

智能制造的数字孪生模型

不论是建设新工厂还是对现有工厂进行现代化升级改造，数字化投资总会有所回报。对于计划周期较长的客户来说，数字化能够为其带来特殊效益，包括提高设备可用性和降低生命周期成本。这样，数字化能够为过程工业的所有企业带来决定性竞争优势。数字化孪生模型

（**Digital Twin**）的目标是实现制造业行业内设计制造方式创新、加工制造效率以及产品质量的提升。

数字孪生模型指的是以数字化方式在虚拟空间呈现物理对象，即以数字化方式为物理对象创建虚拟模型，模拟其在现实环境中的行为特征，它是一个应用于整个产品生命周期的数据、模型及分析工具的集成系统。对于制造企业来说，它能够整合生产中的制造流程，实现从基础材料、产品设计、工艺规划、生产计划、制造执行到使用维护的全过程数字化。通过集成设计和生产，它可帮助企业实现全流程可视化、规划细节、规避问题、闭合环路、优化整个系统。

1 概述

1.1 数字孪生模型的概念及定义

数字孪生模型是在美国国防部提出的信息镜像模型（Information Mirroring Model）的基础上发展而来的，利用数字孪生技术可对航空航天飞行器进行健康维护与保障。实现过程是：需要先在虚拟空间中构建真实飞行器各零部件的模型，并通过在真实飞行器上布置各类传感器，实现飞行器各类数据的采集，实现模型状态与真实状态完全同步，这样在飞行器每次飞行后，根据飞行器结构的现有情况和过往载荷，及时分析与评估飞行器是否需要维修，能否承受下次的任务载荷等。

信息镜像模型如图 1所示，它是数字孪生模型的概念模型，包括三个部分：

- 真实世界的物理产品。
- 虚拟世界的虚拟产品。
- 连接虚拟和真实空间的数据和信息。

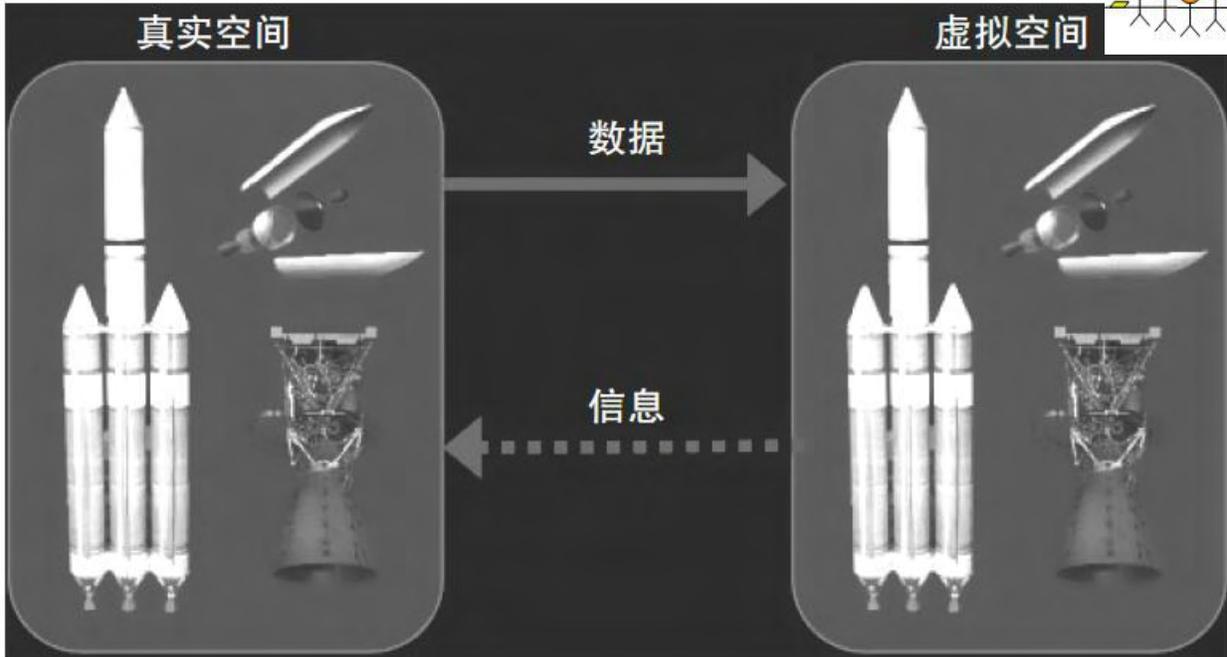


图 1 信息镜像模型

在该模型概念出现后的十来年，无论是物理产品还是虚拟产品，它们的信息在数量、丰富程度以及保真度上都得到了较大的增加。

在虚拟方面，有大量的可用信息，增加了大量的行为特征，从而不仅可以虚拟化、可视化产品，并且可以对其性能进行测试，同时也具有创建轻量化虚拟模型的能力，这意味着我们可以选择所需要的模型的几何形状、特征以及性能而去除不需要的细节。这大大减小了模型尺寸，从而加快了处理过程。这些轻量化模型使得今天的仿真产品可以虚拟化并实时地以合适的计算成本来仿真复杂系统以及系统的物理行为。这些轻量化模型同时也意味着与它们通信的时间和成本也大大地减少。更重要的是，我们可以仿真产品的制造环境，包括构成制造过程的大部分自

动和手动操作，这些操作包括装配、机器人焊接、成型、铣削等

在物理方面，现在可以收集更多关于物理产品特征的信息，可以从自动质量控制工位获取所有类型的物理测量数据，比如三坐标测量仪，也可以从对物理零部件实际操作的机器上收集数据，以便更加精确地理解各个操作流程，比如所使用的速度和力等。

数字孪生模型不是一种全新的技术，它具有现有的虚拟制造、数字样机等技术的特征，并以这些技术为基础发展而来。虚拟制造技术

（Virtual Manufacturing Technology, VMT）是以虚拟现实和仿真技术为基础的，对产品的设计、生产过程统一建模，在计算机上实现产品从设计、加工和装配、检验、使用及回收整个生命周期的模拟和仿真，从而无需进行样品制造，在产品的设计阶段就可模拟出产品及其性能和制造流程，以此来优化产品的设计质量和制造流程，优化生产管理和资源规划，达到产品开发周期和成本的最小化、产品设计质量的最优化和生产效率最高化，从而形成企业的市场竞争优势。如波音777，其整机设计、零部件测试、整机装配以及各种环境下的试飞均是在计算机上完成的，其开发周期从过去的8年缩短到5年；Chrysler公司与IBM合作在虚拟制造环境中进行新型车的研制，并在样车生产之前，就发现了其定位系统和其他许多设计有缺陷，从而缩短了研制周期。由此可见，虚拟制造的应用将会对未来制造业的发展产生深远的影响。

数字样机是指在计算机上表达的产品整机或子系统的数字化模型，

它与真实物理产品之间具有1：1的比例和精确尺寸表达，其作用
字样机验证物理样机的功能和性能。它可分为几何样机、功能样机和性能样机。数字样机对产品整机或具有独立功能的子系统进行数字化描述，这种描述不仅反映了产品对象的几何属性，至少在某一领域还反映了产品对象的功能和性能。产品的数字样机形成于产品设计阶段，可应用于产品的全生命周期，具体包括工程设计、制造、装配、检验、销售、使用、售后、回收等环节。数字样机在功能上可实现产品干涉检查、运动分析、性能模拟、加工制造模拟、培训宣传和维修规划等。

现有的数字样机建立的目的是描述产品设计者对这一产品的理想定义，用于指导产品的制造、功能性能/分析（理想状态下的），而真实产品在制造中由于加工、装配误差和使用、维护、修理等因素，并不能与数字样机保持完全一致。虚拟制造主要强调的是模拟仿真技术，因而将数字样机应用于虚拟制造中，然而在这些数字化模型上进行仿真分析，并不能反映真实产品系统的准确情况，其有效性受到了明显的限制。

虚拟产品和物理产品的信息数量和质量均在快速进步，但真实空间和虚拟空间的双向沟通却是落后的。目前通用的方式是先构建一个全标记的3D模型，随后创建一个制造流程来实现这个模型，具体是通过一个工艺清单（Bill of Process, BOP）以及制造物料清单（Manufacturing Bill of Materials, MBOM）来实现。更加复杂和先进的制造商将对生产

过程进行数字化仿真。但在，在这个阶段，只是简单地将BOP和传递给制造而不是虚拟模型。在目前大多数情形下，甚至淡化了模型的作用，仅仅只是使用模型生成制造现场的2D蓝图。

然而，数字孪生模型更加强调了物理世界和虚拟世界的连接作用，从而做到虚拟世界和真实世界的统一，实现生产和设计之间的闭环。如图3-2所示，可通过3D模型连接物理产品与虚拟产品，而不只是在屏幕上进行显示，3D模型中还包括从物理产品获得的实际尺寸，这些信息可以与虚拟产品重合并将不同点高亮，以便于人们观察、对比。

