

MBSE: 实现中国制造创新设计的使能技术探析

刘玉生

浙江大学CAD & CG国家重点实验室,杭州 310058

摘要 中国制造行业迫切需要创新设计技术,以实现中国“智”造。然而目前中国制造行业创新能力较弱。基于模型的系统工程(MBSE)由于其明显的优势正成为增强中国制造企业创新能力的重要使能技术。本文分析了MBSE的国内外研究现状,探讨了MBSE的建模方法、使能作用、实施挑战与方法,中国制造企业如何进行MBSE应用实施提出了建议。

关键词 基于模型的系统工程(MBSE);创新设计;使能技术;中国智造

制造业是国民经济的主体,是立国之本、兴国之器、强国之基。没有强大的制造业,就没有国家和民族的强盛。打造具有国际竞争力的制造业,是中国提升综合国力、保障国家安全、建设世界强国的必由之路。新中国成立尤其是改革开放以来,中国制造业持续快速发展,在许多行业已经是世界第一。然而,中国制造业大而不强,与国外先进水平相比,在自主创新能力、资源利用效率、产业结构水平、信息化程度、质量效益等方面差距明显。在此背景下,2015年3月5日,李克强总理在两会上作《政府工作报告》时首次提出“中国制造2025”的宏大计划。2015年3月25日,国务院审议通过了《中国制造2025》^[1],明确提出“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本”的基本方针,力争通过3个10年的努力,到新中国成立100年时,把中国建设成为引领世界制造业发展的制造强国。

然而,长期以来,中国在产品系统层面的创新能力远弱于底层构件的创新能力、整体产品的创新能力远弱于局部零部件的创新能力。其根本原因在于:针对涉及多领域的复杂系统,在最具创新性的概念设计阶段,缺乏对其进行系统层面的整体设计^[2-5]。其后果是:不同子系统间将产生功能交叠与冲突、甚至是不可预测的行为^[6]。更为严重的是:这类“先天缺陷”无法经过后续设计与加工弥补。因此,要实现中国由制造大国向制造强国、智造大国的转变,改变“高端失守、低端混战”的局面,迫切需要支持顶层、系统、整体创新设计

的理论、方法与工具。基于系统工程思想对多域复杂产品进行系统设计已成为增强中国自主创新能力的迫切需要。

随着异地分布式设计的出现和产品复杂性的增加,基于文件的系统设计方法已无法满足要求。基于模型的系统工程(model based systems engineering, MBSE)及其标准系统建模语言 SysML(system modeling language)正成为中国制造向中国智造创新设计的重要使能技术^[7-9]。它具有明显优势,如无二义性的语义刻画、早期仿真分析的支持等。本文对MBSE的国内外研究现状、建模方法、使能作用、实施挑战与方法等进行分析,并对MBSE的实施给出建议。

1 研究现状

1.1 MBSE 历史背景

MBSE的概念于1987年正式提出。1993年,亚利桑那大学A. Wayne Wymore教授发表了MBSE专著^[10],试图对系统设计的理论进行阐述,并在书的附录中给了一种MBSE建模语言,但并未取得成功。进入21世纪初,国际系统工程学会(INCOSE)借用软件工程应对“软件危机”的成功经验,于2006年重新审视与发展了“基于模型的系统工程(MBSE)”。并给出了MBSE如下的定义(INCOSE,《Systems engineering vision 2020》)^[11]:

MBSE是一种应用建模方法的正式方式,用于支持系统需求、设计、分析、检验与确认活动,这些活动从概念设计阶

收稿日期:2017-08-28;修回日期:2017-11-03

基金项目:国家重点技术项目(2016YFD0400301);国家自然科学基金项目(61772247)

作者简介:刘玉生,研究员,研究方向为CAD/CAE/CAM、模型驱动设计、模型检索与知识重用等,电子信箱:ysliu@cad.zju.edu.cn

引用格式:刘玉生. MBSE:实现中国制造创新设计的使能技术探析[J]. 科技导报, 2017, 35(22): 58-64; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.22.007

段开始,贯穿整个开发过程及后续的生命周期阶段。MBSE是系统工程领域发展的一种基于模型表达和驱动的方法,它可以看成是模型驱动原则、方法、工具、语言的指导规范,是对学科交叉和规模化的复杂系统的实施。

