

复杂系统体系的技术成熟度评价模型研究

Research on Technology Readiness Assessment Model for Larger System

程文渊 / 中国航空工业发展研究中心

摘要: 从概念和特点等方面对国防装备工程中系统与系统体系, 以及系统工程与系统之系统工程 (SoSE) 进行对比分析, 找出异同点, 在深入剖析系统工程中的技术成熟度模型内涵的基础上, 围绕评价模型框架、评价标准和评价流程, 对系统之系统中的技术成熟度评价模型进行探讨, 提出了系统之系统技术成熟度评价的一些建议。

Abstract: This paper compares and analyzes the differences between System and Larger Complex System, and, System of systems (SoS) and System of Systems Engineering (SoSE) in defense materiel development in according to the definition and characteristic. Based on analyzing the Technology Readiness Assessment (TRA) Model of System Engineering, this paper discusses the TRA model of SoS in frame, criteria and process of assessment model. Some suggest about TRA of SoS is given.

关键词: 技术成熟度评价; 系统之系统; 评价模型; 系统之系统工程

Keywords: TRA; SoS; assessment model; SoSE

0 引言

目前, 技术成熟度评价理论模型的主要适用对象是系统, 其基本原理是针对系统制定技术分解结构, 从中识别关键技术元素, 根据评价标准判定各项关键技术元素的技术成熟度等级。与系统的技术成熟度评价相比, 系统之系统 (System of Systems, SoS) 的技术成熟度评价不同之处在于: 首先是评价对象, 相对于单个系统, SoS 复杂性高、综合性强, 系统与系统之间的交联异常复杂, 与单个系统功能性能单一的特点不同。其次是评价标准, 系统研制是一项复杂的系统工程, SoS 中

各项系统的研制是一系列不同步的寿命周期模型, 各个系统之间既有很强的交联性, 又有很大的独立性。如何对 SoS 实施技术成熟度评价是目前摆在各国装备研制与科技管理人员面前亟待解决的问题。

1 复杂系统与系统工程

1.1 系统与复杂系统

国防装备系统工程的研究对象已逐渐从单个复杂系统演变为多个复杂系统组成的“系统体系”^[1], 其涉及的形式也呈现多样性特点, 典型的“系统体系”包括: 系统簇 (Family of Systems, FoS)、

SoS、复杂体系统 (Enterprise System, ES)、网络中心系统 (Network Centric System, NCS) 等。本文中主要以 SoS 为对象进行探讨。系统是由若干个有机联系、相互作用的要素组成, 是具有特定功能、结构和环境的整体。SoS 是指相关或连接起来提

供一种综合能力的一组相互依赖的系统。这种系统任何一个部分的失效都会导致整体能力或效能的显著降级。FoS 是指通过不同的途径以达到相似或互补的效果而提供相似能力的一组系统。例如, 战斗机需要跟踪移动目标的能力, 而提供这种能力的 FoS 可能会包括: 一种带有特定传感器的无人或有人航空飞行器、一个太空的传感器平台或一种特殊的作战能力。其中, 每一种都能提供跟踪移动目标的能力, 但其持续的特征、精度等都不同。

1.2 系统工程

国防装备系统工程 (System Engineering, SE) 活动是运用技术状态管理、技术接口管理、技术数据管理、技术风险管理和技术评估管理等手段, 对系统工程的技术过程、活动及要素进行管理和控制, 确保系统工程目标实现的过程, 主要由生命周期阶段划分、系统工程流程和目标导向的知识集合三部分组成, 如图 1 所示。