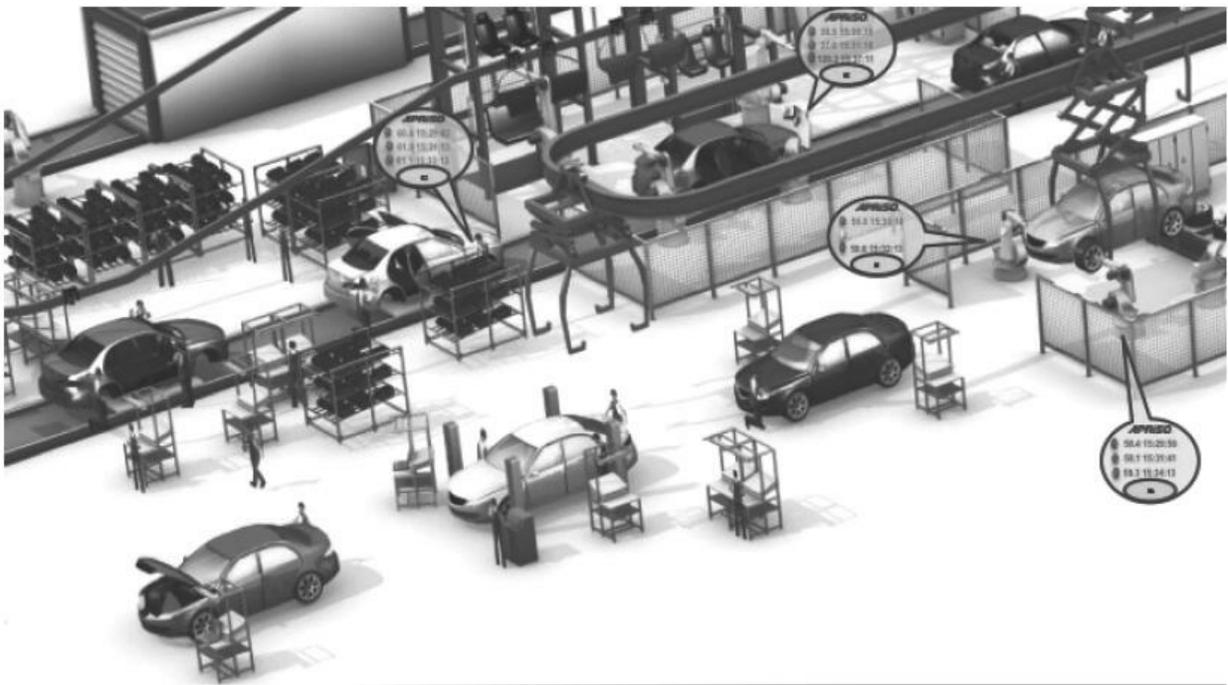


图 2 可进行虚拟产品与物理产品对比的3D模型

“工四100术语”对数字孪生模型的定义是：数字孪生模型是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据，集成多学科、多物理量、

多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成映射，从而反映的实体装备的全生命周期过程。数字孪生模型是一种超越现实的概念，可以被视为一个或多个重要的、彼此依赖的装备系统的数字映射系统。以飞行器为例，数字孪生模型可以包含机身、推进系统、能量存储系统、生命支持系统、航电系统以及热保护系统等。它将物理世界的参数重新反馈到数字世界，从而可以完成仿真验证和动态调整。数字孪生有时候也用来指对一个工厂的厂房及生产线，在其没有建造起来之前，就完成相应的数字化模型。从而在虚拟的赛博空间中对工厂进行仿真和模拟，并将真实参数传给实际的工厂建设，而在工房和生产线建成之后，在日常的运维中两者继续进行信息交互。因此，数字孪生模型更加强调模型在产品全生命周期使用过程中虚拟产品与物理产品之间的反馈、交互。

值得注意的是数字孪生与目前现有的一些技术又有一定的不同。首先，数字孪生不是构型管理的工具，构型管理是项目变更控制的一个重要工具，它涉及所有的技术和组织措施，包括构型项的确认、控制、记录和审计。数字孪生是一种分辨不同时点的系统配置的方法，它处理工作项或系统的物理特性、功能特征，并对这些特性和特征的任何变更实施控制，审计这些工作项和系统，证实其与需求相一致，以确保项目产品描述的正确和完整，它主要强调对产品制造流程的控制。其次，数字孪生模型不是产品的3D尺寸模型。仅针对数字孪生模型的3D表述来看，数字孪生模型不仅包含尺寸信息，还含有特性、功能等信息。同

时，数字孪生模型也不是产品的MBD定义。MBD是一种产品数字化定义的方法，它是指产品定义的各类信息按照模型的方式组织，其核心组成是产品的几何模型，所有相关的工艺描述信息、属性信息、管理信息等都附着在产品的三维模型中，一般情况下不再有二维工程图纸。

MBD改变了传统的由三维实体模型来描述几何信息，而用二维工程图纸来定义尺寸、公差和工艺信息的产品数字化定义方法。同时，MBD使三维数模作为生产制造过程中的唯一数据来源，改变了传统以二维工程图纸为主、以三维实体模型为辅的制造方法。可以看到MBD包含了制造信息和设计信息，它的信息流动是从模型到产品，但数字孪生模型除了包含各类信息之外，还具有模型与产品之间信息双向流动的特性。因此，可以看出数字孪生模型是各种技术的综合体。

1.2 数字孪生模型在制造中的作用

1.2.1. 预见设计质量和制造过程

传统模式下，在产品设计完成后必须先制造出实体零部件，才能对设计方案的质量和可制造性进行评估，这不仅导致成本增加，并且也加长了产品研发周期，而通过建立数字孪生模型，任何零部件在被实际制造出来之前，都可以预测其成品质量，判断其是否存在设计缺陷，比如零部件之间的干扰、设计是否符合规范等。通过分析工具找到产生设计

缺陷的原因，并直接在数字孪生模型中修改相应的设计，再重新量预测，直到问题得以解决。

在实际制造系统中，只有当全部流程都无差错时，生产才能得以顺利开展。通常在试用之前要将生产设备配置好，以实现流程验证，判断设备是否正常运转。然而，在这个时候才发现问题可能会引起生产延误，并且这时解决问题所需要的费用将远远高于流程早期。

当前自动化技术应用广泛，最具颠覆性意义的是用机器人来替代工作人员的部分工作，投入机器人的企业必须评估机器人能否在生产过程中准确地执行人的工作，机器人的大小和工作范围是否会对周围的设备产生干涉，以及它会不会伤害到附近的操作员。机器人的投入成本较大，因此十分有必要在初期便对这些问题进行验证。

较为高效的途径是建立与制造流程对应的数字孪生模型，其具备所有制造过程细节，并可在虚拟世界中制造过程进行验证。当验证过程中出现问题时，只需要在模型中进行修正即可，比如机器人发生干涉时，可以通过调整工作台的高度、反转装配台、输送带的位置等来更改模型，然后再次进行仿真，确保机器人能正确达到任务目标。

通过使用数字孪生模型，在设计阶段便能预测产品性能，并能根据预测结果加以改进、优化，而且在制造流程初期就能够了解详细信息，进而展开预见，确保全部细节均无差错，这有极大的意义，因为越早知

道如何制造出色的产品，就能越快地向市场推出优质的产品，抢
机。

1.2.2.推进设计和制造高效协同

随着现代产品功能复杂性的增加，其制造过程也逐渐复杂，对制造所涉及的所有过程均有必要进行完善的规划。一般情况下，过程规划是设计人员和制造人员基于不同的系统而独立开展工作。设计人员将产品创意传达给制造部门，再由他们去考虑应该如何合理地制造。这样容易导致产品的信息流失，使得制造人员很难看到实际状况，出错的概率增大。一旦设计发生变更，制造过程将会出现一定的滞后，数据无法及时更新。

在数字孪生模型中，对需要制造的产品、制造的方式、资源以及地点等各个方面可以进行系统的规划，将各方面关联起来，实现设计人员和制造人员的协同。一旦发生设计变更，可以在数字孪生模型中方便地更新制造过程，包括更新面向制造的物料清单，创建新的工序，为工序分配新的操作人员，并在此基础上进一步将完成各项任务所需的时间以及所有不同的工序整合在一起，进行分析和规划，直到产生满意的制造过程方案。

除了过程规划之外，生产布局也是复杂的制造系统中的重要工作。一般的生产布局图是用来设置生产设备和生产系统的二维原理图和纸质

平面图，设计这些布局图通常需要大量的时间精力。由于现今竞争激烈，企业需要不断地向产品中加入更好的功能，并以更快的速度向市场推出更多的产品，这意味着制造系统需要持续扩展和更新，但静态的二维布局图缺乏智能关联性，修改起来又会耗费大量时间，制造人员难以获得有关生产环境的最新信息，因而难以制定明确的决策和及时采取行动。

然而，借助数字孪生模型可以设计出包含所有细节信息的生产布局图，包括机械、自动化设备、工具、资源甚至是操作人员等各种详细信息，并将之与产品设计进行无缝关联。比如在一个新的产品制造方案中，所引入的机器人干涉了一条传送带，布局工程师需要对传送带进行调整并发出变更申请，当发生变更时，同步执行影响分析来了解生产线设备供应商中，哪些会受到影响，以及对生产调度会产生怎么样的影响，这样在设置新的生产系统时，就能在需要的时间内获得正确的设备。

基于数字孪生模型，设计人员和制造人员实现协同，设计方案和生产布局实现同步，这些都大大提高了制造业务的敏捷度和效率，帮助企业应对更加复杂的产品制造挑战。

1.2.3.确保设计和制造准确执行

如果制造系统中的所有流程都准确无误，生产便可以顺利开展，但

万一生产进展不顺利，由于整个过程非常复杂，制造环节出现问题响产出的时候，很难迅速找出问题所在。最简单的方法是在生产系统中尝试用一种全新的生产策略，但是面对众多不同的材料和设备选择，清楚地知道哪些选择将带来最佳效果又是一个难题。

针对这种情况，可以在数字孪生模型中对不同的生产策略进行模拟仿真和评估，结合大数据分析和统计学技术，快速找出有空档时间的工序。调整策略后再模拟仿真整个生产系统的绩效，进一步优化实现所有资源利用率的最大化，确保所有工序上的所有人都尽其所能，实现盈利能力的最大化。

为了实现卓越的制造，必须清楚了解生产规划以及执行情况。企业通常难以确保规划和执行都准确无误，并满足所有设计需求，这是因为如何在规划与执行之间实现关联，如何将从生产环节收集到的有效信息反馈至产品设计环节，是一个很大的挑战。

