

航空发动机技术成熟度评价应用实践分析

Analyse of Technology Readiness Assessment Application in the Development of Aero Engine

■ 宁怀松 郑宁 宋柳丽 刘海年 / 中国航发沈阳发动机研究所

作为一种系统性、结构化和量化的工具，技术成熟度评价通常用于评价某项特定技术的成熟程度，进而对决策和技术风险管理等工作提供支持，并通过制订技术成熟度提升计划指导后续的工作，在航空发动机研发中具有重要保障作用。

在航空发动机的研发中，技术成熟度评价工作得到了普遍应用，但与此同时，也在实践中暴露出了若干问题和不足，导致费时费力且未收到明显的收益。基于航空发动机技术成熟度评价工作实践，本文总结了存在的3个主要问题，通过分析得出5方面原因，结合发动机研发实际，提出了4项应对建议，可供发动机技术成熟度评价工作参考，以期提升该项工作的效能。

存在的主要问题

关键技术不关键

关键技术是技术成熟度评价的对象，按照国军标（GJB）7689—2012《装备技术成熟度评价程序》，确定关键技术至关重要。当前存在关键技术确定不准确，将不符合要求的技术选为关键技术的情况，导致在后续制定具体化技术成熟度等级条件（简称“具体化等级条件”）时遇到困难，并最终导致评价工作量的增加且无法获得预期的成效。

具体化等级条件不全面、不具体

当前工作中，多是基于GJB 7688—2012《装备技术成熟度等级

分及定义》或GJB/Z 173.5—2014《技术成熟度评价指南 第5部分：航空发动机》等标准中提供的技术成熟度等级条件，制定被评价关键技术的具体化等级条件，存在删减管理类等级条件、直接使用标准中的等级条件和具体化不够的情况，导致评价工作不全面、不易理解和操作。

准备工作不全面、评价结果应用不充分

存在“为了评价而评价”的情况，评价的准备工作不全面。例如，具体化等级条件是临近开展评价时才制定，不但导致周期紧张，而且还存在根据实际研发工作情况制定、“照药出方”的情况，必然会影响评价结果的准确性、客观性。评价后对评价结果的应用也不充分，没有充分根据等级条件的满足情况识别风险、制订应对措施并更新项目的工作计划，换言之，没有充分使用评价结果指导后续工作，自然难以获得收益。

原因分析

对关键技术的理解不准确

按照GJB 7689，关键技术是指在规定的的时间和费用范围内，对装

备研制存在较大风险的装备技术。需要注意的是，在技术成熟度评价工作中，关键技术有其特定要求。以航空发动机为例：关键技术必须有可物化的技术载体，技术载体可以是硬件，也可以是软件，或者软硬件结合，但无论如何，技术载体应在发动机上有体现，是组成发动机产品的一部分；关键技术必须有明确、可量化考核的技术目标，因为技术成熟度是指技术满足预期的装备应用目标的程度（GJB 7688），为了确定“程度”，必须有明确、可量化考核的技术目标，且这些技术目标应来自装备的研发需求，并能支持装备的成功实现。

在实际工作中，存在对上述要求理解不充分的情况，进而将一些技术载体不是发动机组成部分的技术（如气动仿真技术）确定为关键技术，导致关键技术不关键。

对于发动机研发，技术成熟度评价通常是由用户方组织开展的，用户方重点关注的是在规定的费用范围内，按期交付出满足指标要求的发动机，至于发动机是用什么技术设计、仿真、试验和制造的（这些都属于支撑能力或保障能力），并

不是用户方首要关注的。从这方面来看,设计、仿真、试验和制造等技术不宜作为技术成熟度评价中的关键技术。同时,技术成熟度评价中,要考察是否完成了相应技术载体的设计、制造,是否完成了相关仿真、试验等,等级条件中已经包含了对设计、仿真、试验和制造等技术的要求,如成熟度5级的第16条要求(“完成了主要部件的试制或采购”),既然要完成试制,必然要求具备试制的能力,即对制造的能力要求已经体现在等级条件中了。

