

技术成熟度评价方法应用现状及发展

周涛¹, 于兰萍², 张勇³

(1. 西北工业大学自动化学院, 西安 710072; 2. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100039;
3. 中国航天科工集团公司, 北京 100048)

摘要: 为了推广技术成熟度评价方法和应用, 文中介绍了技术成熟度相关概念以及制造成熟度、技术成熟困难度、航天产品成熟度, 技术成熟度评价在国内外的应用情况, 特别是在重大项目转阶段评审、审计署评价、企业科研管理等的的应用, 以基础科研重大项目立项技术成熟度评价工作为案例, 剖析了项目技术成熟度评价的典型流程, 对于进一步在我国推广技术成熟度评价方法的应用具有参考价值。

关键词: 技术成熟度; 技术成熟度评价; 科研管理; 风险控制

Present Situations and Developments for Methods and Applications of the Technology Maturity Assessment

Zhou Tao¹, Yu Lanping², Zhang Yong³

(1. College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, China;
3. China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to popularize methods and applications of the technology maturity assessment, this paper introduces relevant concepts of the technology maturity as well as the manufacture maturity, technology maturity difficulty, and technology maturity of aerospace product, presents applications of the technology maturity assessment in both domestic and abroad, especially describes applications in the key project phase-transition reviews, auditing commission evaluations and enterprise scientific research managements. Besides, this paper takes the technology maturity assessment of the key project approval of fundamental scientific research as example, and analyzes the typical processing for project technology maturity assessments, which provides practical reference for advanced popularizations and applications of technology maturity assessment in China.

Keywords: technology maturity; technology maturity assessment; scientific research management; risk control

0 引言

成熟度一般指所关注对象的成熟程度。成熟度评价一般包含对相关领域成熟度的定义和如何对成熟度进行评估、改进的方法及程序等内容。从国外已有的成熟度评价来看, 目前应用较为广泛的有技术成熟度。在技术成熟度的基础上, 逐步发展出制造成熟度、软件能力成熟度、系统成熟度等概念。其中, 应用最广泛的是技术成熟度。国内从 20 世纪 90 年代末开始逐步重视技术成熟度研究工作, 在理论研究和评价方法上进行了探索研究。针对航天产品研制品种多、状态多等特点, 有航天企业提出了“产品成熟度”, 指的是依据产品的设计、生产、试验和应用情况, 对其质量与可靠性以及可应用程度的衡量。

技术是产品的基础, 是非物质产品, 产品是物质化的技术。产品的水平归根到底是技术水平的体现, 只有先进、成熟的技术, 才能研制生产出先进、可靠的产品。因此, 技术创新在航天企业核心能力建设中始终具有重要地位。而技术成熟度作为衡量技术能力的一个要素, 用来表示型号中关键技术成熟的程度。正确运用技术成熟度评价方法, 有利于推动技术水平的提高, 有利于规范产品的设计与制造, 有利于在研制生产环

节中识别与控制风险。本文将重点对技术成熟度评价方法的研究进展及其在国内外应用情况进行介绍。

1 技术成熟度评价方法及其发展

1.1 技术成熟度概述

技术成熟度, 其概念源于 20 世纪 70 年代由美国航空航天局 (NASA), 20 世纪 90 年代趋于成熟, 是指技术相对于某个具体系统或项目而言所处的发展状态, 反映了技术对于项目预期目标的满足程度。技术成熟度评价, 是确定装备研制关键技术, 并对其成熟程度进行量化评价的一套系统化标准、方法和工具。

