

从霍尔模型技术系统的发展进化看传统系统工程到现代系统工程的演变

段海波

(安世亚太科技股份有限公司)

0 问题的提出

长期以来，人们对产品设计和制造、特别是复杂产品全生命期中的设计和制造活动有个误解，即误认为产品设计活动只发生在产品全生命期的早期阶段，如立项论证或需求分析、概念设计和详细设计阶段。产品制造活动只发生在产品全生命期的中期阶段，如工程研制和生产阶段。然而实际情况是，设计和制造、特别是设计是贯穿产品全生命期的活动，而不仅仅局限于产品生命期的某个阶段，对于复杂产品尤其如此。例如，在立项论证阶段的验证机试制、工程研制阶段工艺设计和工装设计、使用维护阶段的维修性改进设计等等。

造成这一误解的原因是，把产品的设计制造和全生命期简单地看成是沿时间轴的一维线性串行活动，混淆了产品由无到有由生到死的、物的成熟度不断提升的过程和在产品全生命期中各利益相关方、特别是研发人员不断解决各种问题的人的思维过程。

1 基于霍尔模型的传统系统工程方法

实际上，早在上世纪 60 年代，伴随系统工程在核潜艇、洲际导弹、阿波罗登月等重大项目上的成功实践，美国工程界总结了系统工程的理论和方法，提出了后来大家熟知的“硬系统”方法论。其中的重要标志是：1962 年，霍尔（Arthur D. Hall）出版了《系统工程方法论》（A Methodology

for Systems Engineering）一书，强调要把系统工程看做一种解决实际问题的程序，用形态分析的方法把系统生命期阶段和问题求解的逻辑步骤分成两个维度，用时间维和逻辑维的二维形态分析矩阵定义和组织系统工程活动；1969 年，霍尔提出了系统工程的三维形态分析模型，即霍尔模型，如图 1 所示。进而美国国防部于 1974 年正式发布了基于霍尔模型的系统工程标准 MIL-STD-499A。



图 1 1969 年发表的霍尔模型原图

霍尔模型的时间维表示系统工程活动从开始到结束按时间顺序排列的全过程，分为规划、拟定方案、研制、生产、

收稿日期:2016 年 1 月 9 日

安装、运行、更新七个时间阶段；逻辑维表示时间维的每一个阶段内所要进行的工作内容和应该遵循的思维程序，包括明确问题、确定目标、系统综合、系统分析、优化、决策和实施七个逻辑步骤；知识维（图 1）按照数学意义上的形式化或结构化程度由高到低列举了时间维－逻辑维构成的二维系统工程方法可应用的学科领域：工程、医学、建筑、商业、法律、管理、社会科学和艺术等各学科知识和技能，这样就形成了由时间维、逻辑维和知识维所构成的三维空间结构。其中时间维和逻辑维将各时间阶段和逻辑步骤综合起来，形成所谓的系统工程活动矩阵（表 1），是系统分析和设计的有效工具，为解决大型复杂系统的规划、组织和管理问题提供了一种统一的思想方法，因而得到广泛应用。

表 1 时间维和逻辑维构成的系统工程二维活动矩阵

逻辑维 \ 时间维	明确问题	确定目标	系统综合	系统分析	系统评价	决策	实施
规划阶段	α_{11}	α_{12}					α_{17}
方案制定阶段	α_{21}						
开发研究阶段	α_{31}						
生产制造阶段				α_{44}			
安装实施阶段							
运行阶段	α_{61}	α_{71}					α_{67}
更新改进子阶段	α_{71}					α_{67}	α_{77}

霍尔模型的最大优点是将系统工程过程按逻辑维（人和组织分析问题解决问题的维度）和时间维（物演化成熟的维度）严格分开，把产品研发的一维线性过程，增加了一个维度，变成了二维平面。由 TRIZ（发明问题解决理论）里解决矛盾问题的第 17 号创新原理——一维变多维——可知，增加一个维度意味着看待问题或系统视角的改变，利用空间和新特征来寻找解决问题和系统增值的机会。这一维度的增加不是凭空产生的，而是应和了二战之后从 40 年代到 60 年代美苏争霸世界的军事需求，应和了一方面运筹学、控制论等学科和计算机、核能、喷气推进等技术的发展和应用拓展了人类认识自然改造自然的能力。另一方面也使人们在掌控复杂系统的研发和运行上遇到了新挑战的局面。如果把人们建立的产品研制和全生命期管理的各种模型看作一个系统，那么这个技术系统的进化应该符合 TRIZ 八大技术系统进化法则中的协调性法则，即人们对产品研制和全生命期管理的认知要沿着整个系统（各种模型）的各个子系统之间互相更协调、且与超系统（如产品研制和全生命期管理的工程实