利用数字孪生模型可以搭建规划和执行的闭环环路，将虚拟生产世界和现实生产世界结合起来，具体而言，就是集成PLM系统、制造运营管理系统以及生产设备。过程计划发布至制造执行系统之后，利用数字孪生模型生成详细的作业指导书，并与生产设计全过程进行关联，这样一来，如果发生任何变更，整个过程都会进行相应的更新，甚至还能从生产环境中收集有关生产执行情况的信息。

此外还可以使用大数据技术直接从生产设备中收集实时的数据，将这些信息覆盖在数字孪生模型上，对设计和实际制造结果进行对比，检查两者是否存在差异，找出产生差异的原因和解决方法，确保生产能完全按照规划来执行。

1.3 数字孪生模型的应用和进展

实现数字孪生模型的许多关键技术都已经开发出来，比如多物理尺度和多物理量建模、结构化的健康管理、高性能计算等，但实现数字孪生模型需要集成和融合这些跨领域、跨专业的多项技术，从而对装备的健康状况进行有效评估，这与单个技术发展的愿景有着显著的区别。

美国空军研究实验室（AFRL）2013年发布的Spiral 1计划就是其中重要的一步，该实验室已与通用电气（GE）和诺思罗普·格鲁曼公司签订了2000万美元的商业合同以开展此项工作。此计划以现有美国空军装备F15为测试台，集成现有最先进的技术，与当前具有的实际能力为测试基准，从而标识出虚拟实体还存在的差距。GE将其作为工业互联网的一个重要概念，力图通过大数据的分析，完整地透视物理世界中机器实际运行的情况；而激进的PLM厂商PTC公司，则将其作为主推的“智能互联产品”的关键性环节——智能产品的每一个动作都会重新返回给设计师，从而实现实时的反馈与革命性的优化策略。

数字孪生模型存在的重要意义在于实现了现实世界的物理系
拟空间数字化系统之间的交互与反馈，从而达到在产品的全生命周期内
物理世界和虚拟世界之间的协调统一，再通过基于数字孪生模型而进行
的仿真、分析、决策、数据收集、存储、挖掘以及人工智能的应用，确
保它与物理系统的适用性。智能系统的智能首先是指能感知、建模，然
后才是分析推理与预测。只有具有数字孪生模型对现实生产系统的准确
模型化描述，智能制造系统才能在此基础上进一步落实，这就是数字孪
生模型对智能制造的意义所在。

2 基于模型的企业

应用基于模型的技术将数字孪生模型应用于企业，建立基于模型的企业（Model Based Enterprise, MBE）是满足工业4.0时代多样化、个性化需求的最有效的制造新模式。

MBE是基于模型的定义（Model Based Definition, MBD）在整个企业以及上下游的供应商之间建立一个集成和协作的环境的方法，各业务环节均在全三维产品定义的基础上开展工作，这有效地缩短了整个产品研发周期，改善了生产现场的工作环境，提高了产品质量和生产效率。在MBD/MBE技术实施过程中，产品设计、生产、管理各环节所使用的数据或信息全部“附着”在三维模型上，使产品工程数据的结构特征越来越弱，数字化程度越来越高，而在围绕模型的整个生命周期中，包括需求、分析、设计、实施等环节会产生大量的文档、视频等多种类型的数据，同时这些数据的生成速度会随时间推移、产品型号增加等因素的影响不断提高，逐步呈现大数据态。可见用MBE技术可实现数字孪生模型的构建，将企业现有业务流程与数字化模型对接、整合。

MBE拥有建立在全三维产品定义上的集成和协同环境，并在整个企业内共享，能够保证从概念设计到产品实现的快速性、准确性和经济可承受性。MBE是一种可使下游用户在MBD模型基础上再现或添加3D产品定义数据，以保证模型重用的过程，该模型以标注和信息组织的方式

定义产品需要的所有信息，可以被非CAD用户查阅或自动提取信
而可取代传统的图样。

企业将其在产品全生命周期中和各种过程中所需要的数据、信息和知识进行整理，结合信息系统，建立便于系统集成和应用的产品模型和过程模型，通过模型进行多学科、跨部门、跨企业的产品协同设计、制造和管理，通过模型支持技术创新、大批量定制和绿色制造。基于模型，整个企业表现出高度的智慧、快速的反应能力、优良的人机友好性和知识共享性。

2.1 技术标准与规范

2.1.1. ASME Y14.41简介

ASME Y14.41—2003”数字产品定义数据实践”标准的开发最初是于1997年1月份在堪萨斯州由波音公司主办的一个会议上提出的，并在随后的1997年ASME春季会议上组成了项目成员，然后开始了该标准的起草定义。

该标准为基于三维的数字化产品定义设置了基本准则，为三维数据贯穿设计、制造和检测的全方位应用奠定了基础。该标准于2003年7月被批准为美国国家标准，开始推广执行。

ASME Y14.41—2003标准包含以下10部分：

- 通用描述
- 数据集的标识与控制
- 数据集要求
- 设计模型要求
- 产品定义数据通用要求
- 注释与特殊符号
- 模型值与尺寸
- 正负公差
- 基准的应用
- 几何公差

ASME Y14.41—2003标准既适用于纯三维产品研发模式，也适用于三维和二维混合的模式。

ASME Y14.41—2003对完整定义产品的数据进行了描述，除了模型数据、修订历史之外，还包括材料、工艺、分析数据、测试要求等相关

数据。针对纯三维模式，可以不需要图纸，其模型数据包括：设
型、注释、属性。其中注释是无需进行查询等操作即可见的各种尺寸、
公差、文本、符号等；而属性则是为了完整地定义产品模型所需的尺
寸、公差、文本等，这些内容在图形上是不可见的，但可通过查询模型
获取。模型数据的管理需要数据管理系统来提供数据集的控制和跟踪信
息，包括对数据工作状态、评审状态、发布状态的控制，以及对数据的
存储、数据版本历史的记录等。

2.1.2.ISO 16792简介

国际标准化组织采用ASME Y14.41—2003标准，并于2006年12月将
其列为ISO标准，发布了ISO 16792“技术产品文件——数字产品定义数
据实践”。

ISO 16792标准包括以下11个部分：

- 范围
- 标准引用
- 术语与定义
- 数据集的标识与控制
- 数据集要求

- 设计模型要求
- 产品定义数据通用要求
- 注释与特殊符号
- 模型数值与尺寸
- 基准的应用
- 几何公差

ISO 16792标准的内容与ASME Y14.41—2003的内容基本一致。

2.1.3.GBT 24734—2009简介

我国技术产品文件标准化技术委员会（SAC/TC 146）于2009年根据ISO 16792标准，发布了GBT 24734—2009“技术产品文件——数字化产品定义数据通则”标准。

GBT 24734—2009标准包括以下11个部分：

- 术语和定义
- 数据集识别与控制
- 数据集要求

- 设计模型要求
- 产品定义数据通用要求
- 几何建模特征规范
- 注释要求
- 模型数值与尺寸要求
- 基准的应用
- 几何公差
- 模型几何细节层级

GBT 24734—2009标准中除了几何建模特征规范和模型几何细节层级两部分内容外，其余与ISO 16792标准的内容一致。GBT 24734—2009标准的几何建模特征规范部分给出了三维CAD应用中几何建模特征的术语、定义、分类等方面的规范化要求。它将几何建模特征分为基本建模特征、附加建模特征和编辑特征等几类，如图 3所示。

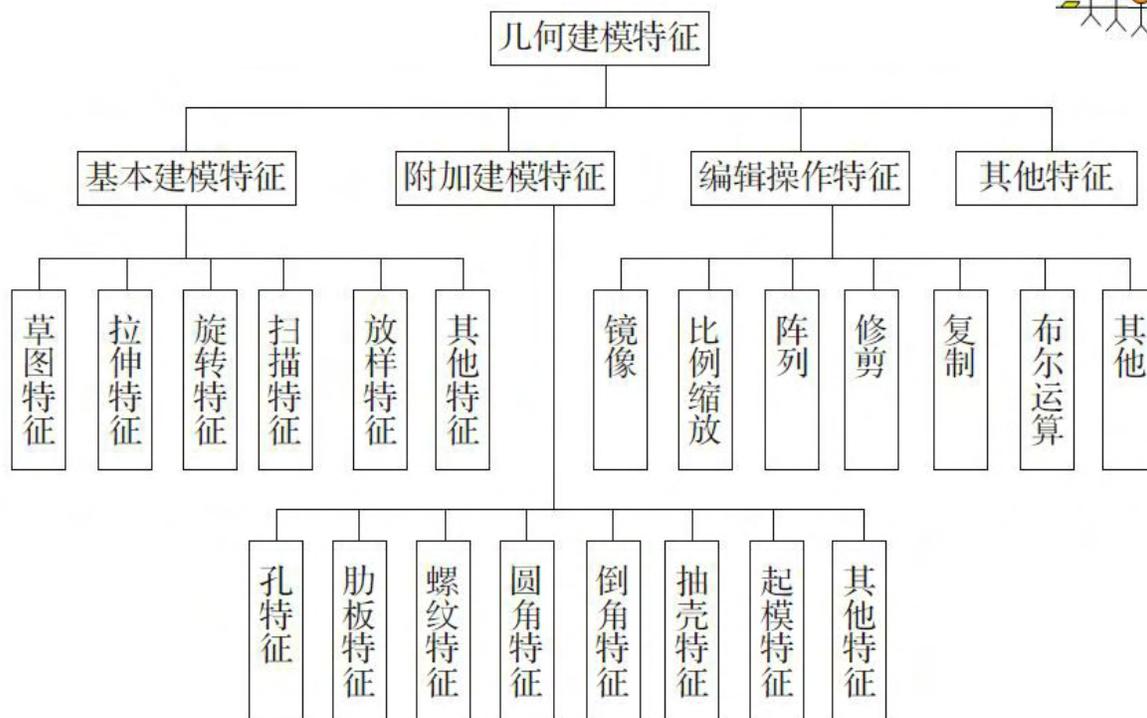


图 3 几何建模特征

GBT 24734—2009标准的模型几何细节层级部分规定了产品数字化定义过程中三维模型的标准级表示、简化级表示和扩展级表示，以及螺纹、孔、埋头孔、倒角、沟槽、齿轮、轴承和螺纹弹簧等的各级表示要求，如图 4所示。