2003 年, 美国国防部颁布了《国防部技术成熟度评价指南》, 主要针对应用新技术研制的新产品, 强调从技术开发到产品转化过程中的新技术应用的完备性及其验证的充分性两个方面, 并以技术成熟度等级 (technology readiness levels, TRL) 加以度量。此后经过 3 次修订, 目前最新版本为 2011 年发布, TRL 定义如表 1 所示。当前, 技术成熟度评价已经成为美国国防部采办的强制性程序。此外, 技术成熟度评价还被其他机构广泛应用: 2003 年开始, 美国审计署将技术成熟度评价作为重要的审计工具; 2006 年, 美国桑迪亚国家实验室采用技术成熟度; 2008 年, 美国能源部发布了《技术成熟度评价和技术成熟计划过程指南》; 2008 年, 欧空局针对宇航项目发布了空间应用技术成熟度评价手册。2013 年 10 月 10 日, 国际标准化组织 (ISO) 制定了飞机和空间飞行器系统

收稿日期: 2015-01-21; 修回日期: 2015-03-21。

基金项目: 国防基础科研项目 (A0420132503)。

作者简介: 周涛 (1971-), 男, 陕西商州人, 博士研究生, 研究员, 主要从事系统工程应用方向的研究。

硬件技术成熟度等级的国际标准 (ISO16290; 2013)。

表 1 美国国防部技术成熟度等级定义

TRL	描述
1	观察发现并报道该项技术的基本原理
2	阐述技术概念和/或应用设想
3	通过分析和试验的手段对关键性技术进行功能性验证和/或概念验证
4	实验室环境下的部件和/或试验模型验证
5	模拟环境下的部件和/或试验模型验证
6	与实际应用相关环境下的系统/子系统模型和/或原型机验证
7	实际使用环境下的原型机验证
8	实际系统完成并通过技术试验和验证
9	通过成功完成任务, 实际系统得到验证

1.2 技术成熟度的发展

除了技术成熟度之外, 国内外一些重要机构在技术成熟度的基础上, 还拓展了制造成熟度、集成成熟度和系统成熟度、技术成熟困难度、航天工程产品成熟度等概念。

制造成熟度等级 (MRL) 是美国国防部在采办管理中引入的基于技术成熟度的制造风险管理工具, 它是在技术成熟度基础上发展起来的, 是针对以制造为关键技术的技术成熟度评价方法扩展。制造成熟度被用来衡量武器装备研制过程中的关键制造技术的成熟程度, 以及技术转化过程中的制造风险, 实现对装备研制生产过程的优化管理与控制, 降低制造风险、提升装备制造能力、缩短生产周期、有效控制成本。美国国防部在 2010 年发布了最新版的《国防部制造成熟度评价指南》, 将 MRL 划分为 10 个级别, 其中 1 级最低, 10 级最高。MRL 的 10 个级别与 TRL 的 9 个级别相对应, 其中 MRL 10 级重点关注精益化生产和系统持续改进, 见表 2。

表 2 美国国防部对 MRL 的定义

MRL	等级定义
1	识别出制造的基本内涵 (制造内涵清晰)
2	识别出制造的概念 (制造概念明确)
3	制造概念的可行性得到验证
4	具备在实验室环境下制造技术的能力
5	具备在相关生产环境下制造部件原型的能力
6	具备在典型生产环境下制造系统或分系统原型的能力
7	具备在典型生产环境下制造系统、分系统或部件的能力
8	试生产线能力得到验证, 准备开始小批量生产
9	小批量生产能力得到验证, 开始大批量生产的能力到位
10	大批量生产得到验证, 转向精益化生产

NASA 定义了 9 级技术成熟困难度等级, 系统地评价了推进某项技术所需要的努力与困难度等级之间的关系 (表 3)。

针对航天产品研制品种多、状态多、研制队伍相对分散、老产品质量问题多、产品创新能力相对不足等问题, 中国航天企业提出了产品成熟度概念, 开始在产品成熟度技术上进行初步探索, 主要是为适应航天器由单件研制向小批量生产转型这一新的发展趋势, 中国航天科技集团自 2010 年推行宇航单机产品成熟度定级工作, 在一些重大专项中开展了部分关键通用单机产品的成熟度评价, 对重大专项转阶段产品降低任务风险提供了较好的参考意见。