研发工作不完整

技术成熟度评价相关的等级条件反映了一个完整的研发过程,通过技术、制造和管理等3个类型的若干等级条件,从需求、设计、制造、试验和管理等方面,规定了研发过程的主要活动,如表1所示。这些活动是相互关联、彼此支撑、不能缺失的,这也就意味着需要完整地开展工作,才能满足某一技术成熟度等级所有等级条件的要求。而实际研发中,相关工作往往有缺失,

尤其是管理方面的,进而导致在制定具体化等级条件时,删减了相关的内容,从而导致具体化等级条件不全面,不能有效地反映出对工作的要求,进而影响评价结果。

从表1中序号27的研发活动可以看出,成熟度5级是从管理角度要求“与最终用户的技术代表商议了技术物化后的外形、配合和功能”,技术成熟度等级定义中的原理样品、模型、原型等技术载体状态的差异就体现在外形、配合和功能上,若此时没有完成该等级条件要求的工作,则技术载体的逼真程度将难以评估,如难以准确界定是模型还是原型,必然影响评价结果。

对相关标准中等级条件的理解不到位

相关国军标提供的等级条件类似通用的试卷,必须理解到位,并结合发动机的研发实际,确定其具体含义以及隐含的要求,否则自然无法基于标准中的等级条件制定关键技术的具体化等级条件。由于标准中的等级条件是通用的且较为晦

涩难懂,需要解读人员具有较高的能力水平,对研发过程的各方面均有所了解,或者组成团队共同工作,同时还要有充裕的时间进行研究。而实践中,却通常难以满足上述要求,甚至存在不了解技术成熟度评价工作要求的人员开展具体化等级条件制定的情况,进而影响了具体化等级条件的具体程度。

对等级条件的核心内容的确定不准确

根据GJB 7688中给出的技术成熟度等级定义,可以看出其评价的总体要求是“特定状态的技术载体被设计出来,并按照满足要求的生产方式完成生产,在相应的环境中完成验证,验证结果满足要求”。从GJB 7688中的等级条件也可以看出,评价的重点是技术载体状态、验证环境和验证结果是否满足相应技术成熟度等级的要求。

在制定具体化等级条件时,必须先准确确定各个成熟度等级对上述内容的具体要求。例如,对于发动机的燃烧室:成熟度4级时的技术

表1 GJB 7688等级条件中规定的主要研发活动示例

标准中序号	适用技术类型	条件类型	条件内容	规定的研发活动
2	H、S	技术	了解预期系统的内外部接口要求	接口管理
3	H、S	技术	完成了预期系统的总体指标向下分配和传递	需求管理
...
19	H	制造	初步制造出预期系统的原型	制造
20	H	制造	在实验室里演示了工艺设备	试验
...
27	H	管理	与最终用户的技术代表商议了技术物化后的外形、配合和功能	需求分析
28	H、S	管理	在系统工程管理计划初稿中考虑了集成方面的内容	装配
...

载体状态和原理样品具体以什么形式呈现, 相较最终使用状态, 对其外形、配合和功能方面有什么具体要求, 相关研发人员是否均能理解并认同上述要求; 成熟度5级时的相关环境具体是什么, 能否对应到已有的某个试验设备或试车台; 各个等级具体要完成哪些指标的验证, 验证通过的标准是什么。确定了上述核心内容后, 就可以较为顺利地将技术、制造类的等级条件具体化(管理类的等级条件通常较为清晰, 易于具体化)。

上述核心内容涉及发动机的研发工作安排, 且需要提前明确, 故在实践中往往难以准确确定, 并最终导致具体化等级条件不具体。

技术成熟度评价工作计划制订过晚

类似于考试, 技术成熟度评价是在特定时间节点对关键技术研究情况的评估, 而且是“开卷考试”。但正如考试不只是考试本身, 不能仅站在技术成熟度评价本身看待技术成熟度评价工作, 而是要在项目的研发初期, 就按照流程或用户的要求, 做好技术成熟度评价工作的策划, 明确技术成熟度提升和评价工作的安排, 并按照策划有序开展关键技术的识别、具体化等级条件的制定等工作, 还需明确完成评价后需要开展的工作, 确保对评价结果的有效运用。同时, 还要根据技术成熟度评价的工作策划, 审视研发工作的开展情况, 查漏补缺, 确保相关技术成熟度等级需要完成的工作均已完成, 保证实现预定的技术成熟度提升目标。