践）交互更协调的方向发展。霍尔模型应用形态分析将系统工程过程模型由一维变二维、由二维变三维，正好应和了技术系统协调性进化法则下的几何形状进化路线（点→线→面→体），使得产品研制和全生命期管理模型系统内的研制人员的思维过程模型和研制对象的产品成熟度演进模型两个子系统之间，以及模型系统和超系统环境（如新科技革命和产业革命所代表的外围环境、模型系统的应用对象——产品研制实践和研发体系建设等）之间的相互作用及其属性达到更加匹配状态。

2 霍尔模型的问题和遇到的挑战

霍尔模型的最大问题出在其知识维。图 2 是霍尔模型经国内各种出版物翻译演绎的典型中文版示例，其中对知识维的演绎完全改变了 1969 年原版霍尔模型知识维的涵义，由学科领域的形式化结构化递减关系变成学科门类各取所需的随意罗列，一方面造成这一维度的箭头失去了实际业务意义，另一方面使得知识维缺少了模型应有的抽象性、严肃性和普适性。根据霍尔博士的论述，我们也发现，原版霍尔模型中三个维度的地位和作用完全不同，时间维和逻辑维构成的系统工程二维活动矩阵（见表 1）是系统工程方法的基础，起主导性的工具作用，而知识维上的各学科只是系统工程方法的应用领域。

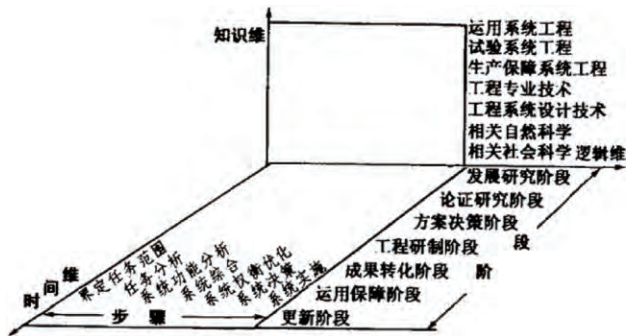


图 2 国内出版物翻译演绎的霍尔模型中文版示例

即使原版霍尔模型知识维的箭头有实际意义，即使霍尔博士提到可以增加新的学科领域、细化时间维的阶段和逻辑维的步骤，用以更多、更准确地识别系统工程过程中的活动、问题乃至解决方案，但对于目前某一领域的科研人员，无论知识维上是系统工程二维活动矩阵的应用领域，还是完成系统工程过程所需的其他学科知识和各种专业技术，霍尔模型三维空间某一节点上只能是某阶段某步骤在某学科领域

的应用指南或某学科领域书本上的知识，表现形式都是纸质文档或电子文档，使得知识维的指导意义和实操性相比其他二维都大打折扣。

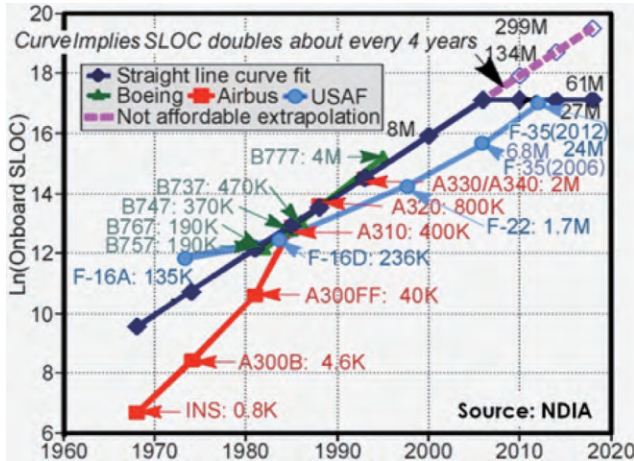


图3 飞机机载系统软件代码量增长趋势

也就是说，虽然以霍尔模型为代表的传统系统工程方法在上世纪欧美各国航空航天国防军工行业和中国航天行业都取得了广泛的成功应用，但在世纪之交传统系统工程遇到了巨大挑战。信息技术和网络技术的迅猛发展极大增加了各种人工系统的复杂程度，彻底改变了人类的战争模式和生活方式，使得靠以霍尔模型为核心的、基于文档的传统系统工程方法已无法掌控这种复杂性。例如，在航空领域，嵌入式软件在飞机系统中的重要性迅速增长，1960年代的F-4只有8%的需求由软件控制完成，到世纪之交F-22多达80%的需求由机载软件完成，下一代战机90%的需求将由机载软件完成；而飞机机载系统软件代码量和型号项目的研制成本都呈指数增长趋势，如图3和图4所示。面对这样的趋势，

