

系统工程和MBSE在正向设计增材制造整体解决方案中的应用

段海波

安世亚太科技股份有限公司, 北京 100025

摘要 阐述了基于正向设计和增材制造的高端研发与先进制造整体解决方案的架构, 分析了系统工程在这一整体解决方案中的框架骨干作用, 从系统工程技术过程的逻辑维、组织能力建设的认知维和人工物理系统全生存期周期的系统维3个维度出发, 阐述了实施基于模型的系统工程(MBSE)对提升正向研制能力的作用。

关键词 系统工程; 基于模型的系统工程; 正向设计; 增材制造

安世亚太公司(以下简称安世亚太)总结了中国工业化进程中的各行业复杂产品研发实践经验, 分析了中国制造业转型升级的内部困难、核心问题和根本原因后, 得出结论: 站在系统工程高度, 重新认识设计与制造的关系是制造业转型升级和现阶段工业化补课的切入点和突破口。因此, 为应对中国经济转型升级过程中对自主创新的强烈需求, 并为《中国制造2025》中的设计制造一体化提供可落地实施的解决方案, 在为《中国制造2025》中的研发设计提供精益研发解决方案的基础上, 安世亚太提出了基于正向设计和增材制造的高端研发与先进制造整体解决方案(以下简称整体解决方案)^[1]。

相比减材和等材制造, 增材制造不仅是一种新的制造加工工艺方法, 更是新一轮产业革命中改变人类生产和生活方式的重要引擎和颠覆性技术体系。这种颠覆性体现在, 除了这种新的制造工艺带来的、可在一台设备上快速精密制造出任意复杂形状的零件, 大幅度减少零件数目和加工工序、缩短加工周期、节省原材料、降低能耗等众多好处外, 更重要的是, 它实现了结

构设计、高性能材料制备、复杂构件制造的一体化, 并为宏观上的结构设计和微观上的材料制备带来革命性的变化。其颠覆性不仅体现在制造和服务端, 更体现在设计端。其背后的增材思维将带来一场释放自由度和激发创造力的设计革命。在此基础上, 安世亚太正本清源, 给出了正向设计新形势下的全新定义: 以系统工程为框架, 以增材思维和技术为抓手, 面向人工物理系统的改进设计、原创设计和技术研发, 来提升人工物理系统的设计制造一体化能力、企业自主创新能力乃至企业和社会可持续发展能力的设计活动、方法和解决方案咨询体系^[2-3]。

整体解决方案的技术架构如图1所示。保证这一技术架构有效运转的整体解决方案的逻辑架构如图2所示, 将按材料设计工艺制造专业划分的线性一维树状组织架构, 拓展为面向应用和市场的主营业务和其他共性基础业务构成的二维矩阵式组织架构。

系统工程和基于模型的系统工程(MBSE)的方法、流程、工具不但是这一整体解决方案的重要组成部分; 而且, 在这一整体解决方案的架构和流程体系开发过

收稿日期: 2018-08-14; 修回日期: 2018-10-18

作者简介: 段海波, 高级工程师, 研究方向为基于增材思维的先进设计与智能制造、系统工程与MBSE、基于标准的数据协同, 电子信箱: hyman.

duan@peraglobal.com

引用格式: 段海波. 系统工程和MBSE在正向设计增材制造整体解决方案中的应用[J]. 科技导报, 2019, 37(7): 102-108; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.