实践中, 通常是在即将开展技术成熟度评价时, 才制定技术成熟

度评价工作计划, 而评价工作计划又往往仅关注技术成熟度评价本身。上述情况势必影响准备工作的全面性和评价结果的充分应用。

应对建议

适应发动机的特点

20世纪40年代就出现了涡喷发动机, 而技术成熟度评价则在20世纪70年代才出现, 也即先有的发动机, 再有的技术成熟度评价制度。技术成熟度评价本身是一个工具, 绝对不能僵化应用, 而应适应发动机的特点, 与研发实际相结合, 重点应实现如下目标。

一是对照发动机研制阶段划分情况, 确定技术成熟度各个等级的定义, 并在研发团队内达成一致, 形成团队都认可的“标尺”。这个过程中, 重点是确保在各个等级时, 都有能够冻结、能够明显表征出研发进展的交付物, 并且团队对交付要求的理解是一致的, 而交付要求又是可测量的, 以确保交付物的可验证。一定程度上, 可以不用过于重视某些交付物到底要达成什么目标, 应把精力更多地投入到如何让团队对给出的目标达成一致的理解。例如, 技术验证机到底要达到什么要求、完成什么工作, 不同项目之间可能无法完全统一, 对于具体的项目, 结合本项目的实际给出一个可行的目标(应能支持后续的研发工作), 然后使研发团队充分理解这个目标并达成一致, 这样就形成了标尺, 就能在团队内使用统一的标准, 有效地评价其工作完成情况, 实现技术成熟度评价的目的。

二是在等级定义的基础上, 进一步结合发动机的研发流程, 针对

关键技术的实际情况, 制定具体化的等级条件。例如, 等级条件中规定的试验项目应和研发流程的规定相符, 等级条件中要求完成验证的指标要和需求相对应。

客观、准确地确定关键技术

深刻、准确理解关键技术的要求, 确定关键技术时, 务必关注如下内容。

一是除了成熟度为1级的, 其他关键技术必须有应用目标, 且等级越高, 应用目标越明确、越清晰。关键技术的选择, 需要从确定预期的应用目标和应用场景开始, 否则GJB 7689规定的关键技术评判条件(重大影响、新技术)将难以准确界定。例如, 若应用场景不明确, 则在重用已有技术时, “应用条件和环境”的变化情况将无法准确评估, 可能就会认为已有技术是成熟的, 从而漏选关键技术。

二是注意关键技术一定要有技术载体, 技术载体是关键技术的验证平台, 关键技术达到预定的要求后, 将以技术载体的形式体现在装备中。

三是要注意关键技术和产品的互锁, 也即关键技术的研究一定要由产品研发工作触发, 并最终能够应用到产品中(对于同步开展多个备份技术研究的, 理论上每个技术成功后也应能够应用到产品中)。如图1所示, 根据产品规划, 确定需要开展研究的技术工作, 然后在其中选择关键技术, 完成预定的攻关后, 迁移到产品中。

除上述内容外, 还应克服一个主观倾向, 即通过关键技术的数量显示工作的重要性、紧迫性或工作量的大小。

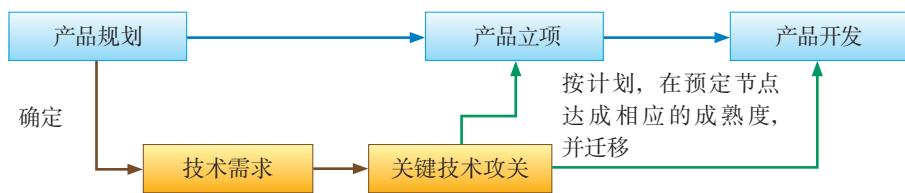


图1 关键技术和产品研发的关系

提前量身定制具体化等级条件

应按照研发流程的要求，随着关键技术的识别，及时确定其具体化等级条件，做到“识别一项关键技术就制定一套具体化等级条件”，同时确保等级条件可操作、可执行、无歧义，在研发团队内部达成一致。这样提前制定好的具体化等级条件既能牵引研发工作的有序开展，也能避免“临考出卷”“照药出方”。