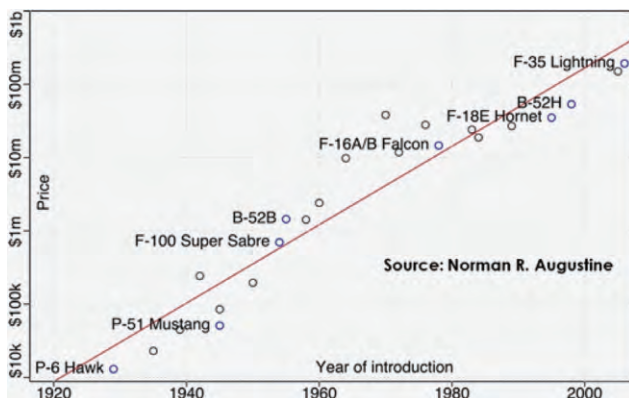


图4 美军战机研发费用增长趋势

曾任洛马公司前身马丁·马瑞亚塔航太公司董事兼CEO的诺曼·奥古斯丁早在1982年就预测，由于武器装备研制成本的增长率要比国防预算的增长率快得多，到2054年采购一架战机将会花费全部的国防预算，30多年过去了，国防武器装备的研制实践仍然没有逃脱奥古斯丁法则的预言。

面对这样的挑战（需求的拉动加上技术的推动），作为应用系统思维、原理和方法解决复杂问题，保证把复杂的事情做对、做好和做快的方法论，系统工程必须随需而变、与时俱进，扬弃传统方法的不合时宜之处，创造性地发展新范式，将以霍尔模型为核心的产品研制和全生命周期管理模型系统依照TRIZ技术系统进化法则、沿着技术系统进化路线，迈向下一个进化步骤，重新达到与新科技革命和产业革命所代表的超系统环境的协调匹配状态。

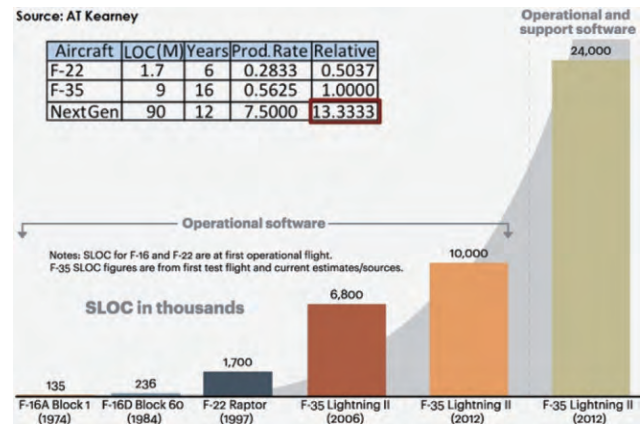


图5 美军战机复杂性飙升的同时研发效率需要更大幅度提升

欧盟和美国的各种先进技术预研验证项目和新一代武器装备研制都在朝这样的协调匹配状态努力。这样的新目标和新常态对以霍尔模型为核心的传统系统工程工作模式意味着什么？举两个例子，美军下一代战飞机载代码量9千万行，比F-35多一个数量级，研制周期比F-35缩短4年，这意味着在F-35比F-22研发效率提升一倍的基础上，下一代战机的研发效率要比F-35提升13倍以上，如图5所示。美军在下一代战车研制计划中，采用先进的基于模型的设计和制造方法，在系统复杂性比F22和F35高出近一个数量级的情况下，要把研制周期缩短到正常情况下的1/4，研制成本降到1/5（如图6所示），这意味着研发效率比传统系统工程方法要有几十倍的提升。这意味着下，对于一代的武器装备和复杂系统的研制，绝大部分错误被消灭在萌芽状态，没有返工，大部分物理试验被数字化仿真验证替代。

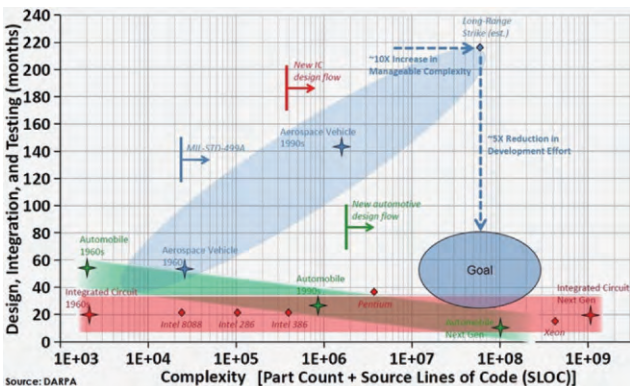


图 6 基于模型的设计和制造方法帮助美军下一代战车项目大幅度提升研发效率

为什么基于模型的方法及其新范式有这么大的威力和潜能能够帮助以霍尔模型为核心的产品研制和全生命周期管理模型系统实现了这一步的进化跃迁，进而破解复杂性困局和奥古斯丁法则的魔咒？在分析霍尔模型本身问题的基础上，还要分析基于霍尔模型的、以文档为中心的传统方法的本质缺陷和问题，分析基于模型方法的特点，进而对霍尔模型进行修订发展，以适应系统工程新范式的需要。

