

# 航空发动机技术成熟度评价方法应用研究

刘晓松,王桂华,刘庆东,贾淑芝,史妍妍  
(中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

**摘要:**为提升中国航空发动机研制项目中技术风险的管控能力,支撑项目决策,根据中国航空发动机研制特点,结合国外技术成熟度评价的成功经验,提出了 1 套适用于中国航空发动机研制的技术成熟度评价方法,重点针对航空发动机全生命研制周期内的技术成熟度等级控制要求、关键技术元素的识别方法、技术成熟度等级评价标准、技术成熟度评价工具等方面进行了介绍。通过选取典型项目作为试点进行验证,证明该方法有效、可行,能够实现项中技术风险的识别与管控,为中国航空发动机研制中技术成熟度评价方法的应用提供借鉴。

**关键词:**技术成熟度;关键技术元素;技术风险;航空发动机

**中图分类号:** V268.7      **文献标识码:** A      **doi:** 10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.06.014

## Study of Technology Readiness Assessment Methods in the Development of Aeroengine

LIU Xiao-song, WANG Gui-hua, LIU Qing-dong, JIA Su-zhi, SHI Yan-yan  
(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** In order to improve the capacity of control risk in Chinese aeroengine development and provide the basis of the decision-making, a readiness assessment method that was used in aeroengine development was presented by taking the advanced theory and practical abroad as reference. The method included the technology readiness level control required in the life cycle of aeroengine development, critical technology element identification, technology readiness assessment criterion, technology readiness assessment tool and so on, and the method was proved reasonable and feasible through one pilot project. It will be a useful reference to technology readiness assessment in Chinese aeroengine development.

**Key words:** technology readiness; critical technology element; technology risk; aeroengine

## 0 引言

技术成熟度评价方法是 1 种基于技术发展成熟规律、采用标准化测量等级对技术成熟度程度进行测评的系统化过程和程序。该方法确定的技术成熟度能够有效地反映单项技术相对于某个项目的预期目标的满足程度<sup>[1-2]</sup>。20 世纪 80 年代末,该方法由美国 NASA 在航天技术领域率先提出并使用;1999 年,美国国防部引入该方法,并在其项目采办中推广应用<sup>[3]</sup>。目前,技术成熟度评价方法已成为欧美发达国家在国防采办和科研管理中广泛采用的 1 种评估方法,也是产品开发和技术研究承担机构作为技术评估的手段,更是控制技术风险,确保装备研制质量,支持里程碑

决策的重要工具之一<sup>[4-7]</sup>。

航空发动机作为技术高度复杂的系统集成系统,其研制存在很大风险<sup>[8]</sup>。在既要提升发动机性能和可靠性,又必须采用新技术的前提下,在航空发动机研制过程中选择采用何种新技术,如何有效地评估新技术成熟度水平,成为控制发动机研制技术风险的关键环节。

本文针对中国航空发动机的研制特点,提出用于航空发动机研制的技术成熟度评价方法,主要针对航空发动机全生命研制周期内的技术成熟度控制、关键技术元素识别方法、成熟度评价标准、评价工具等方面内容进行介绍。

收稿日期:2016-07-21

基金项目:国家重大基础研究项目资助

作者简介:刘晓松(1983),男,硕士,工程师,主要从事系统工程、项目管理工作;E-mail:896210184@qq.com。

引用格式:刘晓松,王桂华,刘庆东,等.航空发动机技术成熟度评价方法应用研究[J].航空发动机,2016,42(6):90-94. LIU Xiaosong, WANG Guihua, LIU Qingdong, et al. Study of technology readiness assessment methods in the development of aeroengine[J]. Aeroengine, 2016, 42(6): 90-94.