2019.07.015

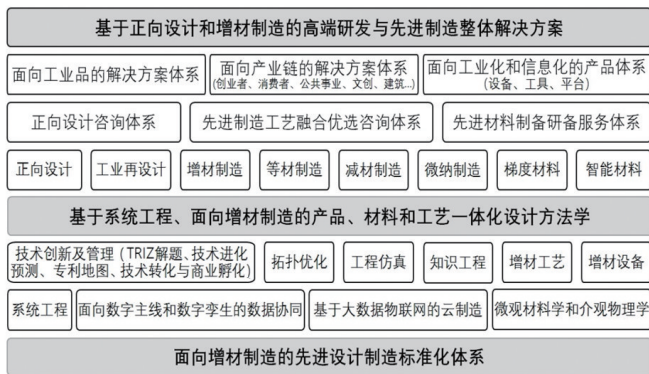


图1 基于正向设计和增材制造的高端研发与先进制造整体解决方案技术架构

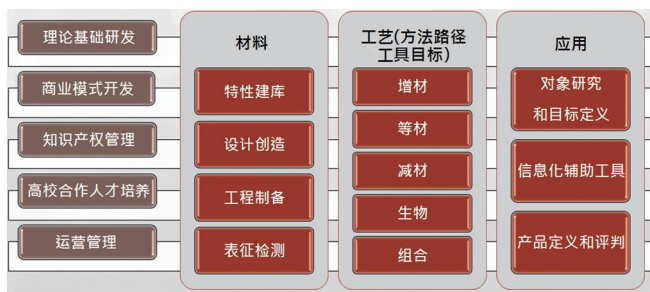


图2 基于正向设计和增材制造的高端研发与先进制造整体解决方案逻辑架构

程中,系统科学和系统工程的框架、方法、流程起到顶层框架的指导作用;另外,在这一整体解决方案的落地实施过程中,系统工程和MBSE的方法、流程、工具起到了提升正向研制能力成熟度的作用。

1 系统科学和系统工程在整体解决方案架构开发中的应用

从20世纪80年代初开始,钱学森在系统观点指导下,探讨现代科学的总体系和各门科学的体系结构,提出了“4个层次1座桥梁”的学科体系的本体框架(图3),并划分了11大学科部门。即属于工程技术层次的学科提供直接用于改造客观世界的知识,技术科学层次的学科提供指导工程技术的理论,基础科学层次的学科提供指导技术科学的理论,再通过相应的哲学分论上升到哲学层次,并接受哲学的指导^[4-5]。

整体解决方案技术架构的设计参照了上述的“4个层次1座桥梁”这一现代科学学科体系的^{本体框架}: (1) 基础学科层包括系统工程、数学、物理学、材料学、信息化使能环境——面向数字主线和数据协同、基于

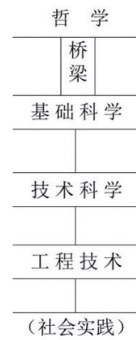


图3 现代科学学科体系的^{本体框架}

大数据和物联网的云制造;(2) 技术学科层包括发明问题的解决理论(TRIZ)及技术创新和管理、拓扑优化、工程仿真、知识工程;(3) 工程技术层包括基于系统工程面向增材制造的产品材料工艺一体化设计方法学,及其流程体系组合配置而成的正向设计咨询体系、先进制造工艺融合优选咨询体系、先进材料制备研备服务体系;(4) 工程实践层包括面向工业品的解决方案体系(如飞机、航空发动机、汽车、模具等)、面向产业链的解决方案体系(如创业者、消费者、医疗、高等教育和职业培训等公共事业、文创、建筑等)及面向工业化和信息化的产品体系(工艺和材料设备、软件工具和平台等)。

用这一本体框架重新审视系统的内涵,可以得出:在技术科学层次的视图上,系统是由相互制约的各部分组成的具有一定功能的整体(钱学森);在基础科学层次的视图上,系统是相互联系、相互作用的诸元素的综合体(贝塔朗菲);在哲学层次的视图上,系统是在对任一对象上发现的具有某种属性的关系或某种关系的属性(乌约莫夫、闵家胤)^[6-7]。从本质上说,任何系统都包括2个方面:元素及其间的关系。把现代科学的学科体系看作一个系统,应用系统的哲学层次视图和基础科学层次视图,可以得到一张现代科学学科体系的二维视图(图4)。其中,若只对元素的范围作出某种限定,就得到以某类事物为研究对象的学科,即图中的横坐标上的学科;若只对关系的类型作出某种限定,就得到某种横断学科,即图中的纵坐标上的学科;两坐标轴构成的坐标系在第一象限的每个交点都有可能是或已经是一门交叉学科,即“科学的线正在织成科学的布”。

整体解决方案逻辑架构的设计也借鉴了钱学森关于研究对象的学科和研究关系的学科共同织成一张科学的布的思想;而且根据这一思想,我们非常重视系统科学、系统工程和数学在整体解决方案中的骨干作