3 安世亚太对霍尔模型的新发展

1990 年代，个人计算机的普及和办公软件的应用实现了纸质文档向电子文档的转变，方便了文档的存储、复制和修改，但语义表达歧义性、文本表达静态性、文档间的非关联性等于文档研发模式的内在缺陷并未改变，对上万级的需求和试验条目、以及上十万级的界面接口的动态管理依旧力不从心。IT 工具，特别是 CAx 工具的广泛应用，大大提高了研发人员的专业设计效率，但由于缺乏协同的信息化手段支持，专业之间、子系统之间、阶段之间交互还是基于文档的手工抛墙模式，给集成验证和使用维护留下了大量修修补补和推倒重来的质量问题隐患。

由于基于文档的传统系统工程方法缺乏有效的技术手段支持复杂产品和系统由需求到功能的转换和分解、需求及设计变更的追踪管理、涉及多学科领域团队和系统元素间交互指数级增长的界面接口和设计方案量化表达、权衡优化和沟通决策、以及设计方案对涉众需求的验证确认 (V&V)，造成系统集成验证时出现大量的诸如发热、振动、电磁干扰等不期望的故障效应，如图 7 所示。近年来，F35 战斗机和波音 787 飞机等复杂装备和产品遇到的成本进度等问题，可

以说都是基于文档的传统系统工程方法所面临的复杂性困局的生动体现。

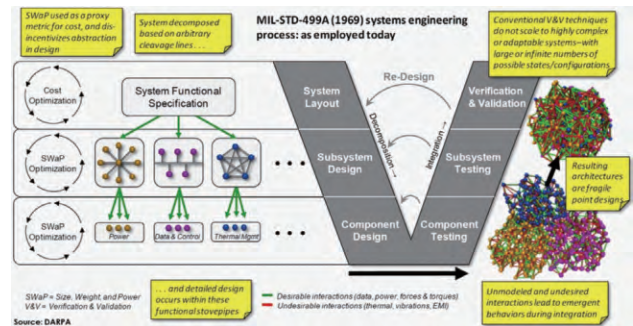


图 7 基于文档的传统系统工程方法应用于当前复杂产品和系统研发时面临的技术困难

世纪之交，随着 SysML、STEP、Modelica 和 FMI 等一系列信息建模、数据建模、系统建模、系统仿真标准及 MBSE、PLM 相关工具平台的应用和发展，由于模型本身具有的一致性、可追踪性、可验证性和全生命期的动态关联性，能够做到对需求等变化的实时全局响应，更好地理解和管理复杂性，上述建模工具和平台物化了相应的方法，使得系统工程过程的技术活动和技术管理活动可管理、可复现、可重用，使得统领生命周期各阶段产品 BOM 视图的集成系统模型和数据协同模型成为可能，打破了专业壁垒，破解了设计和工艺、研发和制造、研制和使用维护的分离，极大地提高了沟通和协同效率，实现了复杂产品和系统研发的企业内各专业部门间、供应链扩展企业各成员单位间、以及客户与研制方之间的信息共享和协同，实现了以模型驱动的方法来采集、捕获和提炼数据、信息和知识。在企业研发信息化体系建设中，顶层的基于 MBSE 的系统工程过程子系统 and 底层的数据管理和信息协同子系统分别成为复杂产品研制的跨业务、跨组织、跨地域协同工作平台的“中枢神经系统”和“经络系统”，于是霍尔模型的系统工程二维活动矩阵构成的篱笆墙网格，被拓展为横跨系统全生命周期、系统工程技术域全过程和企业智力资产价值链全过程的三维协同空间。

为了应和基于文档的传统系统工程向基于模型的现代系统工程的演变，继续应用 TRIZ 里的一维变多维创新原理和技术系统协调性进化法则下的几何形状进化路线，作者对霍尔模型进行了修改、扩展和抽象，将知识维修改为认知维，将时间维修改为系统维，逻辑维的名称不变，将时间的概念引入上述三个维度，使得三维的箭头都有实际的业务意义，