表 3 技术成熟困难度等级描述

技术成熟困难度等级	描述
1	0%发展风险——不需要或者仅需要微小的更改。单一的发展方法足够
2	10%发展风险——需要大量的修改, 单一的发展方法足够
3	20%发展风险——在完备的经验的基础上需要新的发展。单一的发展方法足够
4	30%发展风险——需要新的发展, 但与存在的经验类似, 通过比较, 这些经验足够用以参照。单一的发展方法有很高的可能性成功
5	40%发展风险——需要新的发展, 但与存在的经验类似, 通过比较, 这些经验在所有关键领域足够用以参照。为了达到高的成功可能性, 需要采用两种发展方法
6	50%发展风险——需要新的发展, 但与存在的经验类似, 通过比较, 这些经验在一部分关键领域足够用以参照。为了达到中等的成功可能性, 需要采用两种发展方法 (所期望的系统的表现有很大的可能会在后来的块升级中实现)
7	70%发展风险——需要新的发展, 但与存在的经验类似, 通过比较, 这些经验在一部分关键领域足够用以参照。必须采取多种发展途径
8	80%发展风险——需要新的发展, 在广义上与存在的经验基础类似。必须采取多种发展途径
9	90%发展风险——在任何存在的经验基础之外需要新的发展, 不存在任何可信的方法, 在定义可行的方法之前需要在关键领域进行基础研究

2 技术成熟度评价在国外的应用情况

2.1 应用技术成熟度对重大项目转阶段审查

NASA 非常重视在重大航天项目中开展 TRL 评价。在工程的初步设计评审阶段, NASA 就开始对关键技术进行 TRL 评价, 并将评价结果与最佳实践的成熟度等级进行对比, 从而减少工程的技术风险。2005 年, 美国国会立法要求 NASA 进入重大系统开发合同的技术应达到 TRL6 级。

美国国防部强调只有成熟的技术才能应用于正式采办中, 美军各军兵种目前已普遍将 TRL 应用于具体采办工作中。依据国防部采办文件 DoD I5000.02 指示、2011 版《国防部技术成熟度评价指南》和 2013 版《国防采办指南》, TRL 评价要求进一步被规范: 里程碑 A (进入技术开发阶段) 之前达到 TRL4 级 (建议性要求); 里程碑 B (进入工程与制造开发阶段) 之前达到 TRL6 级 (建议性要求, 此前为强制性要求); 里程碑 C (进入生产与部署阶段) 之前达到 TRL7 级 (强制性要求)。

2.2 应用技术成熟度对国防项目进行评价

美国审计署 (GAO) 每年向国会报告重大国防项目的进展情况, 技术成熟度是评价国防项目的三个准则之一。自 2003 年开始, GAO 将技术成熟度评价作为重要的审计工具。

通过技术成熟度的审查, 发现那些技术成熟方面存在严重问题的项目, 然后采取相应的措施。典型的例子是联合打击战斗机 (JSF) 项目, 该项目于 1996 年开始启动并进入方案探索与关键技术开发阶段, 原计划 2001 年转入工程研制与制造阶

段。GAO在2000年通过TRL分析,提出八大关键技术达不到可以接受的TRL7,建议推迟项目转入工程研制与制造阶段的时间,据此建议调整JSF采办计划。不过,美国国防部并没有采纳该建议,导致后来的进展并不顺利。还有,2010年美国审计署通过对包括技术成熟度在内的3个方面的审计,对9个国家国防重大工程项目建议取消或者改变拨款方式。

2.3 应用技术成熟度对企业自身进行评价

波音公司非常重视对新技术成熟度的评价,并将技术成熟度水平作为企业技术发展、应用的重要标准。波音认为只有技术的成熟度达到TRL6及以上才能被应用于产品中。对于公司的飞机产品来说,一项重要的技术从诞生到达到TRL6大约需要10年的时间,从TRL6到应用该技术的飞机进入市场大约需要3~6年的时间^[2]。2003年,波音公司已对高超声速技术进行成熟度评价,对其关键技术进行分解后再次进行技术成熟度评价,提出了发现的问题与发展建议。并以此为依据,制定了2004~2009年高超声速技术发展计划,并根据评价结果调整经费预算以及制定技术发展路线^[3]。