同时,为支持 MBSE,在统一建模语言(unified modeling language, UML)的基础上提出了标准系统建模语言 SysML。支持对复杂系统的需求、行为、参数与结构等进行基于图(diagram)的无二义性说明、分析、设计等。旨在从一开始,在产品的相关人员间建立统一的交流平台。为此, SysML 定义和提供了 9 种类型的图(图 1)^[8]。

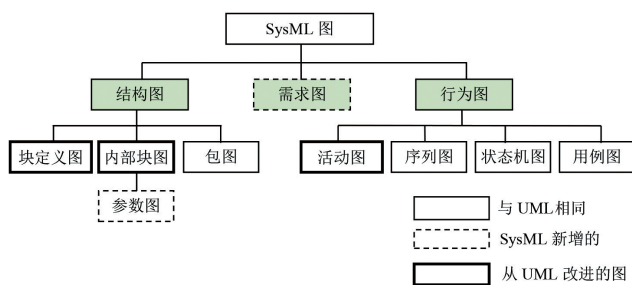


图 1 SysML 包含的图

1.2 研究现状

目前,国外对 MBSE 的研究与应用进行了积极深入的探索^[12-14],国内近几年也对 MBSE 表现出了浓厚的兴趣,尤其是航天航空等大型企业^[15-18]。国际上对 MBSE 发展进行整体规划的机构主要是国际系统工程学会(INCOSE)。它于 2008 年在“系统工程 2020 愿景”中提出了 MBSE 的发展路线图。其中,提出 MBSE 的成熟程度可分为 3 个层次:

- 1) 文档为中心、MBSE 是特别的方式。
- 2) 明确定义的 MBSE。
- 3) MBSE 在学术界、工业界成为制度化的方法。

按照时间进度,目前已经经过“MBSE 标准不断涌现”“成熟的 MBSE 方法与度量指标、集成的软/硬件模型”“架构模型与仿真、分析、可视化模型集成起来”等阶段。从研究发表的工作看,上述各个部分均有涉及,架构模型与仿真分析集成的标准也已出现。目前,正朝“经过明确的 MBSE 理论、本体论和形式体系”、“分布式的、安全的、横跨多个领域的模型库”迈进。国外应用和实践 MBSE 的单位主要是: NASA、美国国防部、欧空局等政府组织和相关承包商。如 NASA 的喷气推进实验室(JPL)在研究和应用 MBSE 上行动十分积极,具有代表性。它制定了一个应用 MBSE 的发展战略,时间跨度为 2009—2016 年。它提出了称为“状态分析的”MBSE 的方法论,并在多个项目中应用。另外 MBSE 的应用离不开相应平台的支持,IBM 等公司在这方面进行了有益探索,在已有支持 UML 建模的基础上,推出了支持标准系统建模语言 SysML 的建模平台 Rhapsody, NoMagic 公司推出了相关的平台 Magic-

Draw、3SL 公司推出了 Cradle 等。

国内目前关于 MBSE 的研究与应用主要分为 3 块:

1) MBSE 的应用。近几年来受到了广泛的关注,中国航天科工集团、航天科技集团、中航工业等均纷纷接触 MBSE,并进行了软件平台方面的投资,购买了国内和国外的相关软件平台。

2) 基于 SysML、支持复杂产品系统的需求、分析、设计方面的研究与平台研发:如标准 IEEE1220 所定义的^[20],系统建模主要分为需求分析、功能分析、架构设计和系统验证 4 个部分,而前 3 个部分正是自顶向下设计思想在系统创新设计中的运用。因此,对于实现自主创新设计至关重要。目前国内主要是浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室在研究,并推出了相关的平台 M-Design^[19]。

3) 基于 Modelica、支持复杂产品系统多领域统一仿真建模的研究与平台研发:如标准 IEEE1220 所定义的,系统验证是系统建模过程中的最后一环,也是确保设计正确的关键一环。目前国内主要是华中科技大学在研究,并推出了相关的平台 MWorks^[20]。

总体上,目前国内这方面还比较弱,还缺乏对 MBSE 的理解与认识、缺乏系统的组织与引领、缺乏研究机构与应用单位的良好交流与互动。从而造成“应用单位感觉 MBSE 比较难”“研究单位找不到应用推广的痛点”的局面。

2 MBSE 建模方法与使能作用分析

2.1 MBSE 建模方法

航天、航空、武器系统等都是典型的系统之系统,从系统工程到复杂系统工程,再到复杂组织体系统工程,系统及与外部环境的交联趋于复杂。MBSE 就是要回答解决复杂系统工程的问题。工业互联网、直接数字制造(DDM)和 MBSE 被誉为是未来制造业的 3 大典型特征。

