

Theory and Application of Maturity Model in Defense Materiel System Engineering

国防装备系统工程中的 成熟度理论与应用

张新国 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

013048665

E237
14

国防装备系统工程中的 成熟度理论与应用

张新国 著



国防工业出版社

· 北京 ·



E237
14

238840810

图书在版编目(CIP)数据

国防装备系统工程中的成熟度理论与应用 / 张新国著.

—北京:国防工业出版社,2013.3

ISBN 978-7-118-08733-8

I. ①国... II. ①张... III. ①武器装备管理-成熟度-研究 IV. ①E237

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 055016 号

※

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印制

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 14 字数 198 千字

2013 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—12000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

张新国同志又一管理理论力作,《国防装备系统工程中的成熟度理论与应用》一书已经出炉,并在付梓出版过程中。我听了这个消息非常高兴,尽管很忙,但仍然毛遂自荐,希望再次为张新国同志新书作序。

因为技术成熟度理论也是我非常关注的问题,并且已成为今天重大系统工程管理必备的管理工具。只不过是过去我们仅仅从国外一些零星资料中了解技术成熟度这个概念,同时也了解了作为系统工程管理工具应用中必须掌握的直接结论,然后就仓促上阵,匆匆忙忙付之应用。坦率地讲,对这样一个较新的系统工程管理工具,一直缺乏一个理论体系层面的系统性理解,有点囫圇吞枣的味道。现在张新国同志的新作弥补了这样一个缺失,无疑是极其难能可贵的。

现代系统工程,尤其是像航空工业这样的复杂系统工程,研制开发的难度随着时间推移,几乎呈几何级数增加,多学科和多门类技术协同、交叉及融合,使得现代高科技系统工程的实现异常复杂。那么在这样一个复杂的系统工程面前,用什么工具,或者以什么样的尺度来衡量和评价系统工程项目成功的可能性,以减少不确定性和风险,确实成为现代系统工程管理中的一个十分棘手的难题。显然在技术成熟度和制造成熟度等体系及理论出现之前,已有的管理工具都无法圆满地完成这一任务。

正如本书所指出的那样,上个世纪 70 年代,美国的 NASA 最早提出技术成熟度的概念,并且在探索中应用起来,后来在应用中又逐步完善形成了制造成熟度、保障成熟度、集成成熟度到系统成熟度。表明了人们逐步认识到,仅仅依靠研发技术成熟度单维度,无法从根本上解决复杂工程的全部问题,实际上还

需要引入制造成熟度、保障成熟度、集成成熟度到系统成熟度,才足以应对复杂工程过程中可能产生的所有评估和评价问题,以减少工程项目的风险,提高成功的把握。这样从单维度考量复杂工程实现成功的可能性,发展到以多维度考量复杂工程实现成功的可能性,在西方国家用了大约二十年的时间。实际上,这是复杂系统工程的管理在进化中逐步完善实现的,而管理进化的本身也揭示了复杂大系统工程的成功管理必须经由多元要素来实现。从此,为了某个复杂系统工程项目的成功,在具体工程项目实施中或许不一定总是要多个维度并驾齐驱,在系统工程过程中人们也许会更关注多维度有机互补,同样也可以获得成功。这样的工程实例颇多,笔者在工程管理中是感同身受的。而对于理解这些问题,本书无疑是提供了系统的理论启示,同时也为乐于应用这样的管理工具者,提供了一个较为完整的方法工具性手册。这样的专著,不但在国防装备的复杂系统工程中,为我们提供了指导性典籍,我相信对于其他行业领域复杂工程系统的开发、建设也具有非常重要的参考价值。

成功的系统工程管理者不外有两种类型,一种是运作型的,他们在实践中不断积累工程管理经验,获得成功之后,他们可以用一本传记,把自己的成功经验和体会记述下来,形成案例,并启示指导后来者。还有一种类型,是导师型的,他们在工程管理实践过程中不断研究学习,在理论和实践的沃土上耕耘,并不断推出经典著作指导自己所从事的行业和影响其他同仁。不论是前者还是后者,实际上一个成功的管理者,首先应是一个成功的教育者。管理的最高境界是思想管理,有了正确的思想,才能有正确的方法论,教育者的角色正是达到这样境界的台阶。在成功的系统工程管理者中,张新国同志属于后者。本书的问世,表明了张新国同志作为一个优秀的系统工程管理者,又为系统工程管理理论发展和实际应用作出了自己的贡献,使自己升华为系统工程管理学家。我衷心祝贺张新国同志实现这样的升华,并衷心祝愿张新国同志,今后不断为丰富管理理论再添砖加瓦,做出新贡献!