## 1 全生命周期技术成熟度控制要求

参考国外军工产品研制的技术成熟度评价成功经验,结合中国对武器装备研制阶段的划分<sup>[9-10]</sup>,以及相关标准中对技术成熟度评价的规定<sup>[11-12]</sup>,根据中国航空发动机研制的特点,制定航空发动机技术成熟度评价要求。

### 1.1 技术成熟等级要求

航空发动机全生命周期内研制划分为7个阶段、3个里程碑以及若干决策点,研制阶段、里程碑、决策点设置如图1所示。技术成熟度等级要求主要结合这些里程碑、评审点制定,按照技术成熟度控制方的不同,将技术成熟度评价要求划分为军方控制点和研制单位自控点2条线。

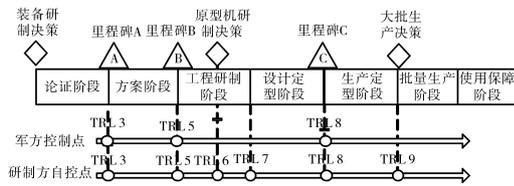


图1 全生命周期内技术成熟度等级要求

#### 1.1.1 军方控制点及技术成熟度等级要求

军方控制点主要依托航空发动机研制中的3个里程碑,其具体的技术成熟度等级要求如下。

里程碑A:型号立项的决策点,在项目立项评审前,项目中应用的关键技术需通过原理样件验证,并确认技术的重要特征和参数,技术成熟度等级至少要达到3级;

里程碑B:进入产品工程研制的决策点,在项目的方案评审前,项目中应用的关键技术至少要在技术验证机或模拟发动机工作环境部件实验器上得到验证,技术成熟度等级至少要达到5级;

里程碑C:发动机完成主要设计的决策点,在项目的设计定型评审前,项目中应用的关键技术需经过验证且被证明在其能够在最终形式和预期条件下工作,技术成熟度等级至少要达到8级。

#### 1.1.2 研制单位自控点及技术成熟度等级要求

研制单位自控点的设置相对灵活,除满足军方门控点要求外,其它决策点可根据项目具体的进展情况视情开展技术成熟度等级评价。其主要决策点的技术成熟度等级要求如下。

原型机研制决策点:工程验证机向原型机转段的

决策点,要求项目应用的关键技术成熟度等级至少达到6级;

大批生产决策点:进入批量生产阶段的决策点,要求项目应用的关键技术在真实环境下得到验证,技术成熟度等级达到9级。

### 1.2 对风险技术的应对措施

按照技术成熟度等级要求,对不满足技术成熟度等级的关键技术,可采取以下3种应对措施<sup>[13]</sup>:

措施1:推迟对应的评审;

措施2:用满足要求的替代技术;

措施3:将不成熟度的技术带入下一阶段。

如项目管理方选择措施3,研制单位应一并提交1份技术成熟度提升计划,阐明技术成熟度所能达到项目要求等级所需开展的验证、资源、时间等内容,并将计划纳入下一阶段的项目科研计划中推进实施。

通过制定航空发动机全生命周期各里程碑、决策点的技术成熟度等级要求,结合风险技术的应对措施的实施,可以实现对项目中的技术风险有效管控,从管理角度提升产品的设计质量。

## 2 关键技术元素识别

关键技术元素的识别是技术成熟度评价中的重要环节,也是项目开展技术成熟度评价的基础,可确定需要进行技术成熟度评价的关键技术元素,输出项目的关键技术元素清单。通常关键技术元素识别所需时间占整个评价时间的60%~70%<sup>[14]</sup>。

针对航空发动机项目研制,在每次技术成熟度评价开展前均需对相应研制阶段的关键技术元素进行识别:既不能保守,将相对成熟的技术识别为关键技术,导致项目管理成本的增加;又不能将相对不成熟的技术排除到关键技术元素之外,导致项目的技术风险得不到有效识别和控制。

关键技术元素的识别通常基于项目的技术分解结构,其目的是确保项目所应用技术被全面、完整地梳理出来。同时,通过技术分解结构可控制梳理技术的“颗粒度”,技术分解得过细,会增大技术成熟度评价的工作量,提升管理成本,分解太粗则起不到识别技术风险的目的。