雷锡恩公司2005年开展了“技术与制造成熟度评估”(T&MRA)计划,很好地支撑了军方客户主导的TRL评估工作,并降低了设计风险。

3 技术成熟度评价在国内的应用情况

我国国防科研管理部门对技术成熟度评价十分关注,从上世纪末开始,国内开始逐步重视技术成熟度研究工作,开展了多项技术成熟度评估方法的软课题研究。2012年2月,总装备部发布实施《装备预先研究技术成熟度评价暂行办法》,以完善装备预研评价机制、提高预研管理水平、促进装备预研与型号研制有机衔接、控制装备发展技术风险为目标,要求国防科研型号装备管理部门或委托的第三方机构对装备预先研究项目开展技术成熟度评价。此外,我国军用技术成熟度评价标准《装备技术成熟度等级划分及定义》(GJB7688-2012)也已经颁布,成为重大科研项目和型号研制的重要标准。

除了在装备预先研究成果评价等领域应用,我国国防工业企业陆续开展了技术成熟度评价试点工作,为进一步提升企业科研管理科学性和精细化提供了新的思路。神舟飞船项目组在总结10多年的管理经验的基础上开发了项目成熟度评估模型,对神舟飞船项目的运行进行管理;航空和核电领域也在研究将技术成熟度评价应用于项目管理中^[4]。中国空空导弹研究院针对承担的项目数量不断增加、多项目管理越来越复杂、型号研制风险不断增大的现状,提出结合空空导弹的研制管理情况,将技术成熟度评价方法应用到立项论证、转阶段评审、外协评审(招投标)以及科研成果评价等一系列项目管理环节中^[5]。

我国航天工业工程的管理工作引入技术成熟度模型的探索起步相对较早。航天工程管理范畴内容丰富,包括技术、进度、经费、人员等。其中,以技术管理为核心,以技术风险管理为主线,以技术评价为手段。航天工程技术成熟度管理思路是:通过将技术关键程度评价、技术成熟度评价、技术困难度评价、技术风险度评价等融入到现行航天工程研制管理中,加强航天工程的科研规划计划管理、技术状态管理、技术风险管理、经费与保障条件管理,达到及早准确辨识关键技术、准确评价技术成熟状态、正确认识技术成熟差距和成熟困难程度、科学规划技术发展路线、合理保障资源、科学辨识和应对技术

风险的目的。航天工程成熟度还处于起步阶段,需要进一步研究和实践^[6]。

4 典型应用案例

2010年,国防科工局在基础科研“十二五”重大项目立项论证过程中应用了技术成熟评价方法,用于辅助决策对项目立项的评价^[10]。

4.1 评价机构及职责

1) 评价决策机构,为技术成熟度评价的决策部门,负责明确和批准总体思路、技术方案、研制进度等。本次评价的决策机构为国防科工局。

2) 归口业务管理部门,负责本部门相关项目评价的组织工作,并对评价结果进行审定。本评价的业务管理部门为各军工集团公司。

3) 评价执行机构,受评价决策机构委托开展评价工作等。

4) 项目申报单位,确定申报项目负责人,明确评价负责人,为评价工作提供各种保障。

5) 项目负责人或评价工作负责人,按照相关程序开展评价相关工作,组建专家组。

6) 专家组,由相关领域技术、管理专家组成,负责对申报项目进行评价。

4.2 评价对象

国防科工局主管的基础科研“十二五”重大项目立项建议书。

4.3 评价标准

本次评价参照美国国防部等通用的9级评价标准,其中1级为最低等级,9级为最高等级。本次评价重点关注了4至7级的技术和项目。其中4级定义为实验室环境下的基础部件/原理样机验证;5级定义为相关环境下部件/原理样机验证;6级定义为相关环境下系统/子系统模型或样机验证。参照相关标准,本次评价给出了不同技术成熟度等级的判定细则。不同等级判定细则的条目也不尽相同。如技术成熟度5级规定“了解系统机构要求”“建立系统软件构架”“预生产硬件可用”“建立改进生产能力目标”等29项细则。

