术是导致项目预算增加及进度拖延的一个关键原因。GAO建议DOE借鉴NASA与DoD的技术成熟度评价方法来评估DOE重大项目中新技术的成熟程度。在此背景下,DOE也编制了一套TRL定义,并于2008年发布了《技术成熟度评价指南》。

### ESA技术成熟度等级

ESA在2008年针对航天项目发布了《空间应用技术成熟度评价手册》,其中也制定了一套TRL 1~9级的定义。

### ISO技术成熟度等级

ISO在2013年11月发布了一份《航天系统:技术成熟度等级及评价准则定义》标准(ISO 16290)。该标准由ESA、欧洲空间研究与技术中心(ESTEC)牵头组织编写,成员包括美国、法国、日本、英国、德国、巴西和乌克兰等7个国家约30名代表,它是第一份国际性的技术成熟度标准。

### 国军标GJB 7688

进入21世纪以来,技术成熟度评价方法也逐渐引起了国内的关注。结合国内长期的科研和工程实践经验并基于对国外技术成熟度等级理论的跟踪研究,在国防科技领域,国家科技部,总装备部装备论证中心、技术基础局,工业和信息化部

先后组织编制了《装备技术成熟度等级定义及划分》和《装备技术成熟度评价程序》(GJB7688/7689)。

### 技术成熟度等级定义的差异性分析

对比NASA、DoD、DOE、ESA、ISO 16290以及GJB 7688这6个机构颁布的TRL定义可看出,其本质涵义是基本相同的,都选择了相同的技术成熟起点和终点,并且将技术成熟度划分为9级(其他5个机构的TRL定义都是基于NASA的9级TRL发展而来)。6个机构TRL定义之间的差异在于其表述形式上,结合了各自所涉及的技术领域及技术特点:NASA、ESA是以空间系统的设

备类技术为背景的;DoD适用于更广泛的装备技术;DOE在借鉴DoD的基础上,结合了能源技术的特点;ISO 16290则是面向航天技术领域,对各个机构的TRL定义进行了统一(通用性较强);GJB 7688的TRL定义由于也是针对装备技术,与DoD的基本相同。6个机构TRL定义在表述上的差异可以归为“技术载体”和“验证环境”这两方面,表1归纳了6个机构针对TRL 4~8的技术载体及验证环境,由于TRL 1~3技术载体和验证环境比较明确,且差异不大;TRL 9均是“实际系统”执行“使用任务”,并无差异。因此,主要的差异表现在TRL 4~8之间。

表1 各机构针对TRL定义的差异性分析

TRL	NASA	DOD	DOE	ESA	ISO 16290	GJB 7688
技术载体						
4	部件和/或面板	部件和/或面板	部件和/或系统	部件和/或面板	部件和/或面板	原理样品或部件
5	部件和/或面板	部件和/或面板	实验室范围,类似系统	部件和/或面板	部件和/或面板	模型样品或部件
6	系统/子系统模型或原型	系统/子系统模型或原型	工程/飞行员范围,类似(原型的)系统	系统/子系统模型或原型	模型	系统或子系统原型
7	系统原型	系统原型	完整范围,类似(原型的)系统	系统原型	模型	系统原型
8	实际系统	实际系统	实际系统	实际系统	实际系统	实际系统
验证环境						
4	实验室环境	实验室环境	实验室环境	实验室环境	实验室环境	实验室环境
5	相关环境	相关环境	相关环境	相关环境	相关环境	相关环境
6	相关环境(地面或太空)	相关环境	相关环境	相关环境(地面或太空)	相关环境	相关环境
7	太空环境	运行环境	相关环境	太空环境	运行环境	典型使用环境
8	飞行鉴定	鉴定	鉴定	飞行鉴定	飞行鉴定	使用环境

## 技术成熟度的应用 在国防采办业务中的应用

美国DOD强调只有成熟的技术才能应用于拟采办的设备中。技术管理过程在于确保这种技术的成熟性，然后才能将技术交付产品开发。该过程首先是概念研究，对未来产品的市场机会和客户需求的持续评估，以评估新技术或产品配置改进的可行性，从而在最佳程度上满足客户要求。概念上的研究有助于确定和优选技术，产生完整的技术组合。如图1所示，一般在里程碑A提出技术开发策略，在里程碑B、C强制开展技术成熟度评价，以促进方案优化。自2000年以来，DOD的国防采办程序进行了多次调整，但无论如何调整，采办项目基本上可分为概念研究、技术开发、工程研制、生产部署四个阶段，每个阶段对技术成熟度有不同的要求。