用。同时,这一逻辑架构也符合欧美先进企业的研发模式。

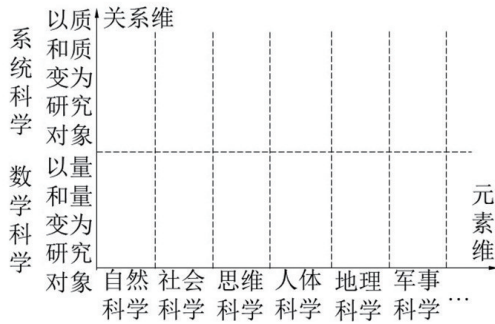


图4 由系统的内涵看现代科学学科体系

另外,整体解决方案逻辑架构的设计还要满足对技术架构的保障和支撑作用。整体解决方案的2个架构的这一相互关系,源自系统工程生存期阶段模型中所关注系统与其生存期各阶段使能系统的交互(图5)^[8]。即如果把整体解决方案的技术架构当作所关注系统(system-of-interest,即图5中的所关心的系统),则整体解决方案的逻辑架构中的各功能模块分别对应技术架构的各个生存期阶段,提供相应的保障和支撑。

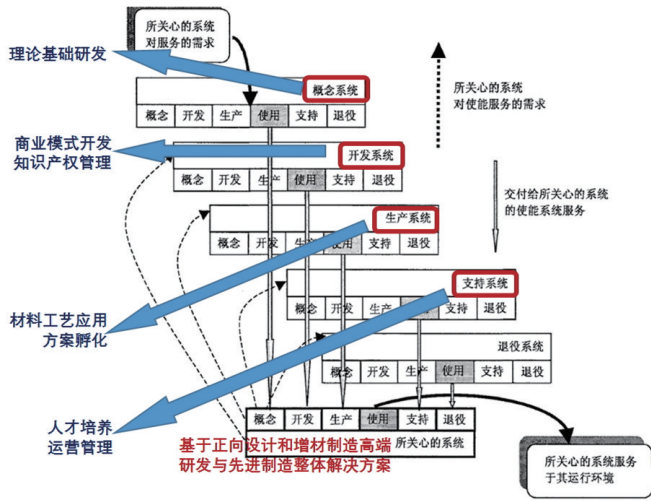


图5 从系统及其使能系统的生存期阶段模型看整体解决方案逻辑架构对技术架构的支撑

2 系统工程在整体解决方案流程体系开发中的应用

支撑整体解决方案中工程技术层的核心——基于系统工程面向增材制造的产品材料工艺一体化设计方法学——的是一套正向设计流程体系。这套流程体系是基于系统工程的,即将系统工程的技术过程组、技术

管理过程组、协议过程组和组织项目使能过程组下的各个过程(图6)^[9-10],在基于正向设计和增材制造的高端研发与先进制造的各种场景下进行实例化。

技术过程组		技术管理过程组	组织项目使能过程组
业务或使命分析过程	集成过程	项目计划过程	生命期模型管理过程
涉众需要需求定义过程	验证过程	项目评估控制过程	基础设施管理过程
系统需求定义过程	移交过程	决策管理过程	组合管理过程
架构定义过程	确认过程	风险管理过程	人力资源管理过程
设计定义过程	运行过程	技术状态管理过程	质量管理过程
系统分析过程	维护过程	信息管理过程	知识管理过程
实现过程	处置过程	测量过程	
协议过程组	采购过程	供应过程	质量保证过程

图6 系统工程相关标准和指南中规定的标准过程

回顾整体解决方案的3大目标——提升人工物理系统的设计制造一体化能力、企业自主创新能力乃至企业和社会可持续发展能力,从高到低横跨了企业系统工程、产品系统工程、个体系统工程3个层次和宏观-介观-微观3个尺度,所以,需要一个跨层次跨尺度的框架模型来管理这套流程体系。笔者对霍尔模型进行了修改、扩展和抽象,将知识维改为认知维,将时间维改为系统维,将时间的概念引入上述3个维度,使得3维的箭头都有实际的业务意义,提出了精益研发三维系统工程模型(图7)^[11];于是,基于文档的传统霍尔模型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存期、系统工程技术域全过程和企业智力资产价值链全过程的正向设计三维协同空间(图8)^[11],为整体解决方案的流程体系提供了管理框架。这套流程体系充满了图8所示正向设计三维空间各个维度、各个层次和各个角落。