全面实施系统工程

按照GJB 8113—2013《武器装

备研制系统工程通用要求》，技术成熟度评价是技术管理过程“研制成效评估”的组成部分（见图2），这也就意味着技术成熟度评价工作的有效开展需要全面实施系统工程。

从表1即可以看出，相关的活动均包含在系统工程的技术过程与技术管理过程中：实施了系统工程的技术过程，才能更加准确、全面地确定需求、技术指标，确定验证方式、验证环境要求等，从而才能

准确确定具体化等级条件；实施了系统工程的技术管理过程，才能做好需求管理、风险管理、技术状态管理和接口管理等工作，满足等级条件的要求。同时，通过研制策划，也能制定技术成熟度评价工作策划，并通过决策分析、技术风险管理等，充分发挥评价结果的作用。

结束语

当前，技术成熟度评价已经融入到发动机研发流程中，是必须要开展的工作。建议重新审视、正确认识技术成熟度评价的理念和相关要求，在后续开展工作时，全面实施系统工程，规避前期出现过的问题，依据发动机的研发安排做好技术成熟度评价工作策划，根据项目实际情况选准关键技术，结合发动机研发实际做细具体化等级条件，确保技术成熟度评价作用的切实发挥。

航空动力

（宁怀松，中国航发沈阳发动机研究所，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] 陶家渠. 系统工程原理与实践[M]. 北京:中国宇航出版社,2013.
- [2] 李跃生,刘国宁,胡云,等.技术成熟度评价方法及其在交会对接任务中的应用[J].载人航天,2013,19(6):51-57.
- [3] 陈方晓,晏成立,余泳.对技术成熟度评价应用于装备预研的若干问题分析[J].国防科技,2014,35(3):40-45.
- [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.

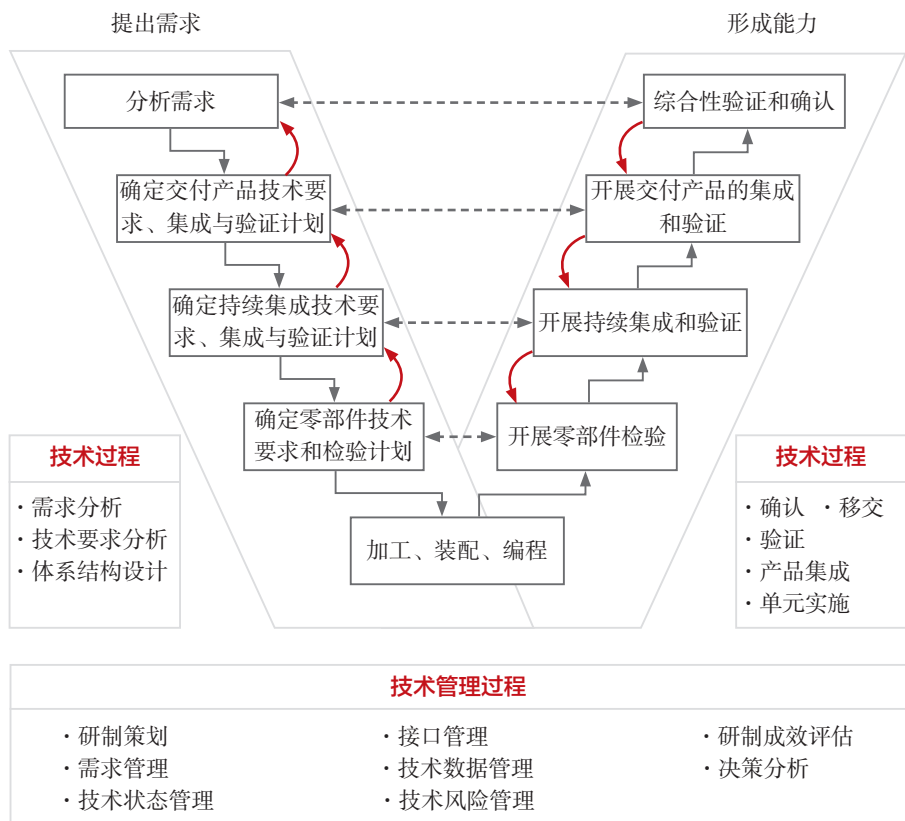


图2 GJB 8113中规定的技术过程和技术管理过程