技术分解结构的构建需基于项目的工作分解结构<sup>[15]</sup>,分析发动机的主要的功能构成,梳理发动机的子系统、部件级产品构成,需分解至项目的技术状态

项的层次。根据各子系统级、部件级的功能、性能指标,明确其实现的技术途径,从而确定实现系统、分系统和部件级产品的技术。航空发动机的技术分解结构如图 2 所示。

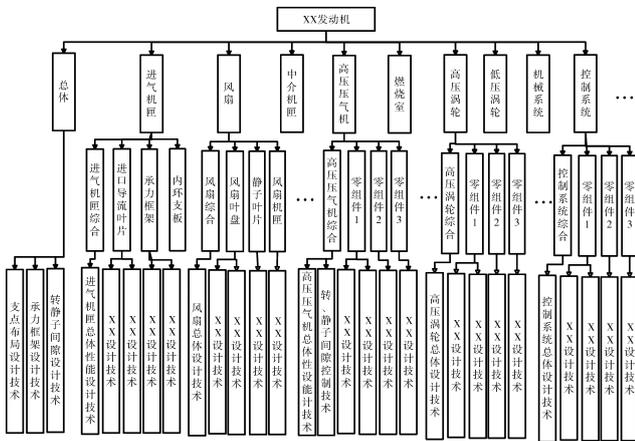


图 2 发动机技术分解结构

在项目的技术分解结构基础上,对技术进行筛选,确定存在风险的关键技术元素,对关键技术元素的筛选除满足其基本要求外,还要具备新颖性和重要性的特点,经筛选形成初步的关键技术清单。其具体的筛选准则见表 1。

表 1 单项 CTE 初步筛选准则

单个 CTE 识别准则
单个 CTE 基本要求(需全部满足)
1. 该技术具有明确的、可量化考核的技术指标
2. 该技术具备具有可物化、可验证的软、硬件技术载体
单个 CTE 重要性检查项(至少满足 1 项)
1. 该技术直接影响所属部幅统的需求(设计指标)
2. 依据发动机全生命周期技术成熟度等级要求,在下次里程碑决策评审点,该技术存在不满足成熟度等级要求的风险,进而影响到项目进度
3. 对技术概念的理解的局限性会导致潜在的成本风险,导致引起严重超支
单个 CTE 新颖性检查项(至少满足 1 项)
1. 该技术是新技术或改进技术
2. 该技术的应用环境有较大变化
3. 该技术会被用来实现超出其原设计意图的性能或已被验证的能力
4. 在以往的工程实践中,存在由于该技术不成熟对发动机造成故障? 是否有故障案例?

基于初步筛选的关键技术清单,通过界定每个关键技术元素的应用环境,判断每项关键技术元素的应用环境是否有重大变化,协调确定最终的关键技术元素清单。

### 3 技术成熟度评价标准

技术成熟度评价标准是成熟度评价方法的核心,包括技术成熟度等级定义和技术成熟度等级评价准则 2 部分内容。

技术成熟度等级定义描述的是关键技术元素相对项目预期目标的满足程度的度量,通常在技术成熟度评价过程中用于关键技术元素技术成熟度等级的初判,航空发动机研制的技术成熟度等级定义、描述以及含义见表 2。

表 2 航空发动机技术成熟度等级含义

TRL	定义	技术载体	验证环境
	技术基本工作原理		
TRL 1	已被观察并有相关报告(科学研究)	纸面资料	无
TRL 2	概念性地描述了技术的应用,并找到了有可能的应用对象	纸面资料	无
TRL 3	通过分析和原理样件试验已确认该技术的重要特征和参数	原理样件	试验室环境
TRL 4	部件和基本的子系统已经通过了试验验证	零组件	试验室环境
TRL 5	技术在部件试验器或技术验证机上得到验证	部件 / 技术验证机	模拟发动机的 工作环境(地面 试车台)
TRL 6	工程验证机在与实际工况类比的环境下得到演示	工程验证机	类比实际环境 (地面台架、高空台)
TRL 7	原型机在近似真实环境下得到演示	原型机	近似真实环境 (飞行台、串装试 飞)
TRL 8	通过了测试和验证,型号已完成研发工作,客户满意	原型机 (设计定型)	近似真实环境 (高空台、飞行台)、 真实环境(部队领 先使用)
TRL 9	型号已通过服务经验得到验证	批产(生产定型)	真实使用环境

技术成熟度等级评价准则是对技术成熟度等级各级包含工作的更为细致的划分,在技术成熟度评价过程中用于关键技术元素技术成熟度等级的详判,可通过逐条对照的方法判定关键技术元素是否达到相应的等级。航空发动机的评级准则是根据表 2 描述的航空发动机技术成熟度等级定义,参照通用的技术成熟度评价准则编制的<sup>[1]</sup>,航空发动机研制的技术成熟度 6 级的部分评价准则见表 3。