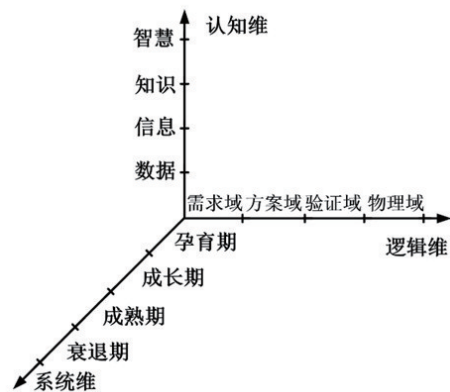


图7 精益研发三维系统工程抽象模型

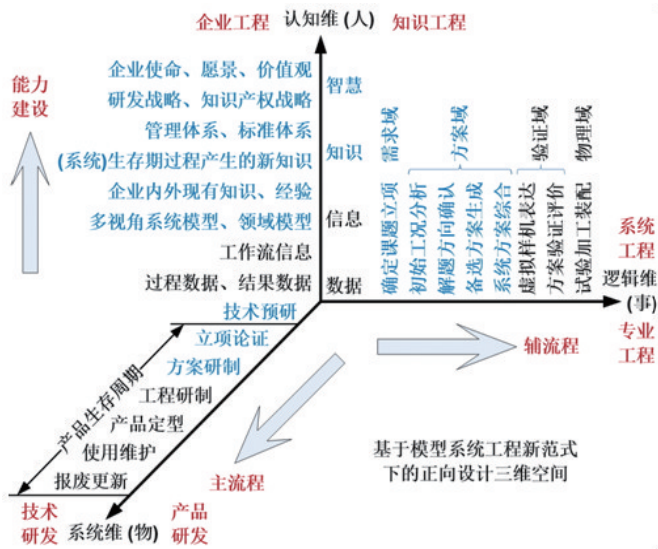


图8 精益研发三维系统工程模型框架下的正向设计三维空间

系统维上的主流程,即系统生存期阶段模型及其相关管理流程,保证组织做正确的事,这是面向外部客户、聚焦在交付给客户的产品或服务的物的维度。图6系统工程过程中的组织项目使能过程组下的生存期模型管理过程、组合管理过程和基础设施管理过程,以及协议过程组下的采办过程和供应过程,共5个过程在系统维上。这样,整体解决方案所涉及的企业系统工程和产品系统工程的互动协同,以及基于集成产品开发(IPD)的产品研发与技术研发的互动协同都被统一在系统维下。

逻辑维上的辅流程,即系统的核心技术过程,保证组织正确地做事,这是面向组织内部、聚焦在系统

工程过程执行和管控的事的维度。图6系统工程过程中的技术过程组下的14个过程和技术管理过程组中除信息管理外的7个过程,共21个过程在逻辑维上。实体V模型是将图6系统工程技术过程组中的各个过程串起来的、也是图7、图8逻辑维的核心引擎流程,其中技术过程组的后3个过程(运行、维护、报废)本身就是实体V模型的实例化应用。作为整体解决方案流程体系重要组成部分的面向增材制造的设计(DFAM)和面向生态设计和绿色制造的可持续性设计(DFS),同传统的专用特性和通用特性(图9)一样,它们都是实体V模型左半边的需求输入,以实体V模型和双V模型为框架开展实际的产品研制,进而实现对实体V模型和双V模型的实例化应用。例如,面向增材制造设计的顶层流程(图10)^[12]涵盖了产品的需求分析、架构设计、详细设计等过程,在实际应用时,需要将其下专业子流程,如