4.4 评价流程

第一步:国防科工局下达评价任务,明确评价总体要求。

第二步:项目建议单位明确项目负责人和评价工作负责人。评价工作负责人或项目负责人制定评价计划,确定评价专家。

第三步:项目负责人完成项目技术结构分解,并识别关键技术。

第四步:评价工作负责人和项目负责人组织专家组按照评价细则对关键技术成熟度等级进行评价,形成评价报告。

第五步:各军工集团公司对评价报告进行审定,形成相关意见。

第六步:国防科工局或其委托相关机构对评价报告进行审核,审核通过后方可进入项目立项论证程序。

4.5 评价结果应用

所有拟申报为重大项目的项目建议书均应开展项目技术成熟度评价,对于未评价或评价未通过审核的项目不得参与项目立项论证。项目技术成熟度评价等级不符合科研计划定位的项目不得立项。截至目前,通过立项技术成熟度评价并获得立项

的项目进展良好，基本取得了预期目标。

5 结束语

技术成熟度评价近年来广泛应用于各国航天及国防科技工业领域，除了军方国防部门外，国内外很多国防科研机构、国防企业都探索将技术成熟度评价方法应用于型号项目的研制管理，包括运用技术成熟度管理工具制定企业技术战略与科技发展规划、制定企业优先技术需求与发展路线图、制定企业科研工作计划、开展技术监控与评价等。实施技术成熟度评价，对于加强产品研制的风险管理，加快产品研制的进度，有效管理企业的研发活动，进而提升企业的竞争力具有重要意义。

当前，技术成熟度评价受到国内总装备部、国防科工局、航天、航空等部门重视，并开始应用试点。但无论是评价方法还是应用都还处于初期阶段。为加快技术成熟度评价方法的推广，在国家层面，建议加强统一策划，建立长效机制，将技术成熟度评价纳入装备研制管理工作；同时，完善评价基础，推行第三方独立评价体系，培养熟练掌握技术成熟度评价方法的人才队伍，保证技术成熟度评价工作的科学性、公正性。在军工企业层面，建议研究借鉴国外企业相关经验，将技术成熟度评价这种精细化的管理思想与系统工程思想相结合，构建基于技术成熟度的科研管理模式，进一步推动科研管理创新与技术

(上接第 1608 页)

2) 在同一油温状态下，分别记录发动机转速 0~200 r/min 和 0~800 r/min 两种变化历程中综合传动装置输入轴扭矩值。

3) 完成 2) 的测试工作后通过驱动电机持续工作使传动油温持续上升，测试其他油温状态下综合传动装置输入端扭矩值随转速变化情况。

4.2.2 试验结果

分别进行了传动油温 17℃、30℃、50℃、100℃ 四种状态下的综合传动装置起动扭矩测试，试验结果如表 1 所示。

从试验结果看，传动油温的变化是影响传动系统起动扭矩的重要因素。在两种试验工况下，传动系统起动扭矩的瞬态峰值和稳态均值随温度变化呈非线性变化趋势，且油温越低起动扭矩越大。就发动机自行起动工况而言，油温 17℃ 时的起动扭矩为 750 N·m，油温 100℃ 时的起动扭矩为 300 N·m，前者是后者的 2.5 倍。