构成了精益研发三维系统工程抽象模型，如图 8 所示。具体地说，安世亚太的精益研发三维系统工程模型对原霍尔模型做了如下扩展：

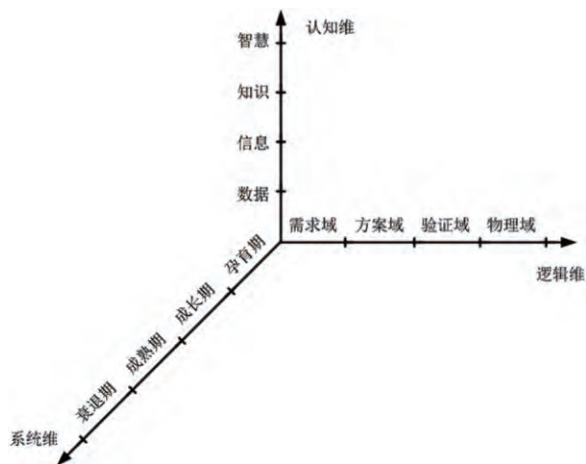


图 8 精益研发三维系统工程抽象模型

(1) 用 DIKW 的认知维替换了霍尔模型原来的知识维，给霍尔模型的第三维赋予崭新的业务意义和价值。DIKW 的认知维代表了人和组织的智力层次结构价值递增的顺序，反映了主观世界改造客观世界的认知过程，既包括人工物理系统全生命期特别是研制过程中产生的 DIKW 的管理和转化跃迁，也包括组织内现有 DIKW 在人工物理系统全生命期中的应用，即涵盖了原霍尔模型知识维的本来场景和翻译成中文版后国内学者对这一维应用的演绎。原霍尔模型基于书本文档的知识维在精益研发三维系统工程抽象模型的认知维中变成了一个平面。新的认知维记录了主观世界认识和改造客观世界过程中的认知过程和结果，研制组织对人工物理系统的认识不断深化、积累形成数据→信息→知识→智慧的认知流就是企业研发体系的能力建设，是事的维度，PDM、知识管理 / 知识工程、技术管理等 IT 工具和应用是对企业复杂产品研制管理能力的延伸和提升。这一维度应合了以工业 4.0 为代表的新一轮科技革命和产业革命的发展趋势、以及中国制造 2025 信息化促进工业化、两化深度融合的最新进展，应对了人工物理系统复杂程度日益提高带来的挑战，将人与研发组织的能力建设及其成熟度过程纳入复杂产品和系统研发的系统工程体系（即精益研发），利用信息化手段的革命性进展（如大数据、云计算、物联网等），强化对工业化的支撑和促进。

从知识维到认知维的变化，不但是 TRIZ 的一维变多

维创新原理、协调性进化法则、几何形状进化路线在产品研制和全生命周期管理模型系统进化发展（由霍尔模型进化到精益研发三维系统工程抽象模型）上的进一步应用，克服了原霍尔模型知识维存在的抽象性、严肃性、普适性、指导性和实操性的问题，而且进一步运用 TRIZ 技术系统进化法则看待产品研制和全生命周期管理模型系统的进化发展，可得到更多有益的启示。技术系统完备性法则告诉我们：一个完备的技术系统要包含能量源（可在系统外部）、动力装置、传输装置、执行装置、控制装置、度量装置；新的技术系统经常没有足够能力独立实现主要功能，要依赖超系统提供资源；随着技术系统的发展，技术系统逐渐获得所需资源，自己提供主要功能；技术系统朝着系统不断自我完善、减少人的参与、以提高技术系统效率的方向进化。能量传递法则告诉我们：技术系统实现功能的必要条件是，为提高技术系统的能量传递效率，能量必须能够从能量源流向技术系统的所有元件；技术系统的进化应该沿着使能量流动路径缩短的方向发展，以减少传递过程中的能量损失；最好用一种能量（或场）贯穿于系统的整个工作过程，减少能量转换导致的损失；如果系统组件可以更换，那么将不易控制的场更换为容易控制的场。

DIKW 的认知维为产品研制和全生命周期管理模型系统补全了控制装置和度量装置，让系统工程的八个技术管理过程域在精益研发三维系统工程抽象模型内有了用武之地。基于霍尔模型的传统系统工程过程的媒介是文档，无法起到对系统工程过程的控制和度量功能，需要的人的全面参与；而在基于精益研发三维系统工程抽象模型的系统工程新范式下，由于模型的一致性、动态关联等特性和相关 IT 工具的支持，人的参与在减少，产品研制和全生命周期管理模型系统可以依靠自身完成部分控制和度量功能，而且效率比基于文档的传统模式大幅提高。模型替换文档成为系统工程新范式的沟通媒介后，沟通的频率和有效性大幅提高，后期返工大幅减少，因而信息 / 能量传递损失大幅减少，产品研制和全生命周期管理模型系统的信息 / 能量传递效率大幅提高。为进一步提高信息 / 能量传递效率，减少各领域模型间沟通、格式转换、互操作的信息 / 能量转换损失，产品全生命周期信息表达、交换和共享标准、本体工程、以架构为中心的模型管理、产品全生命周期数据协同中枢等各种以一种能量场贯穿整个模型系统工作过程的努力应运而生。人参与的减少，