林左鸣

中国航空工业集团公司 董事长

二〇一三年三月十八日

国防装备系统既复杂又昂贵,国防装备项目系统工程的实施过程既困难重重又长路漫漫,这就需要在追求先进技术的同时又要控制好经费和时间。为了合理地把握这些矛盾之间的折衷和平衡,常常在追求装备先进性的同时,却不得不为减少项目风险而适度限制采用新的先进技术的比例。为了突破这一长期困扰的悖论,一个新的观念渐渐地成为共识,那就是在大型复杂装备项目中尽量采用先进而成熟的技术。“先进”似乎较容易通过该技术的原理、效应、功能、性能等来理解和描述,可对“成熟”的理解和说明就不那么容易,或者说,常常是比较含糊的,根本问题是缺乏一个客观判断的准则。另一个问题是,技术的“先进”性是由该技术的原理本质所决定的,是一种属性,在项目系统工程中是不变的。也就是说,某项技术一经选择,其先进性就已经明确了,而且不再会发生变化。技术的“成熟度”就不同了,因为成熟度就像其定义一样是一个成长的过程,是在生命周期的进化中不断成长变化的。再之,既然是一个过程,那就会有不同的阶段(系统工程中的不同阶段),而从每个低级阶段到高级阶段的转移也就需要有明确的标志,这样一来,技术“成熟”的过程就需要按照阶段划分而带有“标度”——“成熟的程度”。可见,如果拥有一套技术成熟度评价的客观准则体系,那么,在装备项目中选择先进而成熟的技术的期望就有了参考依据。反过来说,这样的理论和方法体系才能保证我们所选用的技术是先进和成熟的。这样,也就减少了项目管理的风险,而提高了项目成功的概率。

NASA 在多年的研究工作中总结出了一套行之有效的方法,从科学成熟度等级(aSRL)到了技术成熟度等级(TRL),几乎覆盖了探索性科学研究和新技术开发过程的主要阶段,后来被美国国防部(DoD)和工业界稍加修改就适合用于

任何领域技术项目的成熟度等级描述和评价。现在 TRL 方法不仅为全球航宇与防务领域的研究机构和工业组织广泛使用,而且也扩大到了其他多个技术领域,并且成为项目系统工程的开发者和管理者以及用户的公共语言和方法体系。

从整个系统工程的生命周期来看,只有 TRL 是不够的,因为全生命周期包含了设计、建造和运行的全过程,所以,后来在 TRL 方法论的理论和思想的基础上,又发展出了制造成熟度等级(MRL)和持续保障成熟度等级(SML)。这样,就为系统工程全生命周期内的多类技术(广义)成熟度提供了评价的方法。

从装备系统的角度来看,这还不够,因为单项技术最终要综合集成为系统一起工作,也就是说,在单项技术成熟度的基础上,还需要集成成熟度和系统成熟度,这样就进一步发展出了集成成熟度等级(IRL)和系统成熟度等级(SRL),以用于系统技术的评价。

就在 XRL 理论和方法不断的发展和完善的同时,系统工程本身也在持续地演进和变化,装备系统变得越来越复杂,以致于传统系统工程方法论本身也遇到了挑战,例如,系统之系统(SoS)、系统簇(FoS)、复杂体系统(ES)都需要与之相应的复杂系统工程方法论,曾经的“设计论”已经不能应对复杂系统工程的不确定性,转而需要“进化”过程。总之,与其他科学技术领域一样,系统工程领域的知识、技术和方法也在不断地演进和发展,来应对复杂性的挑战。

本书共分 11 章,从国防装备系统工程引出 TRL、MRL、SML 等一系列成熟度理论,并以技术成熟度为重点,从基本概念、评价标准、评价实践、评价工具、评价管理等方面进行深入细致的探讨;还阐述了国防装备系统工程中常用的 MRL、SML、SRL 等模型;最后对国防装备复杂系统工程中的成熟度评价进行了探讨。

