

从基于模型的定义（MBD）到基于模型的企业（MBE）

——模型驱动的架构：面向智能制造的新起点

航空工业信息技术中心（金航数码） 高星海

当前，驱动制造业创新和持续发展的动因正在注入新的要素并由此引发其架构的巨大变化，从美国的再工业化到德国的工业 4.0 再到中国制造 2025，从中我们可以发现，制造业是全球经济稳定发展的重要驱动力，世界各国都意在占领未来制造业的制高点。

美国提出以“软”的服务为主，注重软件、网络、大数据等对工业领域服务方式的颠覆；德国通过价值网络实现横向集成、跨越整个价值链的工程端到端数字化集成、垂直集成和网络化的制造系统，来保证德国在传统制造领域的领先地位；中国提出以信息化和工业化深度融合为主线，在智能制造、互联网+的突破等方面来增强国家工业竞争力，带动产业数字化水平和智能化水平的提高。

在这个全球大背景下，智能制造体现着从传统制造向数字制造转型的创新方向——在保持灵活性的同时，兼顾提升生产效率、缩短上市时间、提高产品质量，其中最重要的是实现从企业管理、产品研发到制造控制的高度互联，其次是在整个价值链中集成 IT 系统的应用，第三是涵盖设计、生产、物流、市场和销售的生命周期的自动化控制和管理。

全球制造业数字化发展趋势

新一轮工业革命为企业带来新应用，数字化技术贯穿

于产品设计、生产规划、生产工程、生产执行、客户服务等的各个环节，以实现虚拟数字世界与现实生产世界的准确映射（图 1）。这个演进过程离不开物联网技术、云计算、大数据、工业互联网等新一代数字技术支持，离不开集成先进的数字工程环境、生产管理系统和现场自动化技术，并以此为平台达到数字技术在企业中的深刻应用，以最小的资源消耗获得最高的生产效率。



图 1 新一轮工业革命的特征

从全球视野看，数字制造技术的理念正在发生重大变化。美国国家技术和标准研究院（NIST）提出从 MBD（基于模型的定义）到 MBE（基于模型的企业）的跃升，其要义是，

模型驱动贯穿系统生命周期的各个方面和领域，一次创建并为制造、服务等所有下游重用。国内制造业中，航空工业在MBD方面起步较早，当时基于模型的定义主要解决设计和制造的协同，最典型的应用是主机厂所在飞机设计阶段就采用全数字量表达飞机的几何特征，同时将数字样机传递到制造单位，在数字样机之上开展工艺设计、工艺仿真以及部分环节自动加工指令的生成。现在的MBE是把传统的模型向前端应用到需求开发、功能和逻辑设计，向后端应用到更广泛的智能制造以及综合保障等各个环节。

从MBD到MBE，数字化设计和制造技术的创新应用成为制造业发展的新趋势。MBD更关注产品的几何信息，包括工艺描述信息、制造属性信息、管理属性信息，把三维模型作为生产制造的唯一依据。未来MBE更关注MBD数据在整个生命周期的充分利用，并从几何层面上升到系统层面；另一方面在企业内部以及企业外部供应链之间建立集成和协同的环境，开展基于模型的交换，在数字空间进行反复迭代，以减少物理空间的质量问题和时间成本问题，目的是提高复杂大系统的设计质量、缩减交付时间、减少工程更改、减少产品缺陷和提高首次交付质量。

美国“下一代制造技术计划”（NGMTI）将MBE的发展历程分为四个阶段。第一阶段以2D工程图为中心，设计制造交换的是二维信息；第二阶段以3D模型为中心，开展三维实体建模，并验证整个结构的几何交互关系，包括运动学仿真、有限元仿真、基于模型的制造等；第三阶段是基于模型的定义（MBD），侧重于在三维模型中全方位地表达设计制造信息；第四个阶段是基于模型的企业（MBE），其3D主控模型不仅包含3D标注等几何信息，还包含更多的模型信息，未来要把三维模型应用到企业和供应链，基于广义的MBD进行信息交换。

MBE的内涵

MBE逐渐成为先进设计制造方法的具体体现，也代表数字化设计与制造的未来，是建模与仿真方法在设计、制造、支持等全流程技术和业务的彻底颠覆和创新，其中MBD是核心，基于模型的系统工程（MBSE）和基于模型的持续保障（MBS）是应用和实践的新方向。利用产品模型和过程模型定义、执行、控制、管理企业的全部业务，可实现业务之间的无缝集成，并与战略管理对接。