MBSE 建模方法是用于支持在“基于模型的”或“模型驱动的”背景环境中系统工程学科诸多相关流程、方法和工具的集合。通过标准系统建模语言构建需求模型、功能模型、架构模型,实现需求、功能到架构的分解和分配,通过模型执行实现系统需求和功能逻辑的“校验”和“确认”,并驱动仿真、设计、测试、综合、校验和确认环节。MBSE 传递的模型,包括需求、结构、行为和参数在内的动态信息。模型使整个组织中各类专业工程和技术领域人员更加直观的理解和表达系统,确保全程传递和使用的是基于同一模型。

为实现上述目的,目前提出的 MBSE 方法很多,几乎均是以如图 2 所示的经典系统建模方法 V 模型为基础展开的。在 V 模型方法的基础上,有许多研究人员进行了较大的扩展与延伸。大体上,可将现有的复杂产品系统设计建模方法分为 4 种:通用的系统建模方法、并行建模方法、基于对象-过程的建模方法和基于状态分析的建模方法等。具体介绍可参见文献[21]。

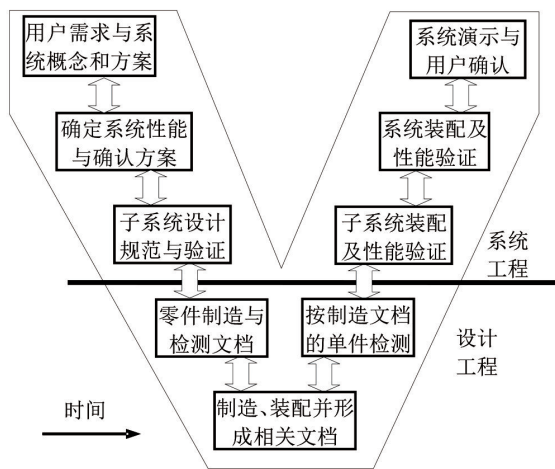


图2 系统工程的V模型

2.2 MBSE对中国制造的使能作用

飞机、航天器、武器系统等高端制造行业代表着一个国家的经济、军事和科技水平,是一个国家综合国力、国防实力的重要标志。如前所述,中国制造业还是大而不强,如何提升中国制造业的创新研发体系、加快其创新能力与进度是一大挑战。MBSE正是这样一项能快速提升中国制造创新能力、优化制造研制流程、促使中国制造向中国智造升级转换的使能技术。其具体的使能作用体现如下:

1) 支持设计方法的创新。据统计,80%以上的创新是产品概念形成阶段完成。而这一阶段目前是最为薄弱的环节,几乎全部是由系统设计师手工通过文档的归类、整理、查找、思考、决策而完成。核心问题就是由于缺乏针对不同专业学科与不同专业工程的统一模型,无法借助计算机的推理、评价、决策能力。通过MBSE建立的统一系统模型,不同学科的专业知识可以统一表达,从而可以支持计算机高效检索、推理与决策,创新设计能力与空间将能得到质的提升。

2) 支持研发流程的优化再造。传统的研发不仅是要遵循预研论证、再方案、试制与测试这一过程,而且即使是针对单纯的设计,也一般是先物理系统部分的设计,然后再控制系统的设计。MBSE的使用,将从一开始即对所有数据信息进行形式化的正式表达,且能将不同专业学科、不同阶段的参数进行有机关联。因此,不仅能实现物理部分与控制部分的并行设计,同时也支持在预研和方案论证阶段的仿真验证,在设计早期阶段就可排除不合理的方案,实现对整个研发流程的优化再造。

3) 支持系统全生命周期的管理。目前产品全生命周期管理(PLM)的宽度和长度均远不够。宽度上,目前只管产品本身。事实上,任何一个产品均不是孤立的个体,是与环境密切相关的一个系统。因此,要能对相关的数据信息进行管理。长度上,目前主要是对产品详细设计、工艺、制造等后期信息进行管理,而对前期的需求、功能、方案等数据很少涉