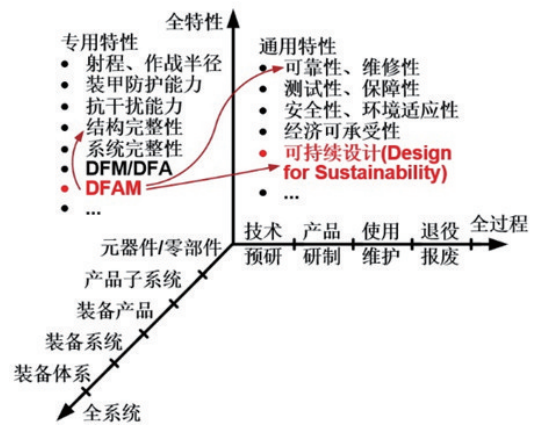


图9 系统工程实体V模型可以在全系统、全过程、全特性上进行实例化

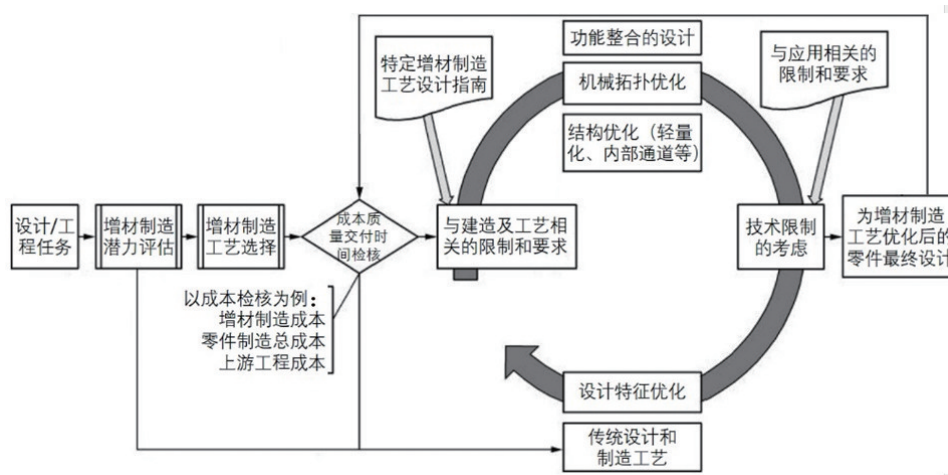


图10 面向增材制造设计的顶层流程

适用于工业再设计的零件合并和功能集成流程,基于微观宏观结构建模和多目标优化的工艺、材料、零件/产品并行设计,基于MBSE的系统建模、拓扑优化及仿真和创成设计一体化流程,面向增材制造的创成设计流程等,纳入双V模型的系统工程过程框架。

认知维上的能力建设,通过数据、信息、知识及智慧(DIKW)的认知流反映了人和组织智力层次结构价值递增的顺序,记录了主观世界认识和改造客观世界的认知过程和结果,这是关注组织自身成长的人的维度。图6系统工程过程中的技术管理过程组下的信息管理过程,以及组织项目使能过程组下的知识管理过程、人力资源管理过程和质量管理过程,共4个过程在认知维上。相比以减材工艺为核心的传统制造模式,以增材制造为核心的工艺融合和分布式云制造模式更需要DIKW框架和大数据、物联网等相关方法工具的支持。整体解决方案的后续开发会利用增材制造、云计算、物联网等技术实现分布式制造、泛在制造、社会制造等生产模式,进而在DIKW框架下形成面向赛博物理社会空间的智慧经济。

3 MBSE 在整体解决方案中的应用

系统工程和MBSE是整体解决方案的重要组成部分。以《系统工程愿景2020》中MBSE英文定义为基础,综合MBSE其他英文定义和解释,给出MBSE的中文版定义:狭义的MBSE是一种形式化的建模方法学,包括架构框架集、基于模型的过程集、建模语言集和建模工具集,它是为了应对基于文档的传统系统工作模式在复杂产品和系统研发时面临的挑战,以逻辑连贯一致的多视角通用系统模型为桥梁和框架,实现跨领域模型的可追踪、可验证和全生存期内的动态关联,进而驱动贯穿于人工系统全生存期内的、以及从体系往下到系统组件各个层级内的系统工程过程和活动。广义的MBSE是指相对于传统的基于文档的系统工程模式的全新研发范式,包括建模方法学及其使能技术、人员能力和应用环境等所构成的体系,如信息化协同平台(这里指的不是SysML建模工具,而是系统全生存期各阶段各领域标准模型的协同平台)、实施方法、培训课程体系、最佳实践、能力成熟度模型和路线图等^[13]。