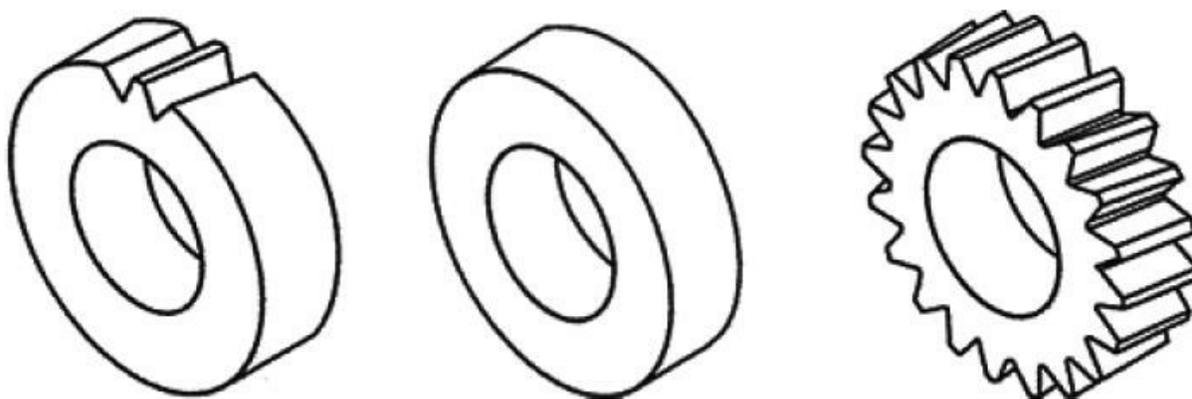


图 4 标准级表示、简化级表示和扩展级表示的齿轮

- 标准级表示。在标准级表示中，对识别功能目的所需的几何形状和设计细节进行建模或显示。除非有特别说明，小于最大长度0.5%以及表达功能目的所不需要的元素可不建模或不显示。

- 简化级表示。在简化级表示中，只有零部件的各部分、零部件或装配体的基本形状需要建模或显示。倒角、沟槽、刻痕等元素以及内部细节不需要建模或显示。

- 扩展级表示。在扩展级表示中，所有的零部件、总成或模型特征的建模或显示都应能表现其完整的细节。在满足功能需要的前提下，建模或显示的精度可以低于零部件或模型特征的实际形式。除非有特别说明，小于最大长度0.1%的元素可不建模或不显示。有限体积的内部细节只有在必要时方予显示。

2.2 从MBD到MBE

当前，国内外大型装备制造企业的数字化技术发展迅速，三维数字化设计技术得到了广泛的应用，基于模型定义（MBD）的数字化设计与制造技术已经成为制造业信息化的发展趋势。MBD是产品数字化定义的先进方法，它是指产品定义的各类信息按照模型的方式组织，其核心内容是产品的几何模型，包括所有的几何参数。同时，产品的三维模

型还囊括所有相关的工艺描述信息、属性信息、管理信息等，一下不再有二维工程图纸。MBD改变了传统的由三维实体模型来描述几何信息，而用二维工程图纸来定义尺寸、公差和工艺信息的产品数字化定义方法。同时，MBD使三维数模作为生产制造过程中的唯一参照对象，改变了传统以二维工程图纸为主，以三维实体模型为辅的制造方法。

目前，国外MBD技术的应用已经比较成熟，如波音公司在以波音787为代表的新型客机研制过程中，全面采用了MBD技术，将三维产品的三维设计信息、制造工艺信息以及管理信息共同定义到产品的三维模型中，不再使用二维图样，而将MBD模型作为制造的唯一依据，开创了飞机数字化设计制造的崭新模式。近年来，国内大型装备制造企业已认识到MBD技术的优势，并逐步开始应用MBD技术进行产品设计，并将MBD模型作为制造的唯一依据，但仅仅使用MBD还无法完全实现最初提出的提高大型复杂系统的设计质量，减少制造交货时间，以及减少工程变更，减少产品缺陷，提高首次质量等目标。为了更好地使MBD数据在产品的整个生命周期内能够有效充分地进行利用，很多大型装备提供商、供应商通过不同的型号项目开始研究、验证和应用MBE方法，就是要基于MBD在整个企业和供应链范围内建立一个集成和协同化的环境，各业务环节充分利用已有的MBD单一数据源开展工作，从而有效地缩短整个产品研制周期，改善生产现场的工作环境，提高产品质量和生产效率。MBE也得到了美国国防部、美国陆军研究实验室等代表客

户方单位的大力支持，并在某些大型项目中提供相关的帮助，不
MBD/MBE进行了系统的阐述和研究，同时也通过国家项目进行资助和
验证。

美国”下一代制造技术计划（The Next Generation Manufacturing Technologies Initiative, NGMTI）”是美国军方和重要制造企业合作发展制造技术的计划，旨在加速制造技术突破性发展，以加强国防工业的基础和改善美国制造企业在全球经济竞争中的地位。该计划于2005年提出，于2016年部分完成。NGMTI计划定义的美国下一代制造技术共有6个目标，其中第一个就是”基于模型的企业（Model-Based Enterprise, MBE）”，其发展历程如图 5所示。

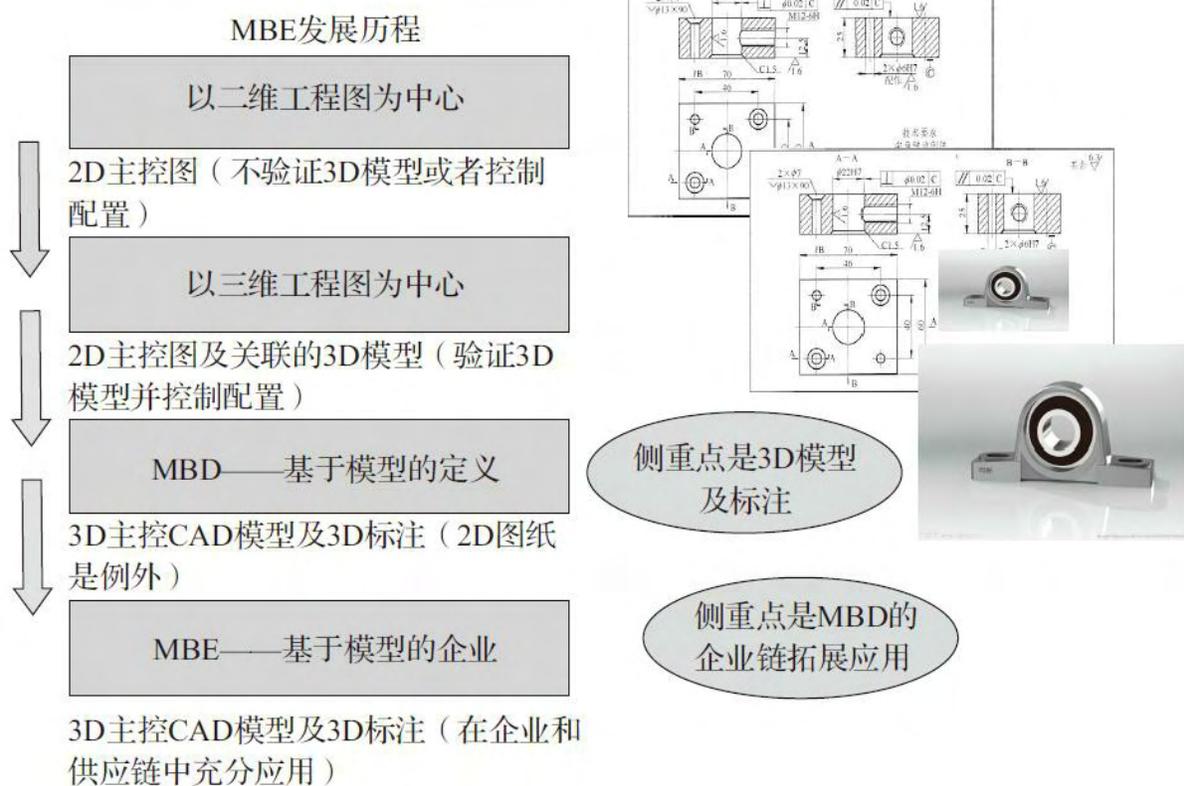


图 5 MBE发展历程

NGMTI提出的“MBE”是一种制造实体，它采用建模与仿真技术对设计、制造、产品支持的所有技术和业务的流程进行彻底的改进、无缝的集成以及战略的管理；利用产品和过程模型来定义、执行、控制和管理企业的所有过程；并采用科学的模拟与分析工具，在产品生命周期的每一阶段做出最佳决策，从根本上减少产品创新、开发、制造和支持的时间与成本。

MBD已成为这种先进制造方法的具体体现，它的进展代表了数字化制造的未来。这个被美国国防部提出的词语和内涵慢慢地被很多商业

公司所采纳。美国国防部、美国国家标准和技术研究所在2009年进行了“基于模型的企业”首脑会议和数据包（MBE/TDP）技术研讨会。这次研讨会汇集了超过75个专业课题方向的专家，针对美国国防部及其供应商如何有效处理技术数据提出了更改建议。未来的变化都需要支持美国国防部过渡到基于数字模型而不是二维图纸的全生命周期管理。在这次研讨会中又重申了MBE的核心内涵：**MBD是核心；MBD数据创建一次并能被后续各业务环节直接使用；MBD模型作为配置的基础，并在此基础上对MBE的外延进行了扩展和说明，其中，基于模型的系统工程（Model Based Systems Engineering，MBSE）和基于模型的维护是未来MBE的应用与实践方向。**