及。而MBSE正好弥补这方面的不足,形成对系统全生命周期(system life management, SLM)的管理。

需要注意的是:企业在应用MBSE会发生了很多方面的改变,会带来一系列积极的影响,同时也需要有一定的代价。积极的作用主要包括:提高了整个工程系统中所有要素的交互性、增加了对于系统复杂性的管理、改善了整体设计质量和增加了对于设计知识的重用性等。同时,需要付出的代价主要包括:产生和维护模型的代价、需要对相关人员进行一定时间的培训代价和企业整体基础设施和架构升级的代价等。

3 中国制造实施MBSE

3.1 实施MBSE的挑战

MBSE的实施是一项浩大的工程,并不容易,尤其是针对中国企业,信息化的水平与层次参差不齐,因此,实施MBSE存在诸多挑战。

1) 形式化的统一模型表示。MBSE方法要求从需求开始即对设计的表示使用统一和规范的模型,这需要项目参与者熟悉相关的标准建模语言SysML和建模工具的使用。并要求设计人员拥有将设计知识从传统Word、Excel等工具的文字表达,抽象为模型表达的能力,尤其是要针对设计的非功能需求进行建模表示。或者要求相关的建模工具具有从Word、Excel等文档转化为形式化模型统一表示的功能。

2) 不同学科领域异构知识的统一理解。MBSE在具体应用实施时,涉及机械、电子、液压、软件、控制等众多学科领域,不同学科领域的概念、术语并不相同,即使针对同一个对象,不同学科领域也可能使用不同术语。但在MBSE具体实施时不能因为所属专业领域的不同而产生信息和数据传递的误差。因此需要充分对不同领域的概念、术语的异构表示进行统一理解,防止模型转换过程中的信息缺失。

3) 设计资源与流程的重新规划。MBSE是对企业进行全新的信息化工业化,要求企业重新梳理所有的资源,为复杂产品的研制提供一个独特的模型驱动的系统工程工作环境。例如,由SysML等建模语言建造的系统模型是静态的,无法进行直接的仿真和验证。因此企业需要从自身面向的领域出发,建立设计模型到特定分析检验工具的模型转换和信息传递,实现设计和仿真检验的同步进行。此外,考虑到国内企业的应用,需要考虑设计工具的国产化、开发人员习惯和开发周期短等问题。

4) 研发与实施费用。MBSE的实施需要有软硬件的支持,需要对人员进行培训等,因此,费用会比较高,对一般企业来讲,这也将是一个挑战。

3.2 中国制造实施MBSE方法

考虑到上述MBSE实施存在的诸多挑战,为减少企业MBSE实施的风险,结合多年研究与分析,MBSE的实施应该自顶向下,不可能一蹴而就,应采取分步实施的方法。具体

地,可以分3步进行:

1) 针对如前 IEEE1220 标准所述的系统工程的4个步骤即需求分析、系统功能分析、系统架构设计和系统验证^[21],我们认为在 MBSE 实施的第一步应该主要针对前3个步骤展开。即主要工作是:(1) 通过 MBSE 应用实施团队和企业研发人员的对接与沟通,实现对领域设计知识的 SysML 封装;(2) 建立好需求模型、功能模型与架构模型;(3) 建立好这三者之间的关联关系。

2) 实施如前 IEEE1220 标准所述的系统工程的第4个步骤即系统验证。具体方法可以是在系统架构设计完成即得到系统架构模型后,通过模型映射的方法,由系统架构模型自动生成多领域统一的系统仿真模型,实现基于仿真的系统验证。

3) 实施系统设计与产品设计过程中其他部分的集成,如系统设计与各专业领域详细设计的集成、系统设计与多学科多目标优化的集成。

以下分别详细讨论上述各步骤。

3.2.1 需求模型、功能模型与架构模型及其关联的实施

1) 多视图需求模型

需求模型是整个产品设计的开始,不同的利益相关方如最终用户、系统设计师对需求的表达有不同的要求,因此,需求应该有多个视图,需要从不同视角进行查看。根据需要,需求模型的实施可分为以下3个层次展开:

(1) 条目化、表格式需求表达:将自然语言、文档式的用户需求转化为条目化、表格式的需求。这是需求模型建模的最基本要求,也是面向最终用户的需要和管理的需要。具体地,要能针对不同层次的对象如工程总体、各舱段、分系统、单机等的技术要求而展开需求的条目化工作。

(2) 任务功能指标体系的建立:通过对航天器运行事件的深入,对整个产品所需要的功能从逻辑上进行划分,建立一个系统的、完整的任务功能指标体系。

(3) 需求模型与功能模型的映射:在需求模型与功能模型间建立双向关联,以支持需求的变更在功能模型上能很快地反映;反向地,功能模型参数的调整也能反馈至需求模型上功能参数或性能参数的调整。