模型替换文档站到系统工程过程的前台，也正好符合将不易控制的场更换为容易控制的场。

(2) 将时间维更名抽象为系统维，让这一维专注于人工物理系统（例如技术和产品，是主观世界认识和改造的对象）的由生到死（孕育期、成长期、成熟期、衰退期）成熟度不断提升的发展进化的全生命周期过程，是物的维度。

(3) 逻辑维名称保持不变，但抽象模型的逻辑维将原霍尔模型逻辑维瀑布模型的七个问题求解步骤抽象为系统工程过程的需求（问题）、方案、验证、物理四个域，描述主观世界认识和改造人工物理系统时基于系统工程过程不断解决各种问题的思维活动，是人的维度，CAx 等 IT 工具的应用是对人和组织思维能力和问题求解能力的延伸。

(4) 图 8 的精益研发三维系统工程抽象模型可以按照各维度的分类分形特性进行实例化，为具体的业务场景提供人－物－事的系统工程模型框架。

在系统维上，可以将系统生命周期阶段应用于装备体系、装备系统、装备产品、设备子系统、元器件／零部件等系统层次上进行实例化，也可以应用于技术研发、产品研发或技术研发加产品研发（图 9 所示），乃至建筑设计和智慧城市规划设计等场景。ISO/IEC/IEEE 15288、国防部装备采办综合管理框架、NASA、能源部等生命期模型都是系统维的实例化。

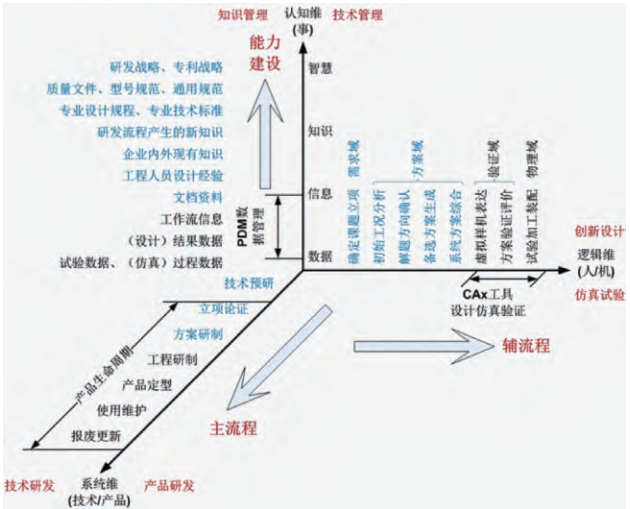


图 9 精益研发三维系统工程实例化模型

在逻辑维上，采用什么的模型来描述系统工程的核心（技术）过程是系统工程领域的核心问题。瀑布模型（Dr. Win Royce, 1969）、螺旋模型（Dr. Barry Boehm,

1983）、V 模型（1980 年代末）、反馈模型（系统工程管理指南, DSMC, 1990）、椭圆模型（MIL-STD-499B, 1994）、循环模型（Walter Hammond, 1999）、双 V 模型（本世纪初），乃至 TRIZ 发明问题解决流程都是逻辑维上问题求解模型的实例化。其中，V 模型对于系统工程过程模型有里程碑的意义。V 模型不仅仅是掰弯了的瀑布模型或串行开发过程，根据 TRIZ 的一维变多维创新原理，增加一个维度意味着看待世界的视角完全改变，V 的形状非常准确地表示了从系统分解到集成活动的系统演进过程，使系统工程过程变得可视化、且易于管理。自上世纪 80 年代末期提出 V 模型，然后不断改进，考虑系统架构和系统元素实体的并行开发，到本世纪初提出双 V 模型，二维变三维、又增加了一个维度，从 MIL-STD-499B 椭圆模型到双 V 模型，体现了系统工程过程模型向超系统进化的趋势，至此系统工程过程模型已相当成熟和完善。除了实体 V 和架构 V 构成的双 V 模型在系统层次上的递归应用（图 10 所示）外，可以将双 V 模型在可靠性、安全性、保障性等系统特性上进行实例化，也可应用于新产品设计（即工业品正向设计）、现有产品改进（包括工业品再设计）、故障诊断排除等产品开发场景，还可以应用于进化开发、增量开发等软件开发模式。