概念研究阶段(A)：为了满足特定的需求，在该阶段需要考虑大量的与特定概念或技术选择方案有关的可用技术，为技术开发阶段提供足够多的技术选择方案。在概念

研究阶段，技术成熟度一般要达到TRL 3。

技术开发阶段(B)：经过技术攻关，在该阶段各项技术必须达到关键的技术指标要求，确保对系统性能的实现有足够把握。在该阶段需要明确项目的关键技术，并达到适当的技术成熟度等级，通常至少应达到TRL 5。经验表明，只有在相对真实的运行环境中对技术开展验证才能揭示技术存在的问题，因而也有人建议关键技术在该阶段需要达到TRL 7，即系统原型需要在实际运行环境中通过验证。

工程研制阶段(C)：系统的需求和关键技术指标要求应十分明确，一般会有几个备选的技术方案，为设计定型提供较为灵活的途径。在该阶段一般要进行系统集成和系统的验证，以确认系统已达到了设计的要求，技术成熟度要求达到TRL 8。

生产部署阶段：从工程研制阶段到生产部署阶段是一个重要的转折点，一般要求达到TRL 8时才可以转入生产部署阶段。技术需要在

真实系统上经过应用验证，技术成熟度应达到TRL 9。

## 技术成熟度在科研项目管理中的应用

NASA在制定技术发展路线中，应用由目的、目标、技术挑战和方法构成的GOTChA方法，识别项目/产品中的关键技术，针对每个候选技术，使用技术卡片描述该技术的关键信息，建立候选技术与能力、任务的追溯关系。通过引入技术成熟度，一方面给出当前的技术成熟度水平；另一方面制定技术交付时需要达到的技术成熟度水平，从而识别差距，通过结合当前的研究基础、资源等，更合理地定义技术的交付时间。另外，NASA在技术路线图规划过程中，通过技术成熟度建立技术的演进图以及不同技术谱系之间的支撑关系，实现对技术的追溯以及技术状态的管理。

## 技术成熟度在航空发动机研制中的应用

为了较为系统地了解航空发动机企业在产品研制过程中的技术成熟度应用场景、应用效果、技术成熟度评价过程及组织方式等，本文对GE、罗罗等行业标杆企业开展了针对性研究和分析，结合调研的结果，归纳标杆企业在航空发动机研制过程中技术成熟度的应用场景、技术成熟度评价过程以及应用效果等。

### GE公司技术成熟度应用情况

GE公司的产品/技术研发类项目在立项前需要开展技术成熟度评价，确定是否具备立项条件，或评估需要多久才具备立项条件。技术的成熟度是作为一个关键的风险评估项，在项目转阶段评审时评估技

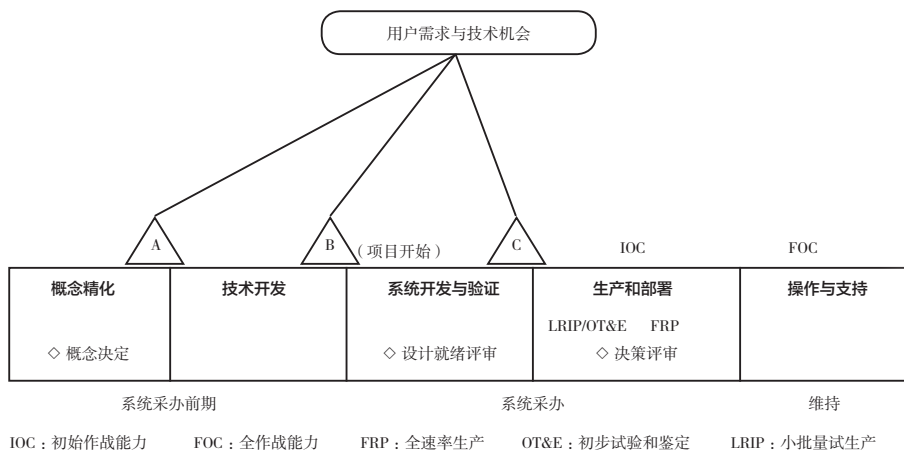


图1 DOD技术成熟度评价点



术风险是否可以接受。技术开发过程在GE公司是应用技术发展周期（TDC）过程，来定义期望的技术成熟度，该过程与新产品导入（NPI）过程中的阶段门评审关联。TDC过程定义了不同阶段（从阶段1～阶段7）技术开发的各项活动及检查项。阶段1～阶段7与阶段门1～阶段门9对应，就形成了对应的成熟度。在新技术向产品导入的过程中，对技术的成熟度要求会有差异性，通常需要权衡技术风险与技术可产生的收益，包括对产品、对企业未来竞争力的影响等。GE有多代技术实施计划，该实施计划根据多代产品实施计划的需求，识别出关键技术元素。技术规划委员会负责增加/修改关键技术元素。技术规划委员会成员来自于工程项目部、工程材料技术研究室、制造工艺技术部等。GE公司参与TRL评价的成员主要包括：NPI领导团队、NPI实施团队、TDC实施团队、技术应用团队、技术规划委员会、投资委员会等。