2) 功能模型

功能模型是基于对需求的分析与理解,建立起来的能运

行、可仿真以初步验证系统方案设计的仿真行为模型。可分以下3个层次展开:

(1) 混合集成式的全数字功能模型:针对功能仿真的需要,结合不同建模语言与工具的优势,建立全数字化、多学科的联合仿真行为模型。

(2) 硬件在环(HiL)的半实物仿真行为模型:在制作一定数量实物样机的前提下,建立全数字化功能驱动的半物理仿真与测试,基于此,完善修改数字化模型。

(3) 相关基础研究:主要是用来支持上述的全数字功能建模与仿真以及半实物的仿真两部分。具体可能包括:机电热控等专业基础库的建模与校验;分布式仿真与并行仿真;功能故障模型与仿真、仿真数据管理等。

3) 架构模型

架构模型是在功能模型的基础上,建立的整个系统框架性模型,包含了系统在粗层次上对整个系统结构的逻辑划分、以及各个部分间接口。当然根据需要,也可以进一步地细化。具体包括:

(1) 系统架构组成模型。体现出系统由哪些构件、子系统组成。

(2) 内部接口关联模型。体现出子系统与构件间的接口与流信息。这里应该可以考虑航天系统的一些特别的因素,如 IDS 或广义 IDS。

(3) 外部关联模型。与功能模型及需求模型的双向关联;与其他模型如系统仿真模型、优化模型、详细设计模型等的关联。

3.2.2 系统验证的实施

基于 SysML 建立的系统设计模型可能非常复杂,很难基于静态的模型验证其正确性。仿真是自动验证模型正确性的一种常用手段,而多领域统一仿真建模语言 Modelica 的提出为复杂机电系统的仿真验证提供了强有力的支持。且 SysML 与 Modelica 语言均为面向对象语言,因此,存在着极大的相通之处。为此,已有学者研究提出将多领域统一建模设计语言 SysML 与多领域统一仿真建模语言 Modelica 相集成的方法,以支持 SysML 模型的自动仿真。