MBE主要包括基于模型的工程（Model Based Engineering, MBe）、基于模型的制造（Model Based Manufacturing, MBM）和基于模型的持续保障（Model Based Sustainability, MBS）。MBe将模型技术作为系统生命周期中需求、分析、设计、实施和验证的能力，突破MBD单一的应用领域和范围，并将MBSE作为重要的完善和发展方向。MBM从CAD向后推演，使用MBD模型用于虚拟制造环境中进行工艺规划、优化和管理，它更强调的是基于模型的工艺仿真、生产线的仿真、指令的仿真以及指令传递到物理设备之后的控制和数据采集。MBS将产品和工艺开发中的模型和仿真应用到系统生命周期的维护阶段，持续关注系统的整个运行状态，把系统运行过程中的质量数据、维护/维修/故障数据采集回馈到模型，在模型中进行比较，评估产品实现和工艺方案，并反馈到产品设计的改进环节，通过MBS来提取设计优化信息。

MBE的演进方向与分级评价

美国国家技术和标准研究院按路径选择以及需要的能力将MBE分为Level 0—Level 6共计7个等级。其中，Level 3的主要功能应用为MBD，主要交付物为2D注释模型和轻量化可视化数据；Level 4的主要功能应用是MBD和数据管理，主要交付物为通过PLM管理3D注释模型和轻量化可视化数据；Level 5可在三维环境下定义、自动生成技术数据包（TDP），包括制造需要的和综合保障需要的信息；Level 6的主要功能应用是MBD生成TDP和基于需求的企业数据访问，主要交付物为通过WEB访问的数字化产品定义和技术数据包的交换机制。

该分级也可用来指导我们的未来发展路径。目前国内有些单位还是以二维图纸为中心；部分单位虽用到源CAD模型，但在使用过程中依然派生出二维图纸提供给使用；大部门航空企业可达到MBD和数据管理、通过PLM管理3D注释模型和轻量化可视化数据的状态。所以未来我们还有大量的工作要做。

MBE关键技术

1. MBe

基于上述认识，在基于模型的工程的“V”模型上可清晰地看到两层关系（图2）。第一层更多地强调MBe，

强调逻辑设计、功能设计、架构设计，该层中，建模与仿真支持开始于概念设计阶段的系统需求、设计、分析、验证和确认，更强调逻辑功能、系统动态行为以及各组件应承担的需求及其之间的交联关系。这就是现在在各单位开展的基于模型的系统工程、统一建模与联合仿真、架构设计等，目前有些单位已开展面向“系统之系统”的运行场景仿真。第二层更强调 MBD，该层在前端的需求工程、架构设计之后，更多关注的是在机械领域如何开展基于模型的工程，如何承接前端的需求开展流体、机械、电子、电磁、软件、控制、液压等子系统的设计，通过功能样机接口和功能样机单元的架构来传递前端的需求以及前端的设计架构，在三维数字模型中定义设计信息和制造信息，以保证产品定义数据的唯一性。

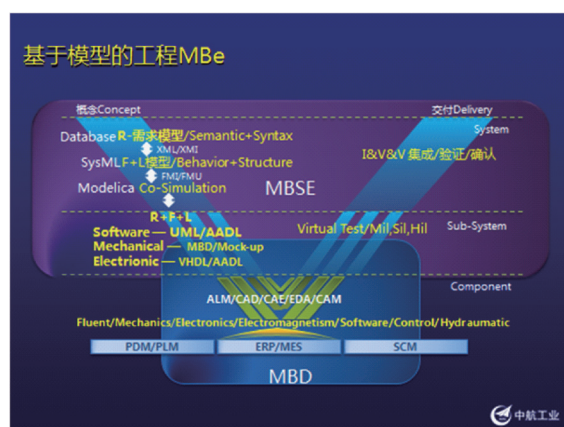


图 2 基于模型的工程

2. MBD

MBD 最核心的是在三维模型中完整地表达设计、制造信息，确定产品定义信息的唯一性，为传递到下游生产所需的详细信息提供最恰当的信息载体。所有业务均使用 3D 信息传递，形成结构化的数据集，该数据集不仅包含几何特征、尺寸、公差等，也包括隐含的制造信息，如剖切或特定的测量，能够自动生成加工指令等，同时，增加检验和质量信息，使设计和制造形成反馈闭环，这就是 MBD 发挥的巨大作用。

3. MBM

基于模型的制造（MBM）意味着要使用 MBD 模型在虚拟制造环境中进行工艺规划、优化和管理，并将指令提供到现场的实物生产。特别是在新设备出现的时候，如何形成工艺指令，过去更多的是依赖工艺员的经验，然后在 CAPP 中开展工艺设计，现在则可以通过数字化的工艺仿真技术验

证，提供虚拟制造和装配过程仿真，真正实现面向制造 / 装配的设计（DFx），形成各种生产加工指令为各个环节的设备提供驱动，为工人提供作业指导书，同时还可对生产线 / 车间进行仿真（这是基于模型的制造非常重要的领域）。