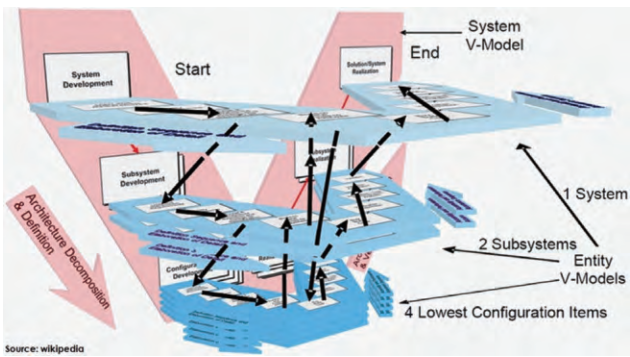


图 10 实体 V 和架构 V 构成的双 V 模型在系统层次上的递归应用

在认知维上，DIKW 框架、方法和工具可以按组织架构应用于不同层级，也可应用于系统工程各技术管理域和项目管理各管理域等企业研发管理和制造生产管理所关注的管理领域，还可按照 DIKW 四个层次，应用于工程海量数据、工业大数据、互联网大数据等不同种类的数据整合、分析、挖掘、展示场景，应用于产品模型数据的管理、融合和协同，应用于知识管理、知识工程、各种专业数据库／知识库建设，乃至应用于集团企业的商业智能和战略决策等等。

(5) 精益研发三维系统工程模型人、物、事企业三维能力成熟度提升是企业架构规划和信息化建设的重要内容,也是基于系统工程的精益研发体系建设的重要组成部分。CMMI 是企业过程能力的评价模型,其中的技术过程域可应用于逻辑维能力成熟度的提升,技术管理域可应用于认知维能力成熟度的提升。People-CMMI 是人员/组织能力成熟度的评价模型,包括基于个人认知能力模型(了解/熟悉/掌握/精通/大师)和基于组织认知能力(学习、洞察、应变、创新、执行),可应用于认知维人力资源管理能力成熟度的提升。而技术成熟度 TRL、集成成熟度 IRL、系统成熟度 SRL、制造成熟度 MRL 则是系统维上技术/产品能力成熟度的度量评价模型。

(6) 精益研发三维系统工程模型更深层次的应用是分

析两两维度交互的细节,特别是全新的认知维与系统维和逻辑维,即物-事和人-事交互的细节,进而为特定业务场景下的人-物-事业务需求和业务逻辑三维空间建模提供输入。

4 传统系统工程向现代系统工程的演变

霍尔模型和精益研发三维系统工程模型分别为基于文档的传统系统工程和基于模型的现代系统工程提供了理论方法框架。表 2 从问题求解和技术系统进化的角度梳理对比分析了从传统系统工程向现代系统工程的演变。

在精益研发三维系统工程模型的理论框架和三维空间里,MBSE 作为关键使能技术,其发展和应用也遵循 TRIZ 技术系统进化法则的向超系统进化的趋势,从 SysML 的单

表 2 从传统系统工程向现代系统工程演变的对比分析

	基于文档的传统系统工程 (TSE)	基于模型的现代系统工程 (MBSE)
对应的科技革命和产业革命的特点	20 世纪中叶开始的科技革命和 20 世纪中后期开始的产业革命: 机械化电子化、自动化、规模化	20 世纪末期开始的科技革命和 21 世纪前期开始的产业革命: 信息化、网络化、智能化、定制化
战争模式	各种兵器间的对抗	网络化分布式的体系对体系的对抗、能力对能力的对抗
研制组织的商业模式	某种装备供应商	一种(军事)服务体系供应商和所需能力(作战效果)的提供者
研制组织的竞争模式	专业化对专业化的竞争	全价值链对全价值链(研发能力与研发能力、制造体系与制造体系、产品系统与产品系统、产业链与产业链)的竞争
产品对象系统特点及(静态)复杂性度量	复杂机电系统 [零件数+源码行数] $<10^6$	从嵌入式系统向大规模赛博物理系统演化 [零件数+源码行数] $>10^6\cdot 10^7$
研制周期内工程更改量	10 次/月-100 次/月(以 1960 年代的水手飞船为例)	100 次/月-1300 次/月(以现代赛博物理系统为例)反映需求的多样性和敏捷性
理论基础和过程模型	霍尔模型及其系统工程二维活动矩阵, 实体 V 模型	精益研发三维系统工程模型(系统生命期阶段模型+实体 V 和架构 V 构成的双 V 模型+DIKW 模型), 六个可选的 MBSE 方法
里程碑意义的顶层标准规范(部分)	MIL-STD-499 1969 MIL-STD-499A 1974	MIL-STD-499B Draft1994 MIL-STD-499C Draft2005 ISO/IEC/IEEE 15288: 2008, 2015 INCOSE SE Handbook 4th Ed 2015
过程载体	基于自然语言的文档, 分而治之	基于标准语言的模型、以架构为中心的模型集成和管理, 一统天下
过程载体缺点/优点	语义的歧义性、文本的静态性、文档的非关联性, 对需求等变化的被动延迟反应	一致性、可追踪性、全生命期的动态关联性, 对需求等变化的实时全局响应
验证手段	试验+仿真计算	建模仿真+试验+基于工业大数据的云计算
应用场景	多专业+工具孤岛+抛墙式研制	基于模型的系统生命期管理→基于模型的产品线/系统族生命期管理 →基于模型的企业生命期管理
应用效果	组织内协同创新	全社会协同创新, 人/组织(社会)与人工系统(含产品和环境)的共轭协同进化
技术成熟度	7~9(随国别、行业、组织、产品项目复杂度而不同)	3~8(随国别、行业、组织、产品项目复杂度、预研验证项目目标应用场景而不同)