具体地,可以基于模型转换的语言集成思路实现,其思想如图3所示。要实现模型转换,核心内容是定义源元模型和目标元模型以及它们之间的转换关系。之后,源模型便可

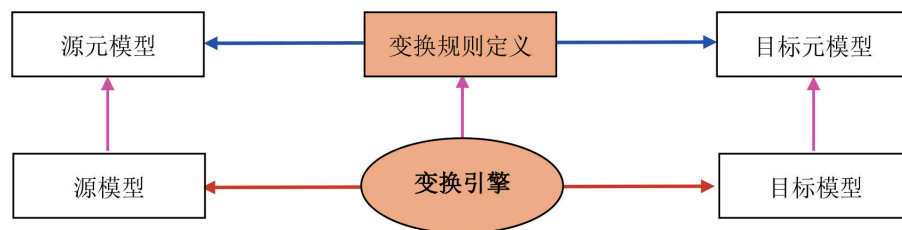


图3 模型转换基因思想

以通过转换引擎转换到目标模型。转换后,即可基于支持 Modelica 的平台如 Dymola、MapleSim 等进行多领域统一仿真,及早发现系统设计的不足。

具体的模型转换平台如图4所示。目前佐治亚理工、浙江大学均在这方面进行了比较深入的工作,且已有相关的工具平台可使用^[23-24]。

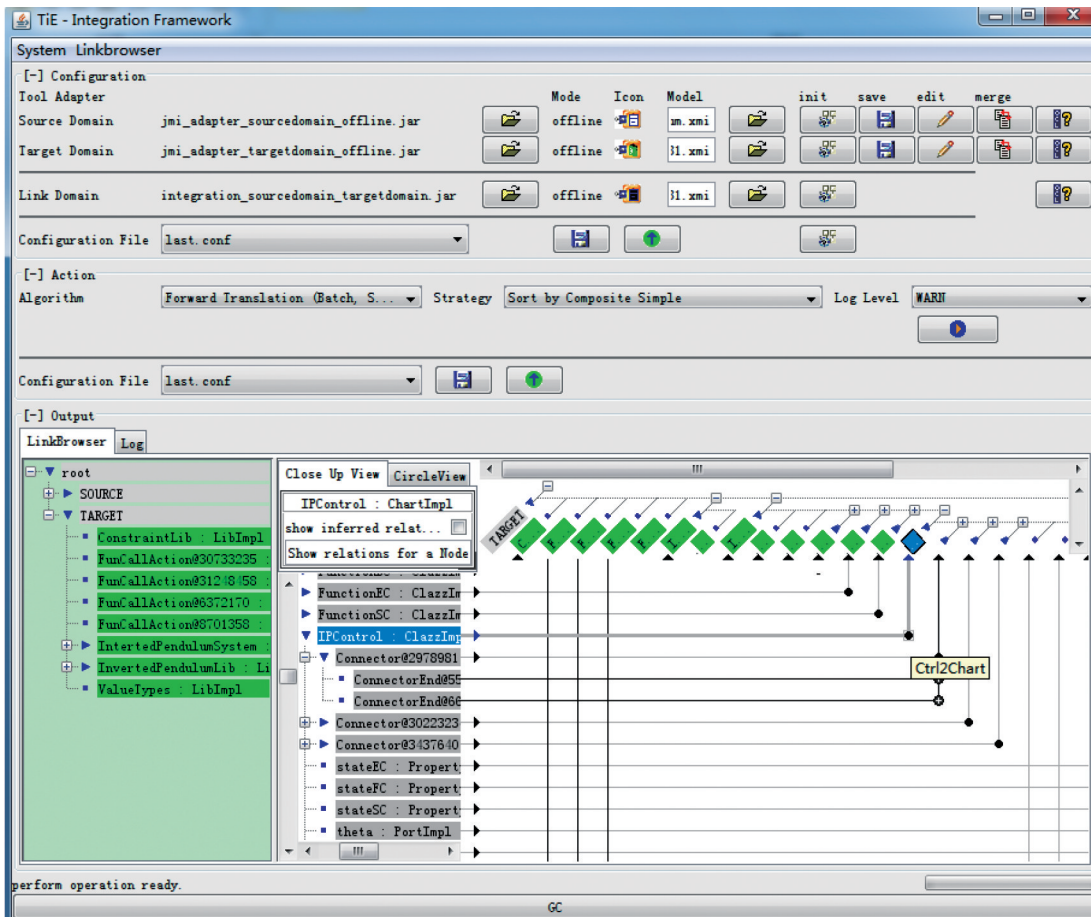


图4 具体的模型转换平台

3.2.3 系统设计与产品设计过程中其他部分集成的实施

系统设计作为航天器等复杂产品设计的起始阶段,不仅需要与系统仿真进行集成,还需要与后续的详细设计、多专业的系统优化、成本分析、可靠性分析等进行集成。使得航天器的系统设计结果不仅能达到最优,同时还能后续的详细设计提供具体的指导。考虑到 SysML 强大的可扩展能力,通过在 SysML 中定义相关的信息,可以实现上述的集成。浙江大学已经在系统设计与详细设计集成、系统设计与系统优化集成等方面进行了比较深入的工作^[25-27]。

4 开展 MBSE 研究工作的建议

开展中国制造行业的 MBSE 研究与建设工作,本身就是一项复杂的系统工程。因此对制造企业开展 MBSE 研究时一定要先用系统的、全局的观点来进行分析与设计,然后在对其进行综合、长远考虑的基础上,谨慎、坚实地迈出第一步。具体建议如下:

1) 建模语言、平台与合作团队方面。目前声称能支持

MBSE 的语言很多,但被国际系统工程学会定为标准的系统建模语言却只有 SysML。客观地讲, SysML 在有很多如前所述的优点的同时,也还是存在一些缺点,如不支持直接仿真、不支持连续行为的建模等。但它的优点更具优势:(1) 能支持自顶向下的需求、分析、设计(结构、行为)、参数约束等的建模;(2) 具有极强的扩展能力,且扩展后无需所支持的平台做任何修改。有了这些优点后,上述的缺点都不是问题了。通过相应的语言扩展,可以十分方便地具备连续行为的建模能力、可以无缝与仿真平台实现集成即将装备产品系统设计的建模内容自动地转化多领域统一仿真所需的模型、可以建立多学科多专业的领域知识。

此外,虽然国外有几个 MBSE 平台,但如前所述,均存在自身缺陷,并不能完全满足国内制造业自顶向下创新设计的需要,且所需服务也不一定能跟上。与传统的 CAD 系统不同,复杂产品的多领域统一系统设计过程中涉及的内容更多。因而相比传统的 CAD 系统, MBSE 的应用实施更是一个服务的过程,需要有一个长期合作的团队,共同建立适合本