第 1 章,描述国防装备系统工程的基本概念和特点。给出了系统、复杂系统以及大规模复杂系统的定义和特点。对系统工程的概念、方法论以及发展展望做了描述,并给出了国防装备系统工程的基本框架和流程。

第 2 章,论述国防装备系统工程中的成熟度理论。阐述了系统工程生命周期模型,涉及到一般通用生命周期模型、典型高技术生命周期模型、DoD、NASA 等分别颁布的生命周期模型比较,然后通过 DoD 采办管理系统的生命周期模型聚焦装备系统工程中的技术和流程管理活动,给出了基于技术/产品生命周

期曲线的技术成熟度模型的基本原理,以及以技术成熟度等级为核心的成熟度模型体系。

第3章,技术成熟度的概述。从概念的起源到实际应用的综述,涉及到了技术成熟度、技术成熟度评价、技术成熟度等级等三个基本概念,还阐述了有关评价的对象和组织机构方面的论述。

第4章,技术成熟度评价的标准。详细描述了TRL的定义解析,包括了硬件TRL和软件TRL以及TRL九级要素的变化。阐述了技术成熟度评价的细则,包括提出的背景、主要构成及其理论依据和相关的术语说明。

第5章,技术成熟度评价的一般流程。本章描述了技术成熟度评价的工作流程,以及如何制定可行的成熟度评价工作计划,特别是详细地描述了识别关键技术元素(CTE)的基本流程、数据及信息的准备,以及有关编写具体化TRL的说明。本章还给出了关键技术元素评价的步骤和流程,以及如何编写TRL评价报告和审核TRL评价报告。

第6章,主要是关于技术成熟度评价的相关实践,或者是实际应用的案例。内容包括JSF项目的最佳实践、UH-60“黑鹰”直升机的案例和某型民用飞机评价的案例。在这些案例中,涉及到了项目概况、识别CTE、TRL评价标准、CTE成熟度的判定、评价的结果以及相关的支撑材料和分析。

第7章,关于技术成熟度评价的管理工具。主要介绍了美国空军研究实验室(AFRL)TRL计算器产生背景、结构功能及其运算法则和对软件的分析。另一个是介绍中航工业技术成熟度评价与管理系统,包括评价管理、工作流程、专家评审、技术信息管理等4个模块的内容。

第8章,关于基于技术成熟度评价的风险管理方法。论述基本原理,给出了技术成熟困难度评价方法,基于集成与可达性的风险识别、技术成熟度计划方法及其细则。

第9章,关于制造成熟度的理论与方法。阐述了其发展的历程、基本概念、评价原理、标准体系和典型的流程。还给出了最佳实践的案例,并论述了基于制造成熟度的项目制造风险管理。

第10章,关于后勤保障成熟度理论与方法。阐述了国防装备后勤保障相关背景知识及与之相关的成熟度概念,持续保障成熟度等级(SML)模型,还给出了参考比较的洛·马公司和美国海军提出的后勤保障成熟度模型。

第 11 章,关于系统成熟度理论与方法。描述了系统成熟度提出的背景,阐述了集成成熟度等级(IRL)和系统成熟度等级(SRL),并给出了矩阵计算、权值计算、因子计算和模版对比等四种方法。本章的最后还指出了面对复杂系统工程的成熟度评价时所遇到的问题。例如, SoS、FoS、ES 和网络中心系统都需要 IRL/SRL 的进一步发展和完善。

感谢殷云浩、程文渊博士带领的中航工业发展研究中心成熟度研究应用团队在实践应用、资料收集、编辑出版方面付出的努力和创造性工作。

由于时间仓促,水平有限,本书在构架和文字方面难免有不妥之处,敬请各位读者给予批评指正,在此表示衷心感谢。

作 者

第1章 国防装备系统工程	1
1.1 系统的概念及特点	1
1.1.1 系统定义	1
1.1.2 复杂系统定义	2
1.1.3 复杂系统的特点	3
1.2 系统工程概述	4
1.2.1 系统的概念及特点	4
1.2.2 系统工程的方法论	5
1.2.3 新时期的系统工程	9
1.3 国防装备系统工程理论	12
1.3.1 国防装备发展系统工程的意义	12
1.3.2 国防装备系统工程的基本框架	13
第2章 国防装备系统工程中的成熟度理论	19
2.1 装备生命周期技术和管理活动	19
2.1.1 系统工程生命周期模型	19
2.1.2 装备系统工程中的技术和流程管理活动	22
2.2 通用技术成熟度模型	26
2.2.1 技术/产品生命周期曲线	26
2.2.2 技术成熟度模型的基本原理	32