4. MBI

基于模型的作业指导书（MBI）是实现虚拟仿真与现场生产的核心纽带。数字空间和物理世界的迭代符合“数字孪生”的理念，数字空间的产品设计定义和物理世界的加工装配之间重要的联系就是 MBI，MBI 不仅有装配、加工的指令，还有包含检验的信息传递到制造现场，在制造现场开展数据的采集和人机交互，一方面获得各种指令，同时优化工艺过程，保证了数字和实物之间最重要的联系。

5. 基于模型的验证

通过建设统一建模与联合仿真、多专业工程仿真环境，开发相关的模型库和数据库，开展功能（性能）样机应用，可在设计环节超越各个专业，建立统一的仿真模型，考评系统或组件的动态行为，以及组件在不同阶段综合过程中，在已建立的虚拟集成仿真环境中，利用模型在环（MiL）、软件在环（SiL）、硬件在环（HiL）以及人在回路（PiL）来验证各级（子）系统开发能否满足功能、性能等要求，保证整体系统架构的合理性，并对系统关键性能进行评估，尽可能在系统的设计早期，验证需求的可实现性，避免设计反复。在推进基于模型的相关工作中会形成新的工作方式，如基于模型的仿真、试验、测试、验证与确认，并建立虚拟集成仿真环境（包含仿真生命周期管理），解决的是不同层面的模型交换和集成。

6. MBS

基于模型的持续保障（MBS）将模型作为系统记录和构型管理的唯一基础，将产品和工艺开发中的模型和仿真应用到生命周期的维护阶段，使用维护 / 维修 / 故障数据来评估产品和工艺，并将其反馈到产品设计的改进环节。其中最重要的工作是记录交付用户的产品过程规范、材料数据、产品支持信息以及测试分析信息等，形成跨越整个供应链的结构化、集成的工程技术数据包。

模型的特征引发开发范式跃升

随着系统复杂性及产品开发和制造过程复杂性的增加，需要建立复杂的产品研发集成环境来支撑复杂系统的开发，

在这个过程中主要聚焦基于模型的系统工程（MBSE）。

模型的作用主要有三个方面：一是真实表达系统架构、行为、运行或其他特征；二是传递产品设计信息，模拟真实世界的行为或制造过程；三是具体表达产品的定义、配置和功能等。这个过程中以往是以文件的形式进行传递，现在希望通过模型进行传递，模型不仅能满足人对系统的理解，同时因为模型带有大量的结构化数据可以让各类计算机来识别并参与，帮助进行产品仿真、生成加工 / 制造指令等，因此，模型是连接数字空间和物理空间最核心的所在。

模型的特征引发开发范式的跃升，当今软件工具也不断向这个方向发展，从 SoS、到系统、到子系统再到组件，从机械、电子到软件等各个领域都有各自的解决方案，在使用大量的软件工具（如流体、结构、电子、电磁、软件、控制、液压等等），例如波音公司在其工程 / 制造领域集成了各环节的软件工具（图 3），包含从需求定义、需求分析、架构设计、快速概念原型，到初步设计、详细设计，再到基于模型的制造与仿真，以及后端基于模型的运行保障。



图 3 波音公司的工程 / 制造领域 IT 价值链图

航空工业数字化设计、制造创新应用

近年来，航空工业信息技术中心（中航数码）在航空工业统一架构指导下，通过与国际主流 IT 供应商的战略合作，不断强化 PLM 技术中心的职能，凝聚内外资源，面向制造业数字化设计制造领域，积极开展先进技术探索、技术路线和方案验证等研究工作，以提升航空工业新一代信息技术创新应用的规划、预先研究、验证评估、技术服务的行为能力，为航空工业及成员单位提供 PLM 决策支持、研究验证、技术支持等服务，特别是为各单位提供项目实施的支撑、

异构平台间的数据交换，构建航空工业 PLM 领域资源和能力的协同新机制。

目前，信息技术中心已牵头举办大量的技术交流和验证研究工作，使各单位都能正确地把握数字化设计制造的发展脉络；形成工业知识的内生链路，通过统一技术支撑体系，促进工业知识积淀和创新机制的形成；同时，我们在重点厂所以及重点型号上已开展新型解决方案验证工作，包括基于 MBSE 的型号研制、基于模型的数字样机审查、统一建模与联合仿真、从设计到运营的精准价值流传递、基于 DMU 的一体化集成验证、统一的构型管控与更改、全球研制协同环境等方面的集成验证工作。

未来，我们还要进一步加强与国际各类先进工业方法提供方的合作，共同勾画基于模型的系统工程、基于模型的工程以及基于模型的企业蓝图。在该过程中希望通过流程的定义，方法、工具的选择，面向复杂系统的生命周期流程，有效解决工具和知识碎片化的问题，促进航空工业研制体系持续演进，构建以模型驱动、连续传递的先进工程环境，落实创新驱动发展战略，加速航空工业研发体系转型。IM