表 1 传动系统起动扭矩试验结果

试验条件		电机提速工况	发动机自行起动工况
17℃	瞬态峰值/(N·m)	300	750
	稳态均值/(N·m)	260	380
30℃	瞬态峰值/(N·m)	270	520
	稳态均值/(N·m)	220	320
50℃	瞬态峰值/(N·m)	170	380
	稳态均值/(N·m)	140	220
100℃	瞬态峰值/(N·m)	160	300
	稳态均值/(N·m)	130	160

此外，在传动油温 100℃ 时，传动系统起动扭矩的稳态均值为 160 N·m，而不考虑液力变矩器输出功率时其他部件的起动扭矩测试结果为 166.64 N·m，考虑到测量误差，两次试验结果基本一致。这表明，液力变矩器的空转功率消耗不是发

创新。

参考文献:

[1] 袁家军. 航天产品成熟度研究 [J]. 航天器工程, 2011 (1): 1-7.

[2] Wilsey C, Stoker R. Continuous Lower Energy, Emissions and Noise (CLEEN) Technologies Development—Boeing Program Overview [Z]. Boeing, 2010-10-27, 3.

[3] 李达等. 技术成熟度评价方法综述 [J]. 科学决策, 2012 (11): 85-94.

[4] 欧立雄, 袁家军, 王卫东. 神舟项目管理成熟度模型 [J]. 管理工程学报, 2005, 19 (5): 129-134.

[5] 段磊. 技术成熟度评估在空空导弹科研管理中的作用 [J]. 航空兵器, 2012 (4): 54-57

[6] 马宽. 航天工程实施技术成熟度管理探索 [J]. 中国航天, 2012 (10): 29-33.

[7] 邢晨光. 基于技术成熟度的企业科研管理模式研究 [J]. 航空科学技术, 2013 (3): 61-64.

[8] Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance [Z]. Department of defense, 2011, 2-13.

[9] Defense Acquisition Guidebook Production [Z]. 2013

[10] 中国航空工业发展研究中心. 技术成熟度评价方法培训教材 [Z]. 2009.

动机起动过程中的主要影响因素。

5 结论

1) 对于装有液力机械综合传动装置的车辆而言，车辆起动过程中传动系统的功率消耗是影响发动机起动效果的重要因素，在进行车辆总体设计时应予以考虑。

2) 试验结果表明，传动油温的变化和各类油泵的功率消耗是决定传动系统起动扭矩大小的关键因素，可以通过增加传动油加温装置和油泵液压阀等措施减小传动系统的起动扭矩。

3) 稳态试验和动态试验相结合的方法，有效解决了基于台架试验的综合传动装置起动扭矩测量问题，为今后开展车辆起动性能影响因素分析提供了方法支持。

参考文献:

[1] 闫清东, 于涛, 朱丽君, 等. 工程车辆液力机械传动效率控制 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2013, 43 (3): 602-606.

[2] 王忠, 许广举, 叶飞飞, 等. 低温环境下车用起动电机的匹配研究 [J]. 兵工学报, 2010, 31 (5): 529-533.

[3] 徐信峰, 佟长宇, 乔云. 柴油机起动性能主要影响因素分析 [J]. 现代商贸工业, 2014, 26 (12): 192-193.

[4] 卫振彪, 陈明飞, 李强. 改善车辆柴油机冷起动性能的方法研究 [J]. 广西轻工业, 2008, 114 (5): 41-42.

[5] 王巍. 基于 ME7 系统的汽油机冷起动性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.

[6] 刘瑞林, 靳尚杰, 孙武全, 等. 提高柴油机低温起动性能的冷起动辅助措施 [J]. 汽车技术, 2007, 37 (6): 5-8.

[7] 郭刘洋, 杜明刚. 液粘离合器摩擦特性及热负荷特性研究 [J]. 摩擦学学报, 2011, 31 (4): 323-327.

[8] 王红岩, 芮强, 高连华, 等. 军用履带车辆传动装置 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

[9] 谷曼. 汽车变速器试验台加载技术的研究 [J]. 机械设计与制造, 2009, 46 (11): 162-164.

[10] 何耀华. 汽车试验技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.