公司MBSE的相关知识库、研制流程与规范、研制方法等。

2) MBSE近期与长期的建模目标与具体内容方面。如前所述,企业建立MBSE本身就是一个复杂的系统工程,不仅要有近期的建设目标,还要有远期愿景,制定详细的阶段性实施的具体内容。这里先不讨论远期愿景的内容,针对MBSE近期目标的具体建模内容,首先要分析SysML中9大图的作用,并根据公司自身的需要,分别确定在公司实施MBSE过程中各图的应用。根据多年的实践,建议如图5所示。

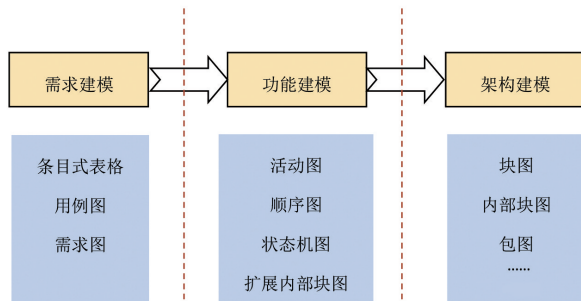


图5 SysML中各图中航天器系统建模中的应用

3) 行业高层设计知识的总结与封装方面。任何一个行业都会有其行业知识(俗称行话、术语),这些知识的层次也有高有低。在MBSE实施之时,应该针对高层的行业设计知识进行总结与封装,从而避免“企业人员讲企业的术语、而MBSE实施人员则老讲SysML或Modelica”的问题,应该先用SysML表达好行业的高层设计知识,让行业设计人员仍然能用自己的语言表达其设计思想。本质上, SysML并不难,而行业人员却觉得太抽象,核心问题就是因为工作割裂,没有进行知识的封装。

4) 实施应用的起始点方面。虽然设计需求的来源可能不一,但一般的设计均是从需求开始,需求的管理、编辑是设计的基础。同时要注意需求的形式也要满足设计人员的习惯,并利用计算机处理的优势,给设计人员提供一些便利。如:能方便地从Word中导入需求,因为一般人还是喜欢文档这种编辑工具;如设计人员还是喜欢表格式或文档式的需求方式,而不一定喜欢SysML提供的图表式需求。

5) 系统设计人员真实需要方面。系统设计并不涉及太多的设计细节,主要是用于复杂产品系统前期的方案设计与论证等。而查看的主要对象是系统设计的总工或领导。因此,应该关注系统的结果输出,如要能自动生成系统设计文档,同时把系统设计的主要结果,如:总体组成图、构件连接图、关键参数约束图等插入。值得指出的是:整个平台最好要完美支持汉化。目前国外平台在这部分均比较弱,相比较而言,Rhapsody比MagicDraw更弱一点。

6) 设计自动性方面。要针对任何复杂产品做到系统设计的全自动,是十分困难的。但针对若干系列的复杂产品如航天器,尤其是功能不断改进与增强的产品,通过模板的建立,完成设计的自动性是可能的。设计自动性的重要意义还

在于能给设计人员提供大量的可选方案,并固化大量的设计知识。

7) 信息集成方面。与系统设计相关的部分还有很多,如系统仿真、系统优化、详细设计等,因此在实施MBSE,一定考虑这些信息的集成,不能又形成一系列的“信息孤岛”。

5 结论

由于MBSE从需求开始就以模型表示,因而通过模型的形式化定义可以清晰地刻画产品设计初期在结构、功能与行为等各个方面的需求,以及及早模拟分析发现大量不合理的设计方案,同时模型还为各利益相关方提供了一个公共通用的、无二义性的设计信息交流工具。因此,MBSE受到学术界和工业界的空前重视,目前发展很快,已成为制造业创新、进而提升为“智造”的重要使能技术。中国在制定《中国制造2025》中明确提出创新驱动的基本原则,MBSE与之密切相关,将成为其实现的利器。目前国内学术界和工业界已进行了积极的探索,未来将进一步在MBSE的理论、方法、工具等方面取得突破。