点应用，到基于各种领域模型互操作和集成的产品全生命期的应用（图 11 所示），从单一产品、到产品线、体系工程的应用，从航空航天、国防军工，到汽车、轨道交通、医疗器械、能源工程、城市规划、公共安全乃至人类生活的方方面面，其能力成熟度和技术成熟度不断提高（图 12 所示）。但需要澄清一点，在基于模型的新范式下，并不是不要文档，而是文档由传统范式的前端移到了后端，为前台的模型中起辅助作用。

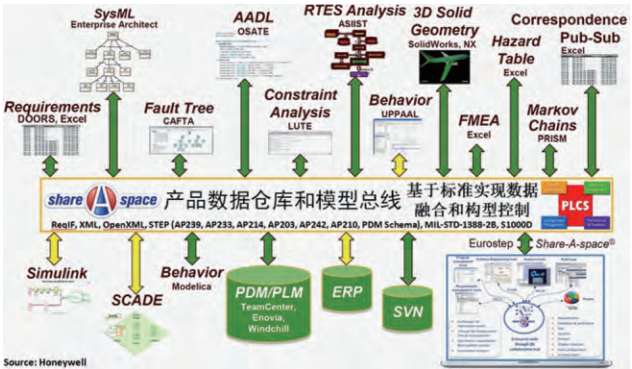


图 11 基于 STEP/PLCS 标准的产品信息模型总线和产品数据协同中枢

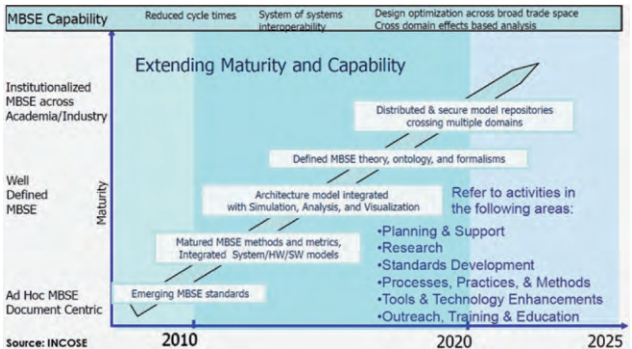


图 12 MBSE 能力成熟度演进路线图

5 结论

面对无穷的未知和挑战，通过问题求解和方案修正来寻求好的解释是人类不断取得科技进步和发展进化的不竭动力。无论是基于模型的新范式破解硬件问题软件化带来的奥古斯丁法则魔咒和复杂性挑战，还是用 TRIZ 技术系统进化法则来解释推演系统工程过程模型半个世纪来的发展变化，都是如此。

本文从问题求解的角度看待传统系统工程方法向现代系统工程发展演变的历史，从技术系统进化的角度分析了代表传统系统工程方法的霍尔模型的优缺点，提出了为适应现

代系统工程方法新发展的精益研发三维系统工程模型抽象框架和实例化应用于各种业务场景的建模指南，理清了企业研制管理能力建设的涵义和意义，明确了技术研发和产品研发与人工物理系统成熟度之间的关系，提升了产品研制和全生命周期管理模型系统的完备性。

最后，系统工程说到底解决的是人与物之间的问题，它不解决人与人之间和人内心的问题。无论是系统工程和 MBSE，还是霍尔模型和精益研发三维系统工程模型，都既不是点金术，也不是历史的终结，都还在不断发展变化中，随着几十年后以人体科学、生物工程和量子计算机等为代表的下一轮科技革命和产业革命的到来，系统工程也将会进入新的发展阶段。

参考文献

- [1]Arthur David Hall III. Three Dimensional Morphology of Systems Engineering. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1969, 5(2): 156-160
- [2]Hyman Duan, Mike Zhao.Systems Engineering Perspective on Computer Aided Innovation.Proceedings of TRIZCON 2009, Altshuller Institute for TRIZ Studies
- [3] Dual Vee Model. https://en.wikipedia.org/wiki/Dual_Vee_Model
- [4] 姚宏宇, 田溯宁. 云计算: 大数据时代的系统工程. 北京: 电子工业出版社, 2013
- [5] 乌尔里希·森德勒主编. 工业 4.0: 即将来袭的第四次工业革命. 北京: 机械工业出版社, 2014
- [6] 李杰. 工业大数据: 工业 4.0 时代的工业转型与价值创造. 北京: 机械工业出版社, 2015
- [7]INCOSE Systems Engineering Vision 2025, 2014 