表 3 航空发动机 TRL6 评价准则

序号	TRL6 部分评价准则
1	确定并验证了与其他相关技术之间的相互影响程度。 了解发动机最终使用环境,如飞行包线(运行工况)、载荷、环境要求、发动机轮廓尺寸、质量、安装形式、功率提取、引气要求等。
2	完成工程验证机设计,设计计算分析达到了设计技术要求。
3	利用建模仿真手段模拟发动机在使用环境中的性能。
4	通过验证机试验验证,性能达标。
5	试验环境逼真度高,但还不是最终的使用环境,同时说明了与使用环境的异同。
6	

### 4 技术成熟度评价工具

为提高技术成熟度评价工作效率,规范航空发动机的技术成熟工作行为,采用信息化的方式集成技术成熟度等级的评判要求、评价流程以及评价准则,开发航空发动机技术成熟度评价工具,实现项目的评价要求的设定,技术成熟度等级的初判、详判,评价结果的自动计算、评价信息的存储等功能。

技术成熟度评价工具的使用流程及工具的部分操作界面分别如图 3、4 所示。

### 5 应用情况

选取航空发动机某研制项目的论证阶段作为试点,应用该方法开展了其工程适用性的验证。

项目在论证过程中,存在其关键技术识别不全面,识别的关键技术的“颗粒度”不一致,关键技术状态缺乏量化的考核方法等问题,直接影响项目技术风险的识别与控制,进而影响到项目的决策。

针对上述问题,项目团队根据全生命周期内的技术成熟度控制要求,确定了该阶段的关键技术元素的成熟度等级至少应达到 TRL3,即全部关键技术元素



图 4 航空发动机技术成熟度评价工具部分界面

至少要经过可行性分析,以及试验件的验证。

项目负责人召集各专业团队负责人,依据关键技术元素识别方法,完成了项目论证阶段的关键技术的识别,形成了关键技术元素清单,并依据技术成熟度评价标准,开展了关键技术元素技术成熟度等级的自评价,确定了各关键技术元素的成熟度等级。实现了关键技术元素的有效识别以及成熟状态的量化。

依据技术成熟度评价结果,对照该阶段技术成熟度控制要求,将技术成熟度等级低于 TRL3 的关键技术元素确定为项目论证阶段的主要的技术风险点;针对各技术风险点分别制定技术成熟度的提升计划,并将其纳入科研管理计划,结合计划的实施达到对项目技术风险识别与管控的目的,为项目的决策起到了重要的支撑作用。

### 6 总结

(1)关键技术元素的识别是技术成熟度等级评价的基础,通过构建适于航空发动机研制的技术分解结构,结合关键技术的识别准则,可以实现对关键技术完整、有效的识别;

(2)技术成熟度等级评价标准是技术成熟度评价的核心,合理制定航空发动机技术成熟度评价标准,可将项目中的技术风险“量化”,为技术风险的管控提供依据;

(3)通过制定航空发动机全生命周期内各里程碑、决策点的技术成熟度等级要求,识别并评价关键技术的成熟度等级,结合风险技术的应对措施,可实现项目技术风险的有效管控。

#### 参考文献:

[1] 黄鲁成,赵志华,傅晓阳. 产品技术成熟度研究综述[J]. 科学管理研究,2010, 28(2):38-44.