2.3	以技术成熟度等级为核心的成熟度模型体系	34
2.3.1	体系框架	34
2.3.2	重点模型	36
第3章	技术成熟度概述	41
3.1	起源发展	41
3.1.1	概念发展	41
3.1.2	实际应用	42
3.2	评价模型	43
3.3	评价对象	44
3.4	组织机构	45
第4章	技术成熟度评价的标准	47
4.1	技术成熟度等级	47
4.1.1	定义解析	47
4.1.2	局限分析	56
4.2	技术成熟度评价细则	57
4.2.1	提出背景	57
4.2.2	主要构成	58
4.2.3	理论依据	59
4.3	术语说明	62
第5章	技术成熟度评价的一般流程	64
5.1	技术成熟度评价流程	64
5.2	制定评价工作计划	66
5.3	识别关键技术元素	67
5.3.1	基本概念	67
5.3.2	基本流程	68
5.3.3	数据及信息准备	69
5.3.4	编写具体化TRL定义	70

5.4	评价关键技术元素(CTE)	70
5.5	编写技术成熟度评价报告	73
5.6	审核技术成熟度评价报告	73
第6章	技术成熟度评价相关实践	74
6.1	联合攻击战斗机项目最佳实践	74
6.1.1	评价与管理实践	75
6.1.2	项目问题分析	76
6.1.3	案例总结	76
6.2	UH-60“黑鹰”直升机案例	77
6.2.1	项目简介	77
6.2.2	评价背景	79
6.2.3	评价过程	80
6.2.4	案例分析	84
6.3	某型民用飞机评价案例	85
6.3.1	项目概况	85
6.3.2	识别关键技术元素	86
6.3.3	技术成熟度评价标准	91
6.3.4	判定CTE成熟度	93
6.3.5	评价结果小结	99
6.3.6	评价建议	100
6.3.7	支撑材料	100
第7章	技术成熟度评价管理工具	101
7.1	美国空军研究实验室TRL计算器	101
7.1.1	产生背景	101
7.1.2	结构功能	103
7.1.3	运算法则	109
7.1.4	软件分析	111
7.2	中航工业技术成熟度评价与管理系统	111

7.2.1	评价管理模块	112
7.2.2	工作流程模块	113
7.2.3	专家审核模块	115
7.2.4	技术信息管理模块	115
第8章	基于技术成熟度评价的风险管理方法	117
8.1	基本原理	117
8.2	技术成熟困难度评价方法	118
8.2.1	提出背景	119
8.2.2	理论模型	119
8.2.3	等级定义	121
8.2.4	评价细则	122
8.2.5	评价流程	126
8.3	基于集成与可达性的风险识别	127
8.3.1	提出背景	127
8.3.2	基本原理	128
8.3.3	评价对象	130
8.3.4	评价时机	132
8.3.5	评价标准	134
8.3.6	评价流程	135
8.3.7	最佳实践	139
8.4	技术成熟计划方法	141
8.4.1	制定过程	142
8.4.2	审核过程	143
8.4.3	实施监管	144
8.4.4	计划内容	145
第9章	制造成熟度理论与方法	147
9.1	发展历程	147
9.2	基本概念	149