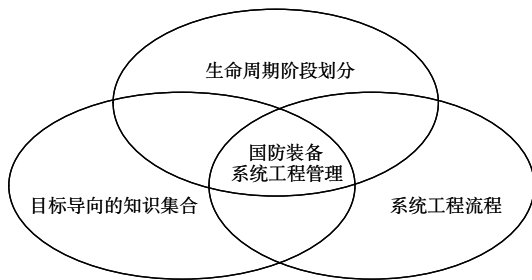


图1 国防装备系统工程管理框架

1) 生命周期阶段划分

生命周期是指装备从立项论证开始直到退役处理,不同类型的装备生命周期阶段因性质、功能、复杂程度的不同而有所不同,但一般装备的生命周期大致可分为立项论证、方案、工程研制、生产部署、使用保障和退役处理等阶段。在装备不同的生命周期阶段中,依次有系统方案、功能基线、分配基线和产品基线等循序渐进地描述装备系统与技术状态,使系统研制工作有序进行。系统方案是依据用户需求产生对系统的要求,进而形成系统的方案说明。功能基线是依据系统方案说明形成以系统性能要求表示的系统说明。通常把系统性能说明的技术状态文件定为功能基线。分配基线是依据系统性能说明形成分系统和部件这一级产品的一组性能说明。分配基线是详细设计的依据。通常把分系统和部件的性能说明的技术状态文件称为分配基线。产品基线是依据分系统和部件的性能说明形成对生产这些产品重要的一组相应的产品特征详细说明。产品基线是制造的依据和制成的状态。通常把产品特征详细说明的技术状态文件称为产品基线。

生命周期划分是由系统方案的描述导出系统定义,系统定义导出部件定义,部件定义导出部件设计,最终导出产品。生命周期阶段划分的目标是通过建立基线控制全生命周期过程,通过规定生命周期过程中若干关键事件评估审查工作。

2) 系统工程流程

系统工程流程是通过一系列活动将作战需求或要求转化为系统设计方案的过程。其基本活动是需求分析、功能分析和功能分配、设计综合与验证。这些活动都要通过系统分析和控制加

以平衡,实现性能、费用、进度的综合平衡。图2是典型的系统工程流程。

3) 目标导向的知识集合

传统的设计和研制主要采取单一专业学科知识独自进行分析。它可以使装备获得一定的性能,但无法做到整体优化,不能获得最优的作战效能。系统工程出现后,把彼此并不相关的众多学科,相互不完全理解的各行专家以及多个目标各异的研究、设计和制造单位聚集到一起,并行综合解决系统的研制、生产、验证、部署、训练、使用、保障和退役处理中的有关问题,制定出全寿命周期综合的设计方案。这种知识集合可以减少系统设计过程中反复循环的次数,减少重新设计和返工。以美国政府问责办公室(GAO)的最佳实践为例,介绍装备系统工程中的知识点管理方法。

a. 与需求相匹配的技术知识。技术开发的最终目标是将一项技术成功应用到装备上,即它可以被集成到一种新产品中并且能够依靠它满足需求。伴随着一项技术的开发,从概念发展到可行性论证,再到生产出部件,最后安装到产品中并实现预期功能的这段时间,存在可测量、并可以逐级验证的与需求相匹配的技术知

识,这些都是实现装备系统功能与性能的必要输入。

b. 依据需求开展设计的知识。一流的军工企业在产品研发进行到一半时就可以确定产品的设计能够满足客户需求,并且还能保证产品可以生产制造出来。关键设计评审就是旨在确认设计成熟,并“冻结”技术状态以保证未来尽量少做修改,此时的技术状态不仅包括整个系统及其所有零部件的精确描述,还反映了试验和仿真结构,同时还描述了用来制造每个零部件的材料和工艺。

c. 满足成本、质量和进度目标的知识。军工企业在开始生产之前必须清楚制造工艺是否能够生产出满足成本、质量和进度目标要求的产品。达到这一点不仅意味着产品能够被生产出来,还意味着关键工艺可控。军工企业依靠良好的供应商关系、已知的制造工艺和统计过程控制,尽早获得这些知识。生产前对关键工艺的控制能力是所采用的用来识别和降低风险的最佳实践效果。