如图3-6所示，MBE的相关组成主要分为三大部分：基于模型的工程（Model-Based Engineering，MBe）、基于模型的数字化制造（Model Based Manufacturing，MBm）、基于模型的维护（Model Based Sustainment，MBs）。其中基于模型的工程是整个MBE实施的基础，特别是大家比较熟悉的MBD也是基于模型工程中的重要组成。

作为一种数字化制造的实体，MBE在统一的基于模型的系统工程指导下，通过创建贯穿企业产品整个生命周期的产品模型、流程管理模型、企业（或协作企业间的）产品管理标准规范与决策模型，并在此基础上开展与之相对应的MBe、MBm和MBs的实施部署。

MBe是MBE的重要指导思想。随着产品系统的规模和复杂程度的不

断提高，基于文档的系统工程面临的困难越来越突出，如信息表
确，容易产生歧义、难以从海量文档中查找所需信息、无法与软件、机
械、电子等其他工程领域的设计对接。而MBSE具有直观、无歧义、模
块化、可重用等优点，它为基于模型的工程、基于模型的制造、基于模
型的维护等MBE的关键活动提供了统一的协调接口，成为MBE研究和
应用实践中的重要组成部分。

MBE、MBm和MBs作为单一数据源的数字化企业系统模型中的三
个主要组成部分，涵盖了从产品设计、制造到服务的完整的产品全生命
周期业务，以MBD主模型为核心在企业各业务环节顺畅流通和直接使
用，从虚拟的工程设计到现实的制造工厂，再到产品的上市流通直至产
品的回收，基于MBD的产品模型始终服务于产品生命周期的每个阶
段。

MBE的能力在强调MBD模型数据、技术数据包、更改与配置管
理、企业内外的制造数据交互、质量需求规划与检测数据、扩展企业的
协同与数据交换6个方面的同时，更加强调扩展企业跨供应链的产品全
生命周期的MBD业务模型、相关数据在企业内外顺畅流通和直接重
用。

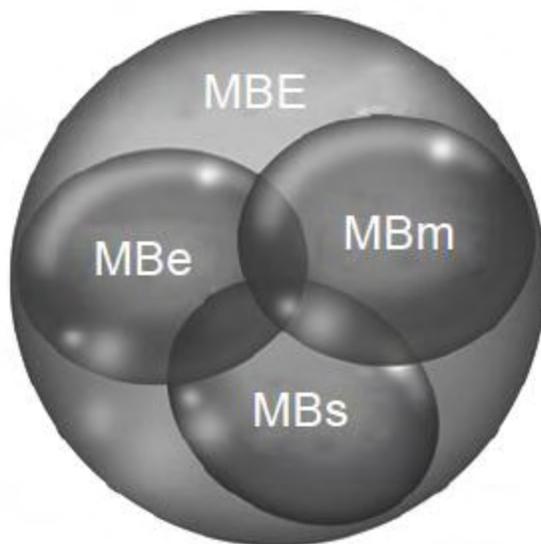


图 6 MBE的三大组成：MBe、MBm、MBs

构建完整的MBE能力体系是企业的一项长期战略，在充分评估企业能力条件的基础上，统一行动，以MBD模型为统一的“工程语言”，在基于模型的系统工程方法论指导下，全面梳理企业内外、产品全生命周期的业务流程、标准规范，采用先进的信息技术，形成一套崭新的完整的产品研制能力体系。

2.2.1.MBe

MBe是将模型作为技术基线的不可或缺的一部分，包括产品全生命周期内需求、分析、设计、实施和验证的能力，丰富了以前仅以MBD作为MBe的一个独立部分，且也将MBSE作为MBe的一个完善的和未来的发展方向之一。

系统工程国际理事会（INCOSE）出版了系统工程2020年远景规划，提出了从过去以文档为中心的方法向未来基于模型的方法的发展方向。INCOSE MBSE制定了一个路线图，重点标出为实现2020年的远景规划，将MBSE的标准制定作为努力的关键领域。MBSE是正式的建模应用程序，用以支持开始于概念设计阶段的系统需求、设计、分析、验证和确认活动。可以说系统工程（System Engineering, SE）是跨整个产品的开发、部署和处置阶段的设计决策的协调，MBSE是一个接口，可以被认为是“将东西粘合在一起”的一个系统化的方式。最近系统建模标准开始对MBSE的应用和使用产生重大影响。对象管理集团（OMG）的系统建模语言（SysML™）是一种通用的，用于特定的设计、分析和验证复杂系统的图形化建模语言，在2006年由OMG采纳，现已被广泛实施在MBSE支持工具中。SysML™是一个更广泛的家族，是包括XML元数据交换（XMI）在内的由对象管理集团正在开发的标准的一部分。本标准规定了建模工具与XML格式文件之间的信息交互手段。ISO 10303—233应用协议系统工程（AP233）是一种数据交换的标准协议，以支持许多不同的SE工具之间的工程数据交换。事实上，AP233和SysML™的要求已在很大程度上由OMG和ISO团队一起保持一致，并与INCOSE模型驱动的系统设计工作组密切合作。模型和数据交换在推进MBSE实践以实现不同建模领域的一体化水平中是必不可少的。图3-7是基于MBD的MBE生命周期示意。

基于三维模型定义的核心是将产品三维模型打造为传递到下游生产

活动所需详细信息的最恰当的载体，企业全部部门和团队都使用模型来传递信息。MBD数字模型的价值与产品的复杂水平成正比。如果用二维图纸描述复杂产品，则需要很多时间来培训使用者，以使其理解复杂的结构与组织。有了三维MBD数据集，对使用者专门技能的要求可以适当降低，使用者通过对模型进行平移、旋转和缩放，就能够很容易地理解产品的几何特征和相应的尺寸、公差。MBD数据集还可以表示隐含的信息，进行剖切或特定的测量。在传统的三维模型加二维图纸的定义模式下，三维模型上并没有检验要求的描述，有关的产品检验信息标注在二维图纸上，而应用MBD方法，可大大简化检验过程，应用基于三维模型的检验软件，可直接读取三维模型上的尺寸和公差数据，在编制检验程序时，使用者的输入可达到最小。利用便携式的坐标测量装置，可使检验深入到更多的制造环节中，以及时发现制造缺陷和不合格产品，并在后续加工之前就将废品淘汰，避免进一步的时间与费用损失。基于MBD的产品研制方法将质量保证部门纳入到MBD技术体系中，这将使得产品设计制造形成具有反馈的封闭环，缩短新产品研制周期，降低研制成本。

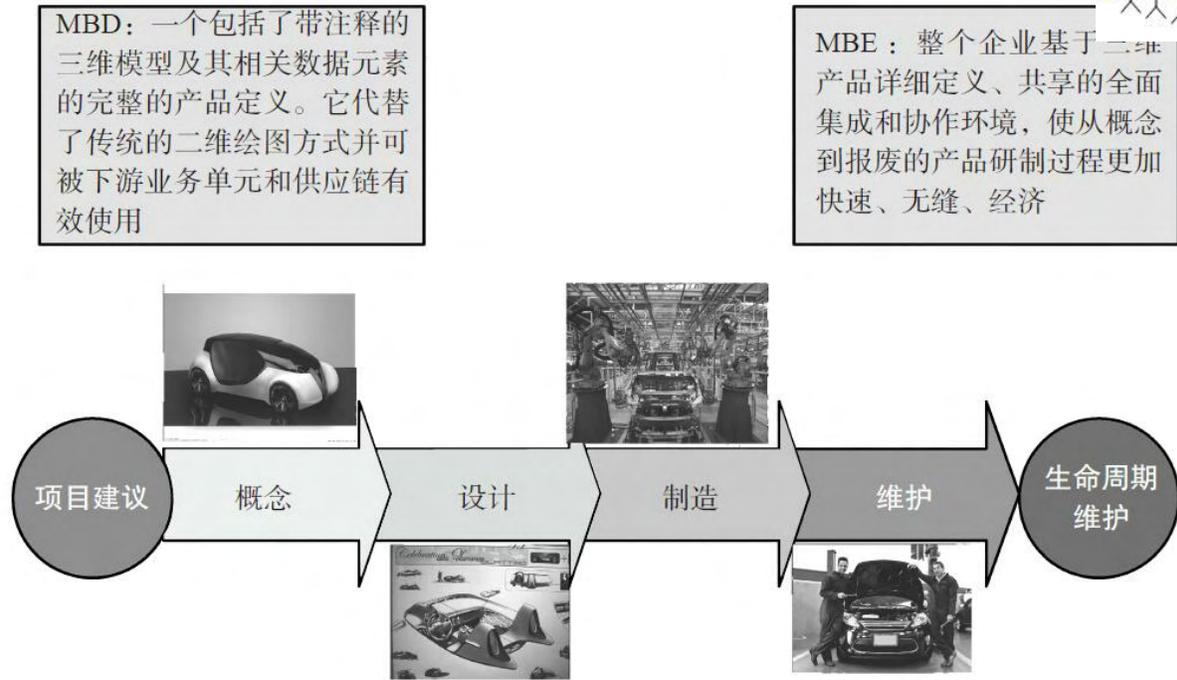


图 7 基于MBD的MBE生命周期

针对MBD数字模型的表达，美国机械工程师协会在1997年1月发起了关于三维模型标注标准的起草工作，以解决图纸与信息系统传输之间的矛盾。此标准于2003年7月被美国机械工程师协会接纳为新标准（ASME Y14.41）。随后，Siemens、PTC、Dassault等公司将该标准应用于各自的CAD系统中，对三维标注进行支持。作为该项技术的发起者之一，波音公司在787项目中开始推广使用该项技术，从设计开始，波音公司作为上游企业，全面地在合作伙伴中推行MBD技术。波音公司采用MBD技术后，在管理和效率上取得了本质的飞跃。