9.3	评价原理	150
9.3.1	评价目的与评价模式	151
9.3.2	评价对象	152
9.3.3	评价组织机构	152
9.4	标准体系	154
9.4.1	制造成熟度等级	154
9.4.2	能力要素	156
9.4.3	评价细则	158
9.5	典型流程	159
9.5.1	典型评价流程	159
9.5.2	启动工作	160
9.5.3	识别 CME	161
9.5.4	实施评价	162
9.5.5	编制报告	164
9.6	基于制造成熟度的项目制造风险管理	165
第 10 章	后勤保障成熟度理论与方法	168
10.1	国防装备后勤保障相关背景知识	168
10.1.1	国防装备后勤保障相关概念	168
10.1.2	武器装备生命周期中的保障活动	170
10.2	国防装备后勤保障相关的成熟度概念	176
10.2.1	研究概况	176
10.2.2	DoD 提出的持续保障成熟度等级(SML)模型	177
10.2.3	洛·马公司提出的持续保障成熟度等级(SusRL)模型	181
10.2.4	美国海军提出的后勤保障成熟度等级(LRL)模型	184
10.3	小结	185
第 11 章	系统成熟度理论与方法	187
11.1	系统成熟度理论的提出背景	187
11.2	系统成熟度评价的常用模型	188

11.2.1	矩阵计算法	188
11.2.2	权值计算法	193
11.2.3	因子计算法	194
11.2.4	模版对比法	196
11.3	复杂系统成熟度的评价问题	197
缩略语		201
参考文献		205

图表目录

TU BIAO

图 1-1	V 字模型	6
图 1-2	霍尔三维结构模型	8
图 1-3	系统工程应用范围	10
图 1-4	联合能力的挑战	11
图 1-5	基于能力的系统工程	12
图 1-6	国防装备系统工程管理框架	14
图 1-7	系统工程流程	15
图 1-8	DoD 重大国防采办项目的三知识点实践	16
图 1-9	系统生命周期流程组	17
图 1-10	贯穿生命周期各阶段中系统工程流程组的贡献	18
图 2-1	装备系统工程生命周期模型的比较	20
图 2-2	DoD 国防采办管理系统	21
图 2-3	装备系统工程中的各种技术与管理活动	23
图 2-4	技术生命周期曲线一	26
图 2-5	技术生命周期曲线二	29
图 2-6	产品生命周期曲线	30
图 2-7	单项技术发展与多个产品应用之间的关系	32
图 2-8	系统工程流程中知识学习的过程	33
图 2-9	单项产品生命周期中 TRL 概念模型原理示意图	33
图 2-10	综合特征与 TRL——“V”模型	34
图 2-11	系统工程中的技术管理活动(成熟度模型)	35
图 2-12	BPP 计划中基于 aSRL 的技术发展路线图管理框架	39

图 3-1	技术成熟度评价模型原理图	44
图 3-2	评价工作组织结构	45
图 5-1	典型的技术成熟度评价流程	65
图 5-2	单项 CTE 的 TRL 判定流程	71
图 6-1	JSF	75
图 6-2	JSF 关键技术元素的技术成熟度等级	75
图 6-3	C-7101 飞机技术分解结构(TBS)示意图	87
图 7-1	TRL 计算器(2.2 版本)总体显示工作表	104
图 7-2	TRL 计算结果显示框	105
图 7-3	第 4 级的颜色不会高于第 3 级	105
图 7-4	技术类型选择对话框	105
图 7-5	评价内容选择对话框	105
图 7-6	绿色和黄色阈值点设置框(左绿右黄)	106
图 7-7	总体显示工作表的超链接	106
图 7-8	数据采集工作表显示界面	107
图 7-9	通过复选框或滑块条回答问题	108
图 7-10	总体 TRL 运算流程	109
图 7-11	技术成熟度评价与管理系统首页	111
图 7-12	技术成熟度评价与管理系统模块设计	112
图 7-13	评价管理模块	113
图 7-14	工作流程模块	114
图 7-15	专家审核模块	115
图 8-1	DoD 和 USAF 的风险管理过程示意图	118
图 8-2	AD2 等级与风险影响/概率的对应关系示意图	122
图 8-3	DoD 生命周期费用示意图	129
图 8-4	DoD 采办框架中的风险管理	130
图 8-5	将 SoS 中的系统作为 UUE 进行的评估	131
图 8-6	自顶向下、自底向上的迭代方法	131
图 8-7	面向产品的 WBS(PBS)	132
图 8-8	装备解决方案分析阶段(里程碑 A 前)RI3	133
图 8-9	RI3 评价的实施过程及输出结果	135
图 8-10	5×5 风险矩阵中表征风险的标准颜色	136