1.3 系统之系统工程

系统之系统工程(System of Systems Engineering, SoSE)是指通过规划、分析、组织和综合性工作,将多个协同、自

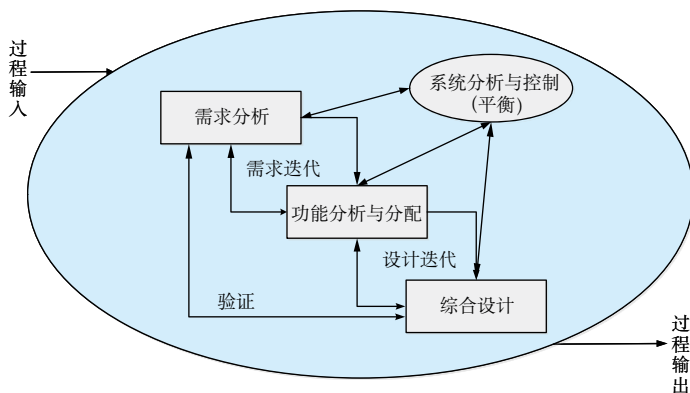


图2 系统工程流程

表1 系统工程与SoSE的对比分析

序号	要素	系统工程	系统之系统工程(SoSE)
1	关注点	单个复杂系统	多重综合复杂系统
2	目的	优化	西蒙满意度
3	边界	静态	动态
4	问题	明确	具有涌现性的
5	结构	分层级的	网络状
6	目标	统一的	多元的
7	方法	流程	方法论
8	时间表	系统生命周期	持续性的多个周期
9	中心	平台	网络
10	工具	很多	很少
11	管理框架	确立的	尚未确立
12	标准	很少	几乎没有

主、互操作的、具有独立功能的系统进行融合而产生新的能力,融合而成的SoS的整体能力要大于所有构成系统能力的总和。这些构成系统可以是现有系统、部分在研系统,甚至是全新的系统。SoSE的主要任务就是通过对系统定义、研发协调、接口管理和控制等方面进行控制,以确保这些自主系统能够在SoS架

构内发挥各自功效。

SoSE具有自主性、归属性、连通性、多样性、涌现性(Emergent properties,通常是指多个要素组成系统后,出现了系统组成前单个要素所不具有的性质,这个性质并不存在于任何单个要素当中,而是系统在低层次构成高层次时才表现出来,所以人们形象地称其为“涌现”)等特点^[2]。与系统工程相比,SoSE在如下几个方面有明显不同(见表1):单个系统的边界条件是固定的,而SoS的边界条件是动态变化的;单个系统工程考虑的是过程和流程,而SoSE则考虑方法论;单个系统是以平台为中心,而SoS是以网络为中心;单个系统只需一次采办过程即可,而SoSE需考虑多个并行的系统工程,并且具有时间和技术成熟度的不同步性。除此之外,SoS的涌现性问题也是重点考虑对象。

与系统工程(SE)相比,SoSE中的V字模型也有所不同,见图3。单个复杂武器装备的系统工程过程中,只有一个系统生命周期和一个大的V字模型,而SoSE中,不仅有多系统生命周期模型,而且,其V字模型也是一个嵌套式的结构,由一组系统的V字模型组成^[3]。

2 技术成熟度模型

2.1 技术成熟度等级模型

装备系统工程最核心的环节是技术。由于具有目标导向性的特征,技术研发的终极目标通常是实现在产品上成功应用。技术通常需要经过原理探索、应用设想、概念提出与验证、设计、集成、试制、试验、生产、使用、保障等一个漫长的过程,才能实现在目标产品上的应用。这也是一个知识形成、学习、积累的过程。在系统