通过应用MBD技术可以为企业带来如下好处：

- 当制造工程师用三维模型时，将大大减少物理样机的制造
- 应用三维工具将缩短30%~50%的产品开发周期。
- 在总成装配上应用标准件库将缩短大量时间。
- 三维模型的使用将降低30%~40%的模型不一致，而这30%~40%的模型不一致是由二维图纸的不准确造成的。

正是鉴于MBD技术的效益和国外先进装备企业采用MBD技术后取得的巨大成功，国内的大型装备制造企业逐渐开始学习MBD技术，并逐步地将MBD应用于现实生产中，但国内大型装备制造企业对于MBD技术的学习与应用起步比较晚，现实生产中的应用并不成熟，需要深入研究和逐步推广。

2.2.2.MBm

MBE是由许多相关的过程组成的，MBm是其中关键的过程之一，MBm使用MBD过程中创建的模型，不仅重用MBD中所包含的产品几何表示，还重用很多的文本或存储在MBD模型中的“元数据”。这消除了传统的以手工方式重建数据从而创建用于生产的工艺过程定义的过程。

MBm模型用于在虚拟制造环境内部进行工艺规划设计、优化和管理，直至提供给生产现场。MBm过程交付物成果含有：三维零部件工

艺、三维装配工艺、数控程序、三维电子作业指导书、传统的作业指导书、离散事件仿真等。所有这些活动或工作都可以在某些情况下开始并有可能在完成设计之前完成。事实上，如果使用得当，MBm允许在加工任何实物之前都能进行制造和装配过程仿真，反过来说，这使得制造工程师可以向设计团队提供反馈，以创建一个可制造性更好的设计。

作为MBm重要组成部分的基于模型的作业指导书（Model Based Instruction, MBI）是连接虚拟和生产现场的关键环节。MBI是在MBM制造过程系统中生成和管理的，并基于三维设计模型生成的车间工作指导书。MBI在车间现场消除了纸质的二维作业文档，直接使用MBD的相关三维数据和基于三维的工艺信息。MBI和现场的制造执行系统（MES）集成在一起，在MBI的主屏幕上设置人机交互功能，可以采集及时发生的问题，并将其加入到数字模型中以进行未来的改进和版本管理。

通过使用MBm，可以解决以下的问题：

- 缩短转换产品定义到可用的工艺过程定义所需的时间。
- 通过限制或消除重建模型的需求以减少出错的可能。
- 允许在产品正式生产制造前进行制造工艺过程的虚拟验证。
- 允许早期制造数据向设计的反馈。

2.2.3.MBs

对于国防行业，随着维持武器系统运行的时间比原来设计的越来越长，以及在未来越来越少的预算，迫切需要采取类似于MBs的维持技术以提高运行维护效率，降低生命周期成本。同时，随着MBE在各类装备制造制造业中的实践和实施，未来基于模型的技术应用必然会扩展到产品生命周期的维修阶段。在产品和工艺开发过程中创建的模型和模拟仿真结果可以直接在整个产品生命周期的维护保障阶段使用，给用户和维护支持人员提供不断向下游传递的三维模型和相关数据。企业价值链成员将使用真实世界的效果和维护/维修/故障数据来评估产品和工艺的集成作业环境，并将结果反馈给产品设计，进行产品设计的改进。

目前大型装备维护领域还是由基于纸质及其他的非智能化数字化过程为主导，这也是为什么在维护保障领域基于模型的维护具有节约成本的最大提升空间。今天这些过程都因为缺乏高品质的贯穿整个供应链的集成系统工程数据而只能实现部分有限的优化：

- 系统修改和升级。
- 定点维护、维修和大修。
- 现场维修和保养。
- 有竞争力的采购零部件。

· DMSMS (Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortage)

制造源萎缩、材料短缺管理和报废管理。

· 预测和状态检修。

一个MBE的实施成功，模型必须成为企业流程中各环节协作的核心数据，该模型必须包括一个完整的产品定义，这个模型在应用上来说必须是中性的数据。MBE的宗旨是：数据只需创建一次，并能直接被各阶段的数据使用者重复使用。该模型应该被视为系统记录和配置控制的基础。

下游业务过程中的模型使用者应该使用模型参与产品开发周期的早期工作，如制造、成本和产品维护支持都可以基于模型来做。因此，模型不应该仅仅只包含几何模型信息，还必须包含制造信息，比如公差配合、注释和功能参数，以帮助用户了解设计意图。该模型必须是一个完整的技术数据包，它必需包含或关联相关的材料数据、过程规范、产品支持信息、测试和分析数据和其他文件，同时，另外一个关键因素是如何在组成企业的各个工程和业务部门之间有效地传递和使用。

如何判断一个企业正处于什么样的MBE阶段，可以从表 1中的一些指标得到基本判断。该表是美国国家标准与技术研究院从超过10家的大型企业及其供应商的现场评估，参照MBE的定义得到的一个能力指数定义。该指数表提供了一套详细的标准来定义MBE的能力，可以帮助企

业判断当前的状态并制定MBE的发展路线。

表 1 MBE发展路线

Level 0	功能应用：以图纸为中心的设计和制造 主要交付物：二维图
Level 1	功能应用：基于模型的制造 主要交付物：二维图和中性 CAD 模型
Level 2	功能应用：基于源 CAD 模型的制造 主要交付物：二维图和源 CAD 模型
Level 3	功能应用：MBD 主要交付物：三维图注释模型和轻量化可视化模型
Level 4	功能应用：基于模型的定义与数据管理 主要交付物：通过 PLM 管理的三维图释模型与轻量化可视化模型
Level 5	功能应用：基于模型的定义和自动生成的技术数据包（TDP） 主要交付物：数字化产品定义包与 TDP
Level 6	功能应用：自动生成的 TDP 与基于需求的企业数据访问 主要交付物：基于 WEB 访问的数字化产品定义包与技术数据包

Level 0: 企业这个阶段的能力水平是其他各级建立的基础。它的特点是主要以传统的二维图纸为主，很少使用三维模型。另外的特点是大多数（如果不是所有）下游数据使用者必须通过一种或多种方式来重新生成产品定义数据，以有效利用上游数据。这一级别具有如下特点：

- 二维工程图为主。
- 没有或有少量三维模型。
- 比较少地重用上游产品定义数据。
- 手动创建技术数据包（Technical data package，TDP）。

- 有很少或没有与扩展企业连接。
- 很少使用产品生命周期管理工具。

Level1: 这个级别是开始有效使用三维模型的开始。虽然仍是以二维工程图为主，但是已经与三维模型关联在一起进行管理。这一级也是第一次开始重用三维CAD模型数据的阶段，尽管都是通过输出中间格式文件来实现的。这个级别也由于开始重用数据而能够降低错误率和缩短交付时间。这一级别具有如下特点：

- 以二维工程图为主。
- 三维模型与二维工程图关联。
- 初始三维模型数据重用，通过输出中性格式文件（如STEP和IGES）。
- 手动创建TDP。
- 有很少或没有与扩展企业连接。
- 很少使用产品生命周期管理工具。

Level2: 除了使用的不再是中性文件，而是重用原始的CAD数据文件外，本级的能力水平本质上与Level1是一样的。在有特别请求的情况下，原始CAD数据也可以被下游单位或者企业获得。当企业内部或下游

企业使用相同的产品套件并且不需要数据转换就能充分使用三维时，对这些模型的访问将变得尤为重要。这进一步降低了出现错误的可能，缩短了任务交付时间。这一级别具有如下特点：

- 以二维工程图为主。
- 三维模型与二维工程图关联。
- 初始三维模型数据重用，通过原始三维模型数据格式。
- 手动创建的TDP。
- 有很少或没有与扩展企业连接。

Level3: 这个能力级别是第一次综合考虑三维模型与二维工程图，并将它们的结合作为产品定义的主要来源，在这个级别，模型是几何定义的，二维工程图作为特例并且是包含了相关产品制造信息（**Product Manufacturing Information, PMI**）模型的输出。这个级别采用产品生命周期管理工具和轻量化的三维可视化文件作为交付使用，这个可视化文件是一个CAD的中性文件，可为整个企业提供完整的产品定义，它们可以取代图纸。这个级别由于减少了图纸上的依赖，从而大大减少了错误和交付时间。这一级别具有如下特点：

- 以三维模型与受控的二维工程图为主。

- 二维工程图仅仅在特殊情况下创建。
- 模型被用于整个生命周期。
- 手动创建的TDP。
- 有很少或没有与扩展企业连接。
- 内部使用产品生命周期管理工具。

Level4: 这个能力级别是建立在Level3基础上的。在这个级别，模型是唯一的产品定义，它也开始进一步将制造工具套件融入整个环境中，不仅仅是模型的重用，还包括各类元数据信息的直接重用。这也是进一步使用产品生命周期管理工具的结果，质量方面也是如此，最终使得在整个扩展企业中产品定义的交付实现了自动化。这一级别具有如下特点：

- 以三维模型为主。
- 二维工程图创建属于例外。
- 模型和元数据都集成并应用到了制造和质量领域。
- 产品定义交付实现自动化。
- 有很少或没有与扩展企业连接。

- 内部使用产品生命周期管理工具。

Level5: 有这个级别的能力的企业是真正意义上的MBE，这个级别同样是建立在前面几个层级的基础上，但是增加了企业的连接。这样做可以使企业的所有人都可以访问到实时的、最新的产品定义，并可以全自动配置TDP。这一级别具有如下特点：