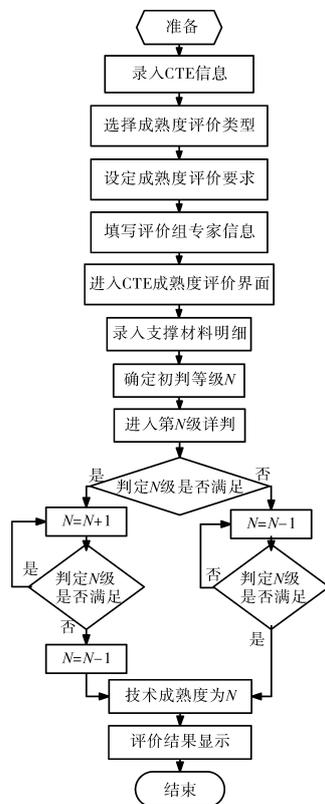


图 3 技术成熟度评价工具使用流程

- HUANG Lucheng, ZHAO Zhihua, FU Xiaoyang. Review on the technology maturity of product [J]. Scientific Management Research, 2010,28(2):38-44.(in Chinese).
- [2] MANKINS J C. Technology readiness levels [R]. NASA White Paper, Washington D.C.:NASA, 1995.
- [3] 王立学,冷伏海,王海霞.技术成熟度及其识别方法研究[J].现代图书情报技术,2010(3):58-63.  
WANG Lixue, LENG Fuhai, WANG Haixia. Research on technology readiness level and identified methods[J]. New Technology of Library and Information Service, 2010(3):58-63. (in Chinese)
- [4] 安茂春. 技术成熟度评价与应用 [J]. 计算机测量与控制,2012,20(12):3277-3278.  
AN Maochun. Technology maturity assessment and application[J]. Computer Measurement and Control,2012,20(12):3277-3278.(in Chinese)
- [5] 吴燕生.技术成熟度及其评价方法[M].北京:国防工业出版社,2012:3-21.  
WU Yansheng. Technology readiness and its assessment method[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2012:3-21.(in Chinese)
- [6] 袁家军.航天产品成熟度研究[J].航天器工程,2011,20(1):1-7.  
YUAN Jiajun. Study of aerospace product maturity[J]. Spacecraft Engineering,2011, 20(1):1-7. (in Chinese)
- [7] 李瑶.航空发动机技术成熟度评价方法研究[J].燃气涡轮实验与研究,2010,23(2):47-50.  
LI Yao. Aeroengine technology readiness assessment [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2012,23(2):47-50. (in Chinese)
- [8] 江和甫,万里勇,司荣宁.技术风险评定方法:技术应用风险等级[J].航空科学技术,2010(1):17-20.  
JIANG Hefu, WAN Liyong, SI Rongning. An risk evaluation tool: technology application risk level [J]. Aeronautical Science and Technology, 2010(1):17-20. (in Chinese)
- [9] 张健壮,史克禄.武器装备研制项目系统工程管理[M].北京:中国宇航出版社,2015:26-30.  
ZHANG Jianzhuang, SHI Kelu. Systems engineering management for weapon and equipment development [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House,2015:26-30.(in Chinese)
- [10] 总装备部. GJB8113-2013 武器装备研制系统工程通用要求 [S].北京:装备部军标出版发行部,2013:1-10.  
General Armament Department. GJB 8113-2013 General requirements of systems engineering for weapon and equipment development [S]. Beijing: Military Standard Publication and Distribution Section of General Armament Department,2013:1-10.(in Chinese)
- [11] 总装备部. GJB7688-2012 装备技术成熟度等级划分及定义 [S].北京:装备部军标出版发行部,2012:1-12.  
General Armament Department. GJB 7688-2012 Classification and definition of the technology readiness levels for materiel [S]. Beijing: Military Standard Publication and Distribution Section of General Armament Department,2012:1-12. (in Chinese)
- [12] 总装备部. GJB7689-2012 装备技术成熟度评价程序[S].北京:装备部军标出版发行部,2012:1-8.  
General Armament Department. GJB 7689-2012 Procedures of technology readiness assessment for materiel [S]. Beijing: Military Standard Publication and Distribution Section of General Armament Department, 2012:1-8. (in Chinese)
- [13] 张新国.国防装备系统工程中的成熟度理论应用[M].北京:国防工业出版社,2013:141-146.  
ZHANG Xinguo. Theory and application of maturity model in defense materiel system engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 141-146.(in Chinese)
- [14] Department of Defense. Technology Readiness Assessment (TRA) desk book [R].Washington D.C.: Assistant Secretary of Defense for Research and Engineering(ASD(R&E)): 2009.
- [15] 刘艳琼,陈英武,范晓樯.基于技术分解结构的装备研制项目技术风险评估法及其应用[J].科技政策与管理,2006,27(1):13-17.  
LIU Yanqiong, CHEN Yingwu, FAN Xiaoliang. Technology risk evaluation method of weapon development system based on technology breakdown structure [J]. Science-Technology and Management, 2006,27(1):13-17.(in Chinese)

(编辑:栗枢)