由上述定义可以看出,MBSE既是一种新的建模方法学和范式,又指达到理想研发模式的能力成熟度提

升过程。从长远和全球趋势看,MBSE正在成为新一轮科技革命和产业革命所导向的智能社会所需的若干基础设施的关键使能技术;从短期和国内现状看,实施MBSE,有助于重建正向设计的理论和实践,利用后发优势缩短与欧美发达国家的差距。因此,以提升人工物理系统的设计制造一体化能力和企业自主创新能力为主要目标的整体解决方案,通过实施MBSE逐步提升正向研发能力和水平,成为必然选择。所以,MBSE整体解决方案中的应用首先是在图8中的逻辑维上,将MBSE建模方法学应用于图10和图11^[14]的面向增材制造设计的顶层流程和具体化流程,以实现组件级和系统级的增材设计。在整体解决方案的基础科学层,除了系统工程和MBSE,还有一个与系统工程密切相关的信息化使能环境模块——面向数字主线的数据协同。

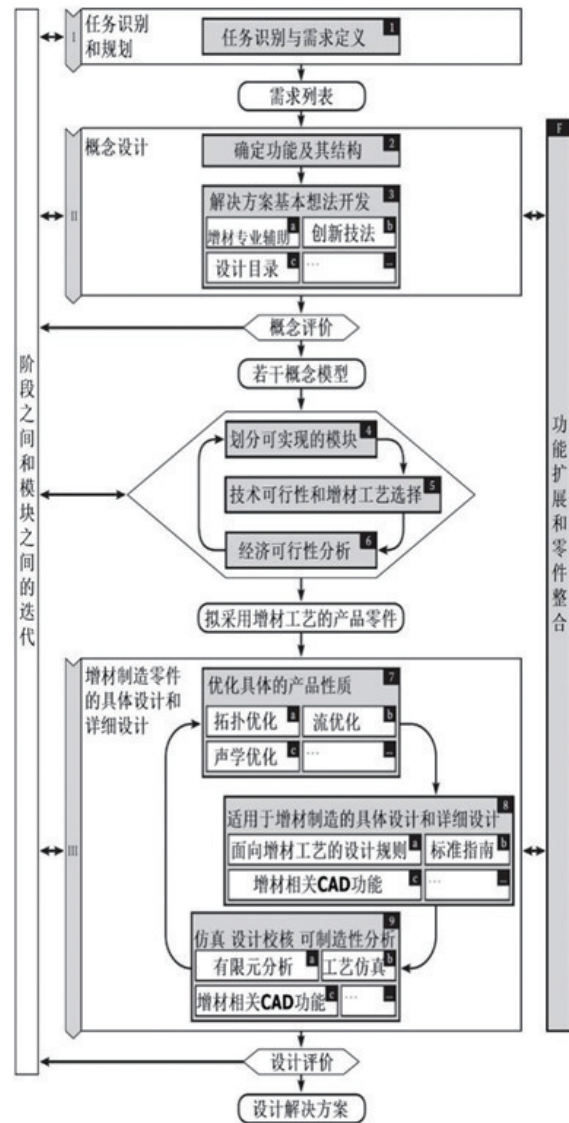


图11 面向增材制造设计的具体流程

数字主线(或数字线程)是指通过创建和使用人工物理系统的跨领域通用数字孪生体,来保证系统全生存期内的数据集成视图和传统上相互孤立视图间的数据流的通信框架,进而实现系统当前和未来能力的动态实时评估,以辅助系统全生存期内的各种决策。而数字孪生体是指过程、产品或服务的虚拟模型,这种虚拟和物理世界的配对允许分析数据和监控系统,以实现在问题发生之前阻止问题、防止系统停止工作、开发新机会、甚至通过模型仿真来规划未来^[15]。从MBSE和数字主线的定义可以看出两者内在的一致性。20多年前,并行工程和产品数据管理(product data management, PDM)实施的目标就是将正确的信息在正确的时间和地点传给正确的人。这一目标随着当下MBSE和数字主线等新范式、新手段的出现,其内涵也与时俱进,不断丰富,但初心不改。数字主线概念的提出,将各领域专业工程重新纳入了系统工程的框架下,MBSE和产品生存周期保障标准(PLCS)成为数字主线的关键使能技术。