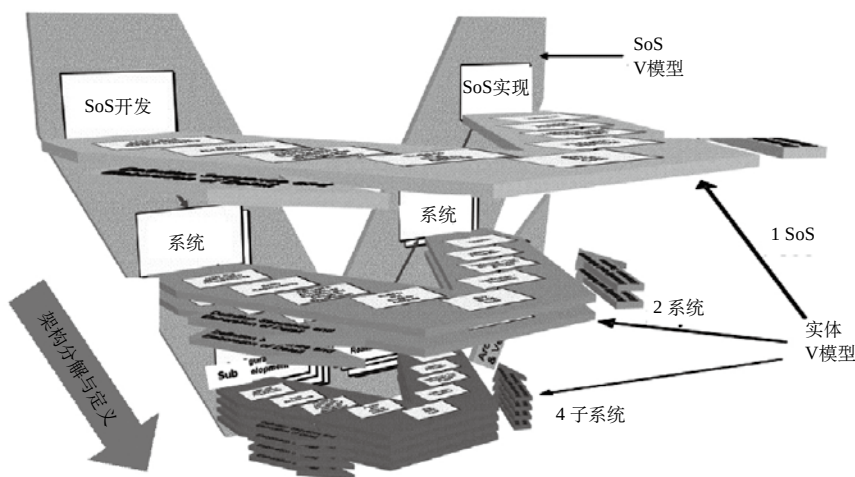


图3 SoSE中的V字模型

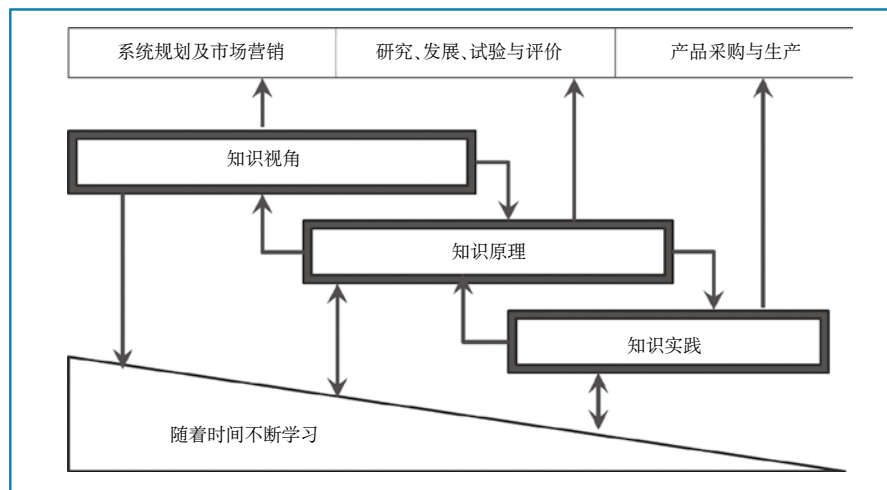


图4 系统工程过程中知识学习的过程

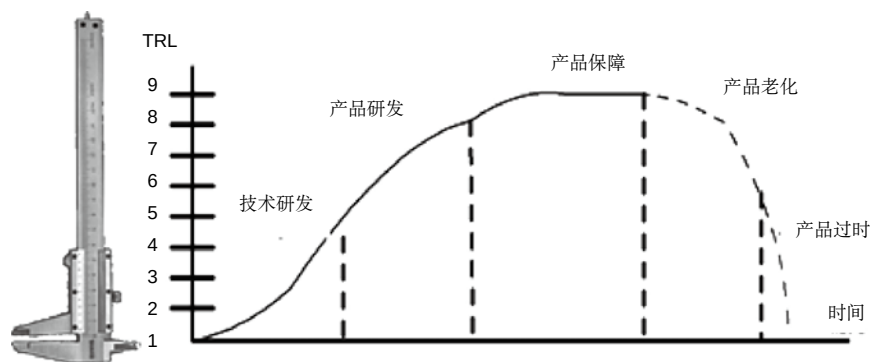


图5 单项产品寿命周期中TRL概念模型原理示意图

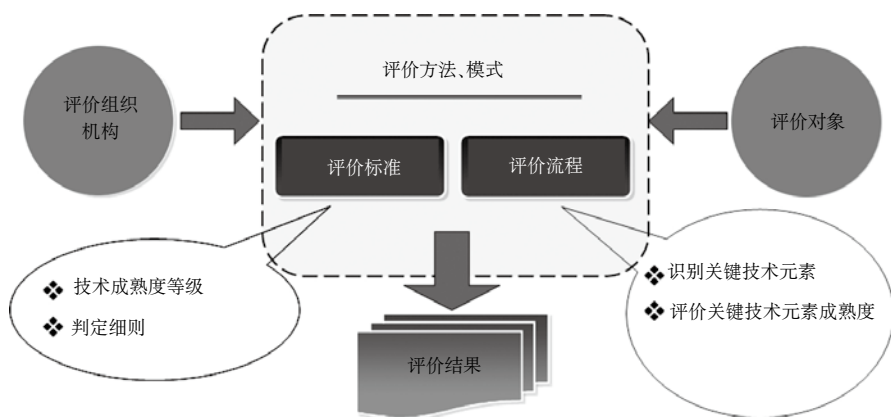


图6 TRA模型原理图

规划和市场营销阶段,需要预知系统研发所需的知识,在研发、试验与评价阶段,需要掌握这些知识,在产品采购或生产阶段,需要对这些知识进行实践。在系统工程之初,学习工作量是最大的,随着产品的交付,工作量逐渐减小。

如何以定性或定量的方式准确界定技术在某一特定时间点的发展状态,如何判定其对于最终目标系统的满足程度,是项目经理/产品研发人员切实需解决的实际问题。

美国宇航局的科学家Sadin率先以技术成熟度等级(Technology Readiness Level, TRL)模型为例提供了一个量化定性评价技术状态的模型,将技术从其萌芽状态开始一直到满足某项特定产品需求整个过程,划分为9个过程点。每

个过程点均以定性语言描述技术的当前状态,形成技术成熟度等级模型(如图5所示)。

技术成熟度模型的核心是“信息显性化、知识结构化、过程流程化、评价定量化”,是对技术/产品开发所需知识的掌握程度的量化定性评价。

2.2 技术成熟度评价模型