参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国国务院. 中国制造2025[EB/OL]. (2017-07-11). <http://baike.sogou.com>.
- [2] 钟掘等. 复杂机电系统耦合设计理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] Michelle B, David H. System design: New product development for mechatronics[M]. Boston: Aberdeen Group, 2008.
- [4] 杨涛, 杨育, 薛承梦, 等. 考虑客户需求偏好的产品创新设计方案多属性决策评价[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(2): 417-426.
- [5] 刘晓敏, 檀润华, 姚立纲, 等. 模糊前端阶段产品创新设计过程实现研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(8): 1457-1462.
- [6] Fan H R, Liu Y S. Efficient recognition of the undesired coupling effects for system design of multidisciplinary products[J]. Journal of Engineering Design, 2016, 27(10): 665-696.
- [7] Fisher J. Model-based systems engineering: A new paradigm[J]. IncoSE Insight, 1998, 1(3): 3-16.
- [8] <http://www.omg.sysml.org/#Specification>.
- [9] 刘玉生, 袁文强, 樊红日, 等. 基于SysML的模型驱动复杂产品设计的信息集成框架研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(12): 1438-1445.
- [10] Wayne W A. Model-based systems engineering[M]. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- [11] IncoSE. Systems engineering vision 2020[EB/OL]. (2017-11-09). www.incoSE.org.
- [12] Westermann T, Anacker H, Dumitrescu R. Interdisciplinary system architecture for intelligent technical systems[C]. ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Houston: ASME, 2015.
- [13] Cloutier R, Sauser B, Bone M, et al. Transitioning systems thinking to model-based systems engineering: Systemigrams to SysML models[J]. IEEE Trans Systems, Man Cybernetics, 2015, 45(4): 662-674.
- [14] Holt J, Perry S, Payne R, et al. A model-based approach for requirements engineering for systems of systems[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(1): 252-262.

- [15] 徐京. 基于SysML的控制系统设计建模及初始详细设计模型的自动生成[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [16] 尹树悦, 杨云, 苗学问, 等. 基于SysML的反推力系统安全性分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(3): 498-504.
- [17] 严亚伟, 周雁舟. 基于概率模型检测的SysML活动图验证方法[J]. 计算机工程与设计, 2016, 4: 928-932.
- [18] 张昕, 曹云峰, 庄丽奎, 等. 基于SysML的飞控系统模型重用技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 4: 567-571.
- [19] 刘玉生, 樊红日, 蒋浴芹, 等. M-Design: 多域复杂机电产品系统建模平台[J]. 软件学报, 2012, 23(Suppl.2): 8-20.
- [20] <http://www.tongyuan.cc>.
- [21] 刘玉生, 蒋玉芹, 高曙明. 模型驱动的复杂产品系统设计建模综述[J]. 中国机械工程, 2010, 21(6): 741-749.
- [22] <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1220-1998.html>.
- [23] Cao Y, Liu Y S, Fan H R, et al. SysML-based uniform behavior modeling and automated mapping of design and simulation model for complex mechatronics[J]. Computer-Aided Design, 2013, 45(3): 764-776.
- [24] Paredis C J J, Johnson T A. Using OMG's SysML to support simulation [C]. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, Global Gateway to Discovery. Miami, December 7-10, 2008.
- [25] Fan H R, Liu Y S, Liu D H, et al. Automated generation of the computer-aided design model from the system structure for mechanical systems based on systems modeling language[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230(5): 883-908.
- [26] Yuan W Q, Liu Y S, Wang H W, et al. A geometric structure based particle swarm optimization algorithm for multi-objective problems[J]. IEEE Trans System, Man and Cyber (Part B). <https://core.ac.uk/download/pdf/44340405.pdf>.
- [27] Yuan W Q, Liu Y S, Zhao J J, et al. Pattern-based integration of system optimization in mechatronic system design[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 98: 23-27.

MBSE: The enabling technology for the innovative design of intelligent manufacturing in China

LIU Yusheng

State Key Lab of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract The creative design technology is urgently needed for realizing intelligent manufacturing on China. However, the Chinese manufacturing industry suffers from a weak creative capability. The model-based system engineering (MBSE) becomes an important enabling technology to enhance the innovation capability of the high-level manufacturing in China because of its obvious advantages. Based on the analysis of the state-of-art of the MBSE, the modeling method, the enabling effects, the challenges and the implementation methods of the MBSE are analyzed. Some suggestions are made for the MBSE implementation in Chinese high-level manufacturing enterprises.

Keywords model based systems engineering (MBSE); creative design; enabling technology; intelligent manufacturing

(责任编辑 祝叶华)