美国国家标准技术研究所(NIST)从信息转换和传递的角度,将增材制造过程归纳为零件设计、工艺规划、制成零件、完成后处理的零件、确认后的零件等活动,涉及的产品、材料、工艺、设备、检测等信息的产生、转换和传递,其数字主线信息生成地图如图12所示^[16]。NIST在零件级增材设计所做的工作为整体解决方案将数字主线和MBSE扩展到组件级和系统级、乃至工艺融合的应用打下了基础。进而基于PLCS标准可实现分布式异地供应链协同和增材减材等工艺融合的云制造模式(图13)。

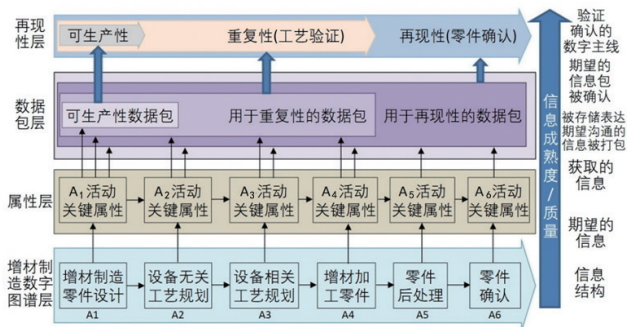


图12 增材制造数字主线信息生成地图

MBSE在整体解决方案面向数字主线和数据协同以及工艺融合云制造模式这两个模块的应用,可以认为是MBSE建模方法学在图8认知维上的应用。而MBSE在材料领域跨尺度的应用(图14)^[17],可以认为是MBSE建模方法学在图8系统维上的应用。

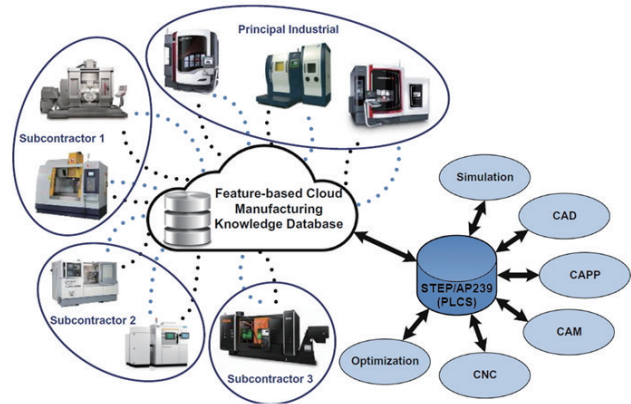


图13 基于PLCS标准数据模型协同的增材减材等工艺融合的云制造模式示例

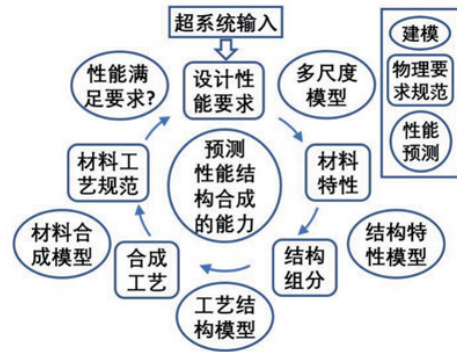


图14 材料设计流程

MBSE在精益研发三维系统工程模型框架下的正向设计三维空间(图8)3个维度的应用次序反映了整体解决方案的能力成熟度提升过程,即整体解决方案的能力成熟度框架(图15)同时也是MBSE在其中的实施框架。正向设计能力在这个框架中,从没按系统工程过程的低水平“正向”设计,到MBSE过程模型方法指导的产品正向设计,再到MBSE过程模型方法指导的产品和工艺正向设计,最后到实现了(产品、材料、工艺)设