从科技评价普适性原理的角度看, TRA模型包括:评价组织机构、评价对象、评价标准、评价方法和评价结果等5个方面的要素。图6给出了TRA原理示意图。

2.3 系统工程与技术成熟度

系统工程过程中要面临科学研究、技术开发、系统集成、制造/生产、使用保障等诸多内容,也需要一系列的成熟度模型来实现技术的量化管理,技术成

熟度模型只是系统工程过程中的一个方面;反过来,在技术成熟度模型中,技术的发展(TRL1~TRL9)过程也蕴含着一个系统工程过程,包含一个对用户需求进行分解和定义的“向下”过程,以及一个对形成的概念方案的综合与验证的“向上”过程(如图7所示)。因此,系统工程与技术成熟度是密不可分,相辅相成的^[4]。

3 系统之系统技术成熟度评价模型探讨

TRA方法已经证明为解决单个复杂系统的技术状态标定的有效工具。如前所述,系统与SoS,系统工程与SoSE的差别都非常明显。因此,在针对诸如未来战斗系统这样的SoS实施TRA时,评价模型、评价各环节的实际操作都有很大不同。

3.1 评价模型框架

从评价方法论和管理学的角度看,如果将一个SoS视为一项“巨大的、复杂的”系统,那么评价时机、评价组织、评价流程这几个环节都可借鉴成熟的系统TRA模型。而评价对象从系统变为SoS,其中最值得关注的是SoS的涌现性和复杂程度的大幅提高,而这些也会引起评价标准和评价流程的变化,尤其是评价细则中针对SoS中各个构成系统间的集成问题的考核,以及评价过程中各个构成系统在逻辑关系和评价先后顺序的设置。

3.2 SoS的TRL定义及评价细则

TRL定义和评价细则是SoS的TRA模型的前提和核心,根据国外学者的研究建议和国内前期开展的多个项目评价应用实践,可参考以下做法:

1) 借鉴已广泛应用的系统TRL定义的做法,通过将其中的“系统”改为“SoS”,形成适用于SoS的TRL定义,在

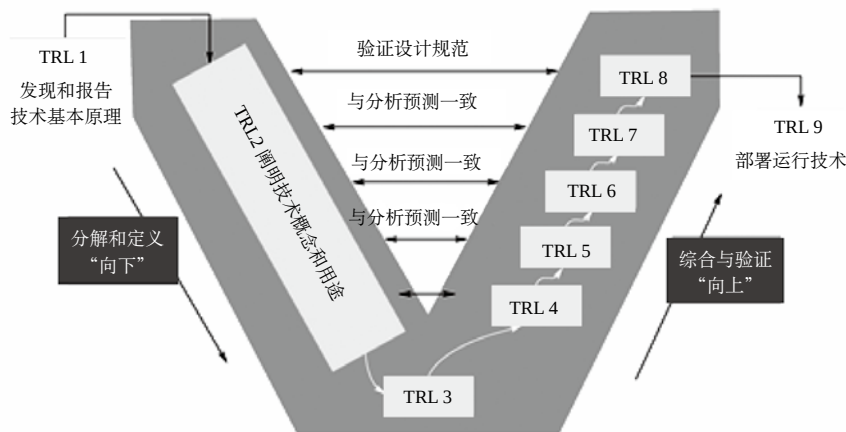


图7 系统工程过程与技术成熟度模型

理论上是可行的,而且也是符合目前技术成熟度专业发展趋势的。

2) 从作战使用(考核关键性能参数,KPP)、系统架构(考核KPP的边界)、功能体系(综合程度)、技术体系(标准、协议)等四个角度出发,从完整性、正确性、通用性、准确性(或预测水平)、一致性、连通性、容量等七个方面构建SoS的TRL评价细则。在国外美国空军实验室提出的评价细则和国内相关研究成果的基础上,对技术载体、验证环境等相关术语进行针对性调整,并补充对SoS中各构成系统间的集成问题考核类细则,基本可形成一套可行的评价细则。

3) 由于建模仿真和试验验证工作很难充分进行,以及系统性能和系统间的关系总是随时变化等原因,在SoS的TRA中,尤其是在试验环境中,相关环境的界定变得异为困难。

3.3 关键技术元素(CTE)的识别与评价

CTE的识别与评价都可参照现有做法,但相对于系统的评价,仍然存在许多不同之处:

1) CTE识别方面,在先后完成SoSE

和独立系统工程前,必须考虑到CTE的不确定性:

a. SoS作战使用/性能需求不易分配到独立的系统及其子系统当中;

b. 各系统之间的某项相互作用不可提前预测,且独立系统在联合在一起时会出现降级;

c. SoS的使用和性能需求分配可能随时间进化。

通常而言,架构体系和工程成果对于识别具有互操作性的CTE而言是非常关键的。

2) CTE评价方面,对于SoS的CTE评价:

a. 当被评系统属SoS一部分时,不仅要包括所有系统中满足CTE筛选原则的技术,还要包括那些不是系统指定CTE的SoS级CTE;

b. 无论那种情况,都要考虑一个系统中的某型能力依赖于另一系统中的某型技术;

c. 在选取SoS的CTE时,要考虑所有已完成和正在进行的系统TRA;

d. 某个部件中的CTE的环境不依赖于SoS中其他任何系统时,应按照系

统的TRA方法进行评价。

4 结论

本文在对比系统与系统体系、系统工程与系统之系统工程(SoSE)之间的异同点的基础上,根据系统的TRA模型,对系统之系统的技术成熟度评价的评价模型框架、评价标准制定、评价流程设计等进行了深入探讨,指出了区别于系统技术成熟度评价的地方,并提出了其中应注意的关键因素和建议,对于从事国防装备科研工作的技术和管理人员未来开展相关评价工作提供指导性意见。

AST

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
- [2] Alex Gorod-agorodis. Modern History of System of Systems Engineering (SoSE) [C]. Stevens Institute of Technology. 2011.
- [3] John O. Clark. System of Systems Engineering and Family of Systems Engineering from a Standards, V-Model, Dual V-Model, and DoD Perspective[C]. INCOSE Hampton Roads Area Chapter, August 26 2009.
- [4] Hernando Jimenez, Dimitri N Mavris. Assessment of Technology Integration using Technology Readiness Levels[C],AIAA-2013-0583.

作者简介

程文渊,博士,副研究员,主要从事技术成熟度评价与管理咨询工作。