- 以三维模型为主。
- 二维工程图创建属于例外。
- 模型和元数据现在可以被整个扩展企业所访问、使用。
- 自动化的TDP配置。
- 在扩展企业之间有完全的连接。
- 内部和外部使用产品生命周期管理工具。

Level6: 这是迄今为止MBE能力定义的最高水平。本级建立在Level5级基础之上，但是增加了大量的自动化处理，使得自动化的TDP正式交付成为可能。它也消除了所有使用二维图纸的情况（也没有例外）。应当指出，Level6被认为是一个远期目标，目前也不知道有哪些组织已经达到了这个水平，但并不是说技术上不可用来实现它。这一级别具有如下特点：

- 三维模型。
- 不允许存在二维工程图。
- 模型和元数据现在可以被整个扩展企业所访问、使用。
- 完全自动化的TDP。
- 有完全连接的扩展企业。
- 内部和外部使用产品生命周期管理工具。

MBE的效益在MBD创建并在整个企业应用时就已经开始产生了，对于大型装备的原始制造商和供应商来说，在方案、设计、验证、制造、维护的各个环节都会带来实实在在的效益：

- 缩短新订/经修订的产品的交付时间，并降低了工程设计的返工周期。
- 整合并精简设计和制造流程，降低成本。
- 生产规划时间减少，减少生产延误的风险。
- 提高生产过程的设计质量，减少制造交货时间。
- 减少工程变更，减少产品缺陷，提高首次质量。

- 改善与利益相关者的合作、协同，缩减在产品的开发管理期中所有要素的周期和整体项目的成本。

- 提高备件采购效率。

- 改进作业指导书和技术出版物的质量。

- 在维修活动中提供互动的能力，以减少时间和维护产品。

3 MBE的体系建设

MBE已成为当代先进制造体系的具体体现，它的进展代表了数字化制造的未来。美国陆军研究院指出“如果恰当地构建企业MBE的能力体系，则能够减少50%~70%的非重复成本，缩短50%的上市时间”。基于此，美国国防部办公厅明确指出，将在其所有供应链内的各企业中推行MBE体系，开展MBE的能力等级认证。全世界众多装备制造企业也逐步加入MBE企业能力建设的大军中。

MBE主要由基于模型的工程、基于模型的制造、基于模型的维护三大部分组成，并且在统一的系统工程的指导下形成有机整体。MBE不仅仅局限在MBD模型的定义，它涵盖产品设计、制造和服务的完整的产品全生命周期业务，以MBD模型为核心，在各业务环节实现MBD模型的顺畅流通和直接使用。再仔细分析MBE的能力等级评价指标，包括MBD模型数据、技术数据包、更改与配置管理、企业内外的制造数据交互、质量需求规划与检测数据、扩展企业的协同与数据交换6个方面，其更加强调的是扩展企业跨供应链的产品全生命周期业务的MBD模型以及相关数据在企业内外能够顺畅流通、可直接重用。

总之，完整的MBE能力体系构建就是以MBD模型为统一的“工程语言”，按系统工程方法的指导，全面梳理企业内外、产品全生命周期业务流程、标准，采用先进的信息化技术，形成一套崭新的完整的产品研

制能力体系。企业需要一个面向MBE的信息化环境，以实现MBE以及相关数据在企业内外的顺畅流通、可直接重用。对于每一个制造企业，跨企业内外的产品全生命周期业务是非常复杂的，基于现有各自独立的信息化技术和工具，不可避免地需要处理大量的系统集成和数据转换，才能勉强保障MBD模型以及相关数据的流通或可利用，这将是致力于成为MBE企业直接面临的最大问题。

众多制造企业可能会问：是否存在一家公司，有能力提供一整套完整的面向MBE的解决方案与服务，帮助企业形成完备的MBE能力体系，减少繁重的集成与数据转换工作，能实现最大限度的数据畅通与可直接重用？答案是：西门子工业软件公司提供完整的MBE解决之道！西门子工业软件不仅具备专项MBE能力与工具，更能聚合整个西门子的优势，为制造企业提供完整的MBE解决方案，支撑企业实现跨供应链的产品全生命周期的MBE业务。

3.1 西门子MBE解决之道

西门子工业自动化事业部可支持行业内客户的整条价值链——从产品设计到生产、服务，将自动化技术、产业控制技术和工业软件无与伦比地结合在一起。运用先进的全集成的软硬件解决方案，实现产品与生产生命周期的集成，即打造数字化企业（工厂），实现虚拟世界与物理世界的无缝联通，帮助企业降低产品研发成本，缩短新产品上市时间，

如图 8所示。

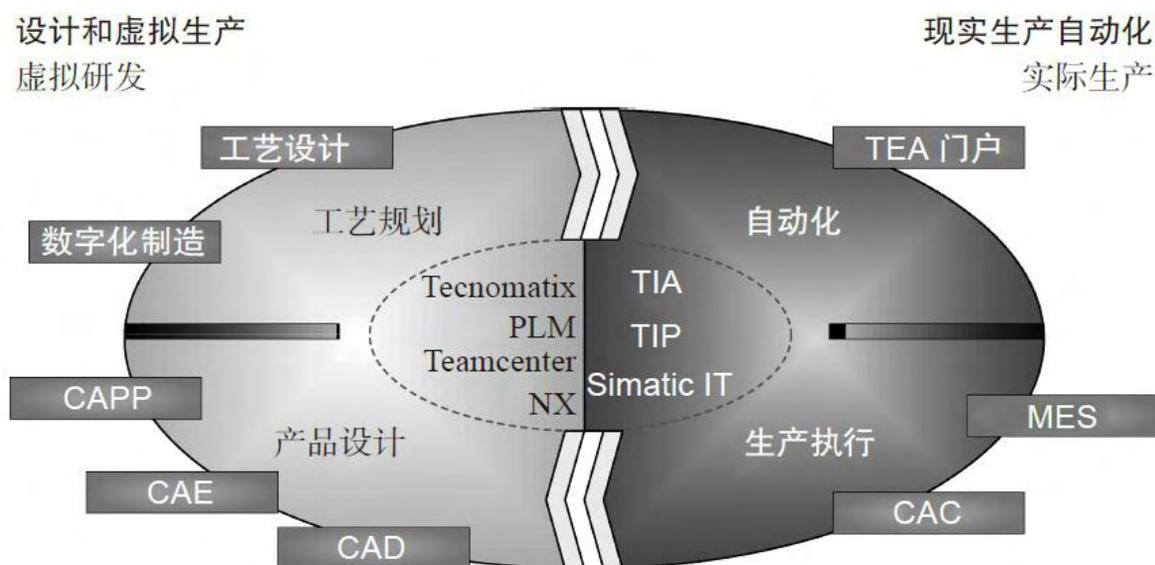


图 8 产品和生产全生命周期的集成

西门子工业软件公司是西门子工业自动化事业部旗下机构、全球领先的产品生命周期管理软件及服务提供商。在全球拥有77000个客户，近900万装机量。其计算机辅助设计与工程（NX）、协同产品开发管理（Teamcenter）、数字化制造（Tecnomatix）等每个方面都在全球一直保持行业领导地位。根据《CIMdata中国PLM研究报告（2013）》，西门子工业软件公司被评为2012年中国PLM市场的“中国最佳PLM解决方案供应商”并荣膺2012年中国PLM市场七项“第一”：

- 2012年中国总收入排名第一的PLM解决方案供应商。
- 2012年中国渠道商营业额排名第一的PLM解决方案供应商。

- 2012年中国实施服务收入排名第一的PLM解决方案供应商
- 2012年中国汽车市场排名第一的PLM解决方案供应商。
- 2012年中国工业装备行业市场排名第一的PLM解决方案供应商。
- 2012年中国计算机辅助设计（MCAD-MD）领域排名第一的PLM解决方案供应商。
- 2012年中国数字化制造（Digital Manufacturing）领域排名第一的PLM解决方案供应商。

多年来，西门子工业软件公司不断在内部PLM研发方面进行大量的投资，以完善其PLM相关的产品和解决方案，同时花费巨额资金，通过收购策略，扩充其解决方案，增加新的功能，帮助客户应对新的挑战，如图 9所示。例如，2011年完成对Vistagy公司的收购，实现向复合材料设计与制造的深入；2013年完成对LMS公司的收购，实现向系统级仿真、专业试验等领域的拓展。