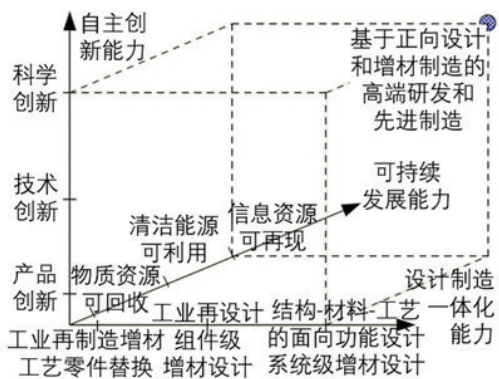


图15 整体解决方案能力成熟度等级框架

计制造一体化的、整个产品系统全生存期的正向设计,最终完成由低端走向高端的正向设计能力成熟度提升全过程。

4 结论

系统工程和MBSE是中国学术界和工业界重建正向研制的理论和实践,进而全面提升人工物理系统的设计制造一体化能力和企业自主创新能力的纲领性的关键使能技术。将系统工程和MBSE的实施纳入基于正向设计和增材制造的高端研发与先进制造整体解决方案及其能力成熟度提升框架,既丰富和夯实了整体解决方案的内涵和框架,也从重建正向研制理论和实践的视角,以及这一中国制造业转型升级中最具基础性意义的应用场景出发,为系统工程和MBSE在中国的推广应用提供了新的舞台。

参考文献(References)

- [1] 段海波. 当正向设计遇见增材制造[EB/OL]. (2018-02-08) [2018-10-01]. https://mp.weixin.qq.com/s/O4mn2MQesiZ29EK_ERZIXQ.
- [2] 段海波.“正向设计”新解[EB/OL]. (2016-10-15) [2018-10-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/7XPJKL8MfwhQuIP3svX9iQ>.
- [3] 段海波. 正向设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
- [4] 钱学森. 论系统工程[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988.
- [5] 钱学森. 科学的艺术与艺术的科学[M]. 北京: 人民文学出版社, 1994.
- [6] 苗东升. 系统科学精要[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1998.
- [7] 闵家胤. 进化的多元论: 系统哲学的新体系[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 1999.
- [8] 系统工程系统生存周期过程: GB/T 22032—2008[S]. 北京: 中国电子技术标准化研究所, 2008.
- [9] ISO/IEC JTC 1/SC 7. Systems and software engineering—system life cycle processes: ISO/IEC/IEEE 15288—2015[S]. Geneva: ISO, 2015.
- [10] INCOSE systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.
- [11] 段海波. 从霍尔模型这一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[EB/OL]. (2015-11-20) [2018-07-05]. <https://mp.weixin.qq.com/s/5hC1oDM4op6Ahf00W1ftqw>.
- [12] ASTM International. Standard guidelines for design for additive manufacturing: ASTM ISO/ASTM52910-17[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017: 1-14.
- [13] 段海波. 工业新概念——基于模型的系统工程[EB/OL]. (2017-08-18) [2018-07-01]. https://mp.weixin.qq.com/s/njc-MOaryjzAh_5DsYWqfTg.
- [14] Kumke M, Watschke H, Vietor T. A new methodological framework for design for additive manufacturing[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2016, 11(1): 3-19.
- [15] Marr B. What is digital twin technology and why is it so important[J]. Forbes, 2017, 6: 2017.
- [16] Kim D B, Witherell P, Lu Y, et al. Toward a digital thread and data package for metals-additive manufacturing[J]. Smart and Sustainable Manufacturing Systems, 2017, 1(1): 75.
- [17] Gray G I. Predictive capability for inverting information flow from performance to structure to processing: An evolving paradigm shift in MSE[J]. Journal of Materials, 2010, 62(3): 9-10.

Application of systems engineering and MBSE: A total solution to systematic forward design and additive manufacturing

DUAN Haibo

Pera Corporation Ltd., Beijing 100025, China

Abstract The technical and logical architectures of the total solution to systematic forward design and additive manufacturing are introduced. The framework and backbone roles of systems engineering in the total solution are analyzed. The implementation of MBSE in the total solution is elaborated from three perspectives: 1) logic dimension of systems engineering technical processes, 2) cognitive dimension of organization capacity development, and 3) system dimension of artifact system lifecycles. Furthermore, the MBSE implementation is integrated into the capacity maturity framework of the total solution—a new arena of MBSE implementation.

Keywords systems engineering; model-based systems engineering; systematic forward design; additive manufacturing ●



(编辑 徐丽娇)