### 罗罗公司技术成熟度应用情况

罗罗公司在产品的立项及转阶段评审过程中，技术风险是关键考核项，技术成熟度评价是风险管理的主要活动。罗罗公司的技术成熟度等级与产品研制阶段没有统一的对应关系，结合罗罗公司的产品研制阶段的划分可以认为，在产品项目启动时技术成熟度要达到2；阶段1完成时，技术成熟度达到3或4；阶段2完成时，技术成熟度达到5或者6；在阶段3完成时，技术成熟度达到7或者8；在阶段5，技术成熟度会达到9。技术和产品开发阶段与技术成熟度的对应关系通常如图2和图3所示。罗罗公司的技术成熟

度等级与产品研制阶段的对应关系取决于风险管理的要求，例如，某项技术如果对满足客户的要求有很大的影响，则有可能在阶段1结束时就要求该技术的成熟度达到4或者5。

根据对行业标杆技术成熟度应用情况的调研情况，可以得出：

- 技术成熟度评价通常是作为风险评估与管理的工具之一，在项目立项阶段通常会开展技术成熟度评价，识别当前的技术风险并评估是否具备立项的条件；
- 在新技术向新产品导入的过程中，通过开展技术成熟度评价，预

测由于新技术的引入对产品或项目可能造成的潜在风险，为决策提供依据；

• 在决策新技术是否可以向产品导入的过程中，技术成熟度不是唯一的准入/准出标准，企业通常会从技术对产品的安全性、经济性，以及新技术的应用对企业市场地位提升、对客户需求的满足等多个方面综合考虑；