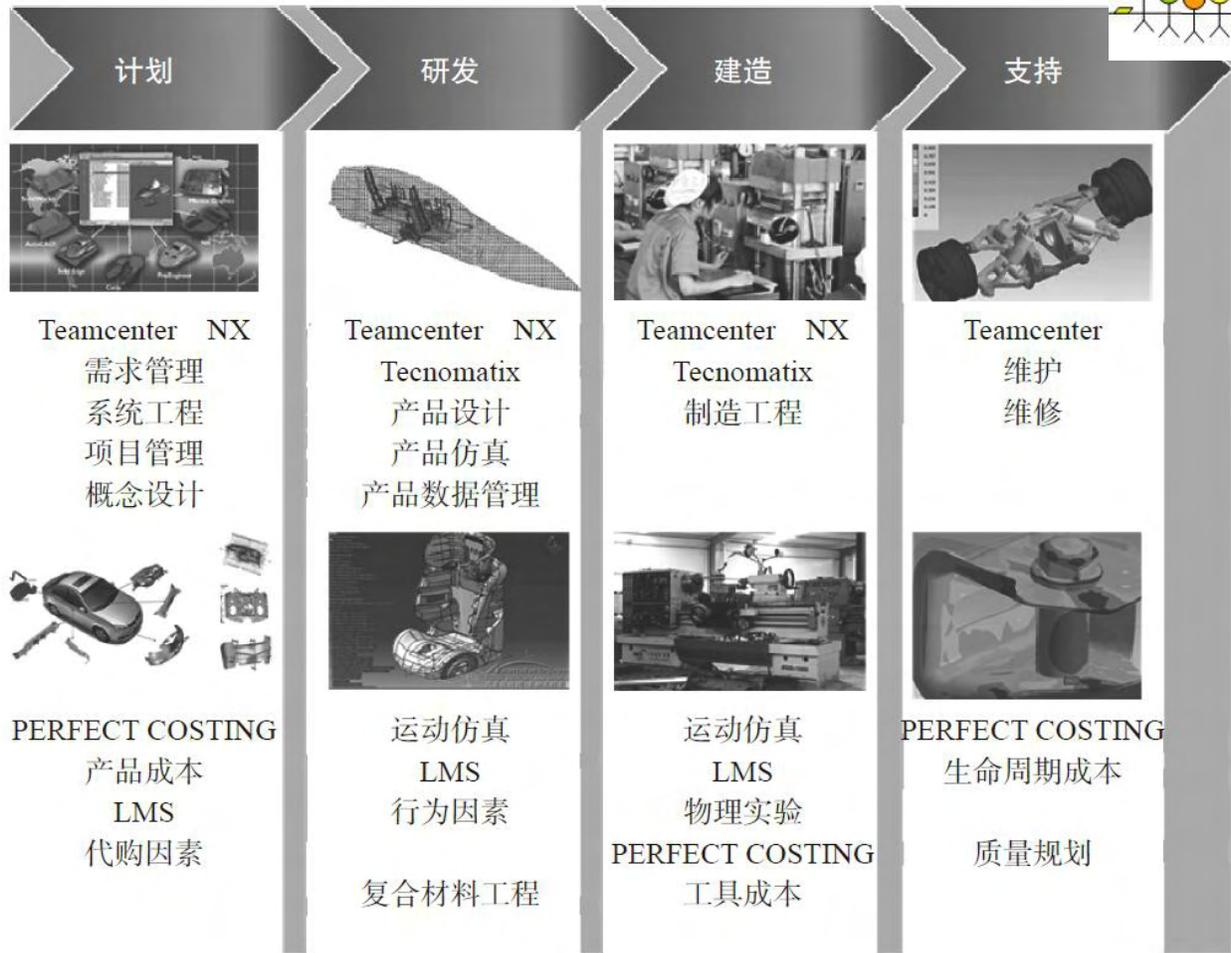


图 9 用收购策略扩充全生命周期解决方案的深度和广度

凭借西门子在工业自动化领域的强大的软硬件全面集成的技术能力，以及完整的产品生命周期管理（PLM）解决方案的能力，西门子工业软件公司从一开始就积极参与MBD定义的技术开发、标准制定，以及美国国防部与波音公司的诸多验证性项目的实践。经过多年的实践应用完善，形成了以NX为MBD定义工具、通过Tecnomatix直接基于MBD进行数字化制造、通过LMS进行仿真和试验、以Teamcenter为MBE提供全生命周期业务管理/数据重用/供应链协同的统一管理平台的全面MBE

解决方案，帮助制造企业打造完整的MBE能力体系，实现MBD跨产品全生命周期的应用（见图 10）：

- NX、MBD定义工具：NX作为CAD/CAE/CAM一体化工具，涵盖了概念设计、数字化产品定义、数字化仿真分析、评审分析、验证、多学科优化仿真分析等。它提供完整的MBD模型定义（三维产品模型加产品制造信息PMI）、浏览、交互的能力。

- Tecnomatix：基于MBD的数字化制造解决方案，包括工艺BOM管理、工艺分工、零部件工艺规划、装配工艺规划、机械运动仿真、公差仿真、人机仿真、装配仿真、工厂规划仿真优化、生产路线仿真优化、MES集成化管理等。通过各种技术最大化地利用MBD模型，开展数字化制造工作。

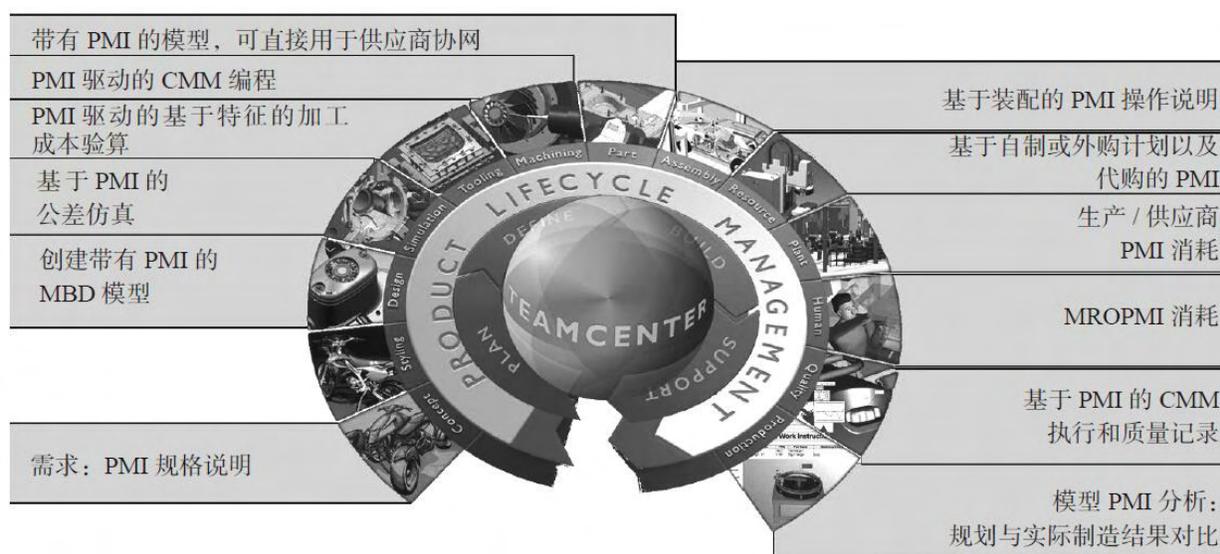


图 10 MBD模型（包含PMI产品制造信息）在产品全生命周期中的应用

用

· Teamcenter: MBE的全生命周期管理平台, 具体包括智能决策、投资组合、多项目组合管理、需求管理、系统工程、多CAD管理、多学科优化仿真分析管理、数字样机、可视化协同、异地协同、BOM生命周期管理、维护保障管理、企业知识管理等。保障MBD模型以及相关数据能够被有效地配置管理, 在MBE企业内部以及供应链之间流通。

· LMS: 仿真和试验解决方案。将三维功能仿真、试验系统、智能一维仿真系统、工程咨询服务有机地结合在一起, 专注于系统动力学、声音品质、舒适性、耐久性、安全性、能量管理、燃油经济性和排放、流体系统、机电系统仿真等关键性能的开发和研究。

西门子完整的MBE解决方案以系统工程思想为指导, 贯穿从产品需求开始, 经过产品设计、产品制造直至产品服务的完整产品全生命周期的过程, 各个阶段的各种信息能够被准确地定义到以MBD模型为核心的技术数据包中, 并始终保持上游的技术数据包能够被下游直接重用, 一直拓展到生产现场或服务现场。西门子MBE解决方案是通过综合利用以NX为基础的MBD定义工具、Tecnomatix, 支持MBD模式的数字化制造解决方案、Teamcenter支撑MBE产品全生命周期管理平台, LMS支持仿真和试验, 从而有机形成了从设计、工艺、制造、试验到服务和维护的全面的MBE解决方案体系, 包括: 基于模型的系统工程、基于模型的产品设计、基于模型的分析应用、基于模型的机电一体化系统工程、基

于模型的全生命周期质量管理、基于模型的工装设计、基于模型件工艺、基于模型的装配工艺、基于模型的质量检测、基于模型的作业指导书、基于模型的制造执行、基于模型的实物样机测试——集成的振动噪声、基于模型的MBE供应链管理、基于模型的MBE数字化服务管理、复杂产品的构型管理、基于MBD的标准和规范等。通过这些专业的MBE能力的灵活应用与组合，可帮助制造企业分阶段、分步骤实现MBE企业能力体系构建。

MBE的构建是漫长之路，尤其是达到Level 6的真正MBE，还需要在许多方面进行突破与完善。西门子工业软件公司将以西门子中央研究院——新技术孵化中心为引导，进行MBE能力技术的突破，通过西门子众多行业企业的实践应用进行完善，持续努力打造一套完整的MBE解决方案，始终保持领先一步的优势，引领制造企业迈向MBE企业的最高等级。

3.2 西门子MBE解决方案的价值定位

凭借西门子在工业自动化领域强大的软硬件全面集成的技术能力，以及完整的产品生命周期管理解决方案的能力，西门子工业软件公司在为各制造企业提供MBE的专业技术能力同时，也提供一套完整的MBE解决方案，并将以领先一步的方式帮助制造企业打造MBE能力体系。西门子提供的MBE解决方案与服务如下：

- 为制造企业提供包括MBD模型定义、基于模型的工程、基
型的制造和基于模型的服务等世界领先的各种MBE专业能力，使其能够
在某些具备条件的专业业务领域内快速具备MBE的能力，获得MBE的
收益。

- 为制造企业提供构建MBE完整能力体系的整体解决方案，引领企
业逐步平滑地走上MBE的最高等级，减少中间过程中繁重的系统集成与
数据转换的非增值活动，并以最小成本保障MBE的能力体系能够得以持
续的升级优化。

- 通过数字化技术与自动化技术的融合，使制造企业在迈向MBE的
同时，逐步走向真正的数字化企业（工厂），通过MBE能力与数字化工
厂能力的融合，更大程度地降低产品的研发成本，缩短新产品上市时
间。

- 以西门子中央研究院进行MBE能力技术的突破，通过西门子众多
行业企业的实践应用，始终保持领先一步的优势，引领制造企业迈向
MBE的最高境界。