• 在新技术向产品导入的过程中，须针对技术准备就绪度水平低的技术短板开展技术成熟度提升活动，使其在规定的时间内达到相应的水平；

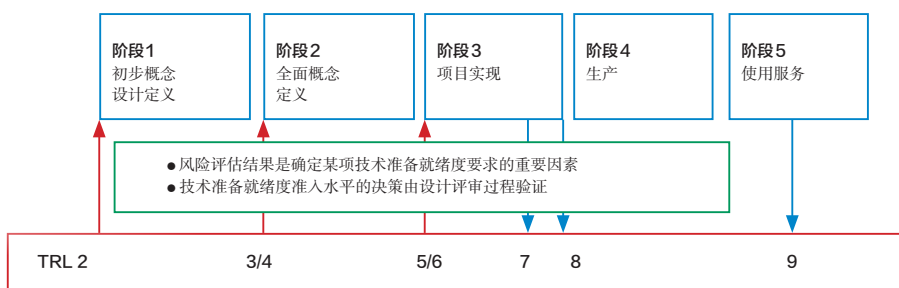


图2 典型的产品开发技术准备就绪度准入水平

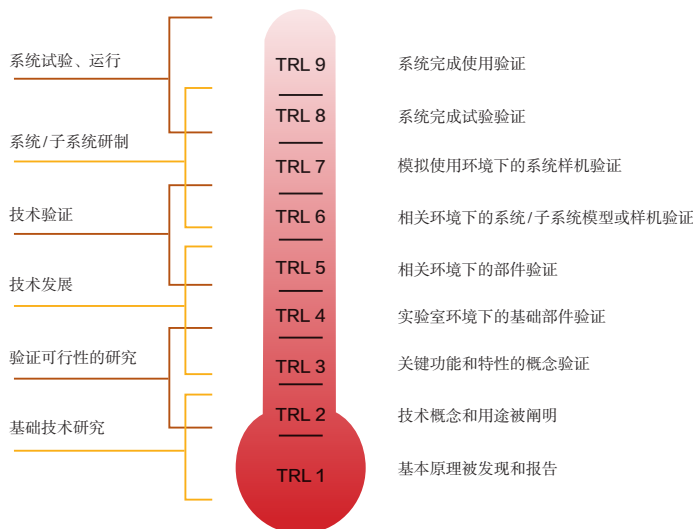


图3 技术开发各阶段成熟度对应关系

• 技术成熟度等级与研制阶段的对应关系，会根据可接受的风险水平来定义，由于同一个技术对不同产品、项目的影响不同，因此没有统一的对应关系。

## 技术成熟度在航空发动机研制中的应用建议

推进技术成熟度管理方法在国内的应用，应考虑国内外产品研发基础和模式的差异。国外发动机在进入工程研发阶段时，新技术应用率一般不大于5%，且备选技术充足；国内型号研制过程中新技术占比较大，备选技术不足。国外标杆企业均已成功开发多型产品，其全生命周期的数据、模型、机理库经过多轮迭代，已形成成熟的工程技术体系；国内尚无一型发动机具有完整的生命周期数据和模型，机理研究薄弱，工程技术体系尚不完整。因此，在借鉴标杆的基础上，要针对项目具体情况制定本土化的技术成熟度评价及管理模式，技术成熟度管理应嵌入产品全生命周期流程，在合适的时间，以合适的方法，用于合适的对象。

### 合理设置评价时机

在型号项目需求分析与定义阶段开展技术成熟度评价，识别新技术和短板，提出技术成熟度提升内容和目标。这种识别应是全系统的，考虑全生命周期内的各种使用场景，使产品开发周期、活动、资源投入的策划更加客观和科学。在型号项目初步设计和详细设计时，对关键技术开展成熟度评价和管理，减少试制与验证阶段及适航取证过程的技术风险。在预研项目指南中应明确技术成熟度目标等级，在任务书编制、课题验收阶段进

行技术成熟度评价和管理，有助于进一步明确预研技术的应用对象，匹配工程应用的需求。

### 技术成熟度概念应用于关键路径管理

充分利用关键技术元素可物化的特点，促进技术开发成果在实验室环境、相关环境以及典型使用环境下的完整验证和测试，积累工程数据，透析工程机理。

充分利用技术成熟度评价准则对机理、能力、验证深度的全方位要求，对承接项目关键任务的供应商，建议将技术成熟度评价纳入供应商管理中，及时暴露技术短板和缺陷，有的放矢地开展外包任务的过程管控。

型号项目应重视技术向产品准入的门槛值，一般不应低于TRL6。预研课题应重视技术向工程的准入门槛，一般不应低于TRL5，并为实现技术门槛而开展技术成熟度提升工作。

### 在不同的开发阶段应用不同的技术成熟度评价模式

组织应根据各型号项目具体情况采取不同的技术成熟度识别和评价模型。一般建议在需求分析和定义阶段，针对新功能、构型和有挑战的指标采用GOTChA方法识别关键技术，开展成熟度评估，实施技术成熟度提升工作。在关键设计和详细设计阶段：一是对前阶段关键技术进行回归评价；二是根据本阶段的开发情况，应用技术筛查法筛查关键技术元素，开展项目自评价或专家组评价，对达不到门槛的关键技术实施成熟度提升计划。

在不简化关键技术全生命周期应用环境和内在相互影响的条件下，

尽可能简化评价细则和管理过程。建议项目组以“自评价+专家评审”的工作模式。不在评价方式、规模上投入过多的人力。根据评价结果，应将精力、资源聚焦在技术缺陷和短板的提升上。

无论采用GOTChA还是技术筛查法，产品各层级在识别出本级具有的技术目标和挑战后，应将本级作为关键技术元素，实施技术验证与成熟度提升，将应对技术挑战所采取的技术以及下一级产品技术（包括软件技术与硬件技术），从技术的可行性方面设置评价细则。评价维度应包括：机理透析、模型仿真、样件、测量指标、通过准则、测试环境、技术的可重复性等。

## 结束语

技术成熟度评价是衡量技术准备就绪度的工具，该工具在重要的预研和型号项目管理中为预防承制方技术能力不足而出现的“涨、拖、降”风险产生了积极的作用。本文从技术成熟度等级的演变过程入手，对比了国内外不同机构的技术成熟度等级的差异，阐述技术成熟度等级提出的背景及应用价值。接下来，对国外标杆企业技术成熟度评价的应用场景、组织模式以及技术成熟度等级与产品研制阶段的对应关系开展研究，归纳了技术成熟度评价在产品研制中的切入点与着力点。在此基础上，结合国内发动机的研发模式与研制基础，提出了技术成熟度在航空发动机研制中的应用建议。

**航空动力**

（金慧萍，中国航发动控所，研究员，主要从事技术体系、科技创薪体系研究和管理）