

数字孪生驱动的大数据制造服务模式

作者 | 李仁旺 肖人彬

导语

本文从智能制造与数字孪生、制造服务模式方面综述了国内外相关研究进展；提出了一个数字孪生驱动的大数据制造模式开放式体系架构及其运作逻辑；从数字孪生驱动的 2 个世界及其描述、数字孪生与大数据的结合、大数据制造服务模式中模型建立与优化 3 个方面对大数据制造服务模式使能技术进行了研究。该制造服务模式对促进中国传统制造企业转型升级和提升新国际竞争环境下综合竞争力具有理论和现实意义。

随着以互联网为代表的社交媒体、移动互联网、物联网、云计算及人工智能等的不断发展和深入，以专利数据、网络评论、科技文献、网络商品、社交媒体、移动位置、运行状态为代表的新型数据信息不断涌现；同时，数字孪生技术自西门子提出以来，由于其在底层数据（如加工设备或过程数据等）获取与处理方面的独特优势，也迅速地得到了业界认可。此时，将呈现数据成为核心投入要素（“十四五”时期中国主要特征趋势研判：工业化），数据成为了新的产业发展动力，既推动着社会不断进步，也使数据成为了新的产业发展动力并为诸多领域技术发展提供了新的机遇^[1]。

与之相应，近年来世界制造业发达国家针对当前逐步形成共识的新一轮工业革命，

相继推出了自己的制造业发展战略，如德国的工业 4.0、美国的工业互联网、日本的 IVRA-Next 等，中国也相继推出了《中国制造 2025》《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》等，这些国家战略，势必将导致全球工业体系、发展模式和竞争格局产生重大变革，自然也对制造业运行模式——制造模式提出了新的要求，如怎样尽快适应近年来新技术如数字孪生、大数据等对当今世界制造业带来的巨大影响。鉴于此，本文提出一种数字孪生驱动的大数据制造服务模式。

1. 智能制造与数字孪生

习近平总书记在党的十九大报告中强调：“加快建设制造强国，加快发展先进制造业，推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合，在中高端消费、创新引领、绿色低碳、共享经济、现代供应链、人力资本服务等领域培育新增长点、形成新动能。”路甬祥^[2]认为中国制造业以供给侧结构性改革为主线，需要加快转变发展方式、优化产业结构、转换增长动力。周济^[3]提出智能制造是“中国制造 2025”主攻方向。自智能制造在中国发展以来，一方面，一批智能制造试点示范项目加速实施，工业互联网服务平台加快发展，制造企业的生产效率、运行成本、研发周期等方面状况均获改进；另一方面，对于向智能制造转型的规律和技术趋势的研究仍较欠缺，在转型发展过程中，基础研究领域仍以模仿或直接引进国外成果的方式为主，这也导致在相关领域缺少原始创新。随着“工业 4.0”的提出，数字孪生等新兴技术逐渐进入人们视野，提供了加速推进具有中国特色智能制造弯道超车的机会；谭建荣^[4]认为智能制造应从数字孪生入手，数字孪生

技术充分利用模型、数据、智能，并集成多学科技术，面向产品全生命周期，作为连接物理世界和信息世界的桥梁和纽带，提供更加实时、高效、智能的服务。



图 1 数字孪生发展历程

图 1 描述了数字孪生的发展历程。如图 1 所示，数字孪生的理念可追溯到 1969 年，但现在普遍认为数字孪生的明确概念由美国密歇根学 Mi-kael Grieves 于 2003 年给出，即“数字孪生是与物理产品等价的虚拟数字化表达”。庄存波等^[5]给出了产品数字孪生体与数字纽带的关系图、面向产品制造过程的数字孪生实施框架。Tao 等^[6]分析了任务规划与识别、概念设计、具象化设计、详细设计及虚拟验证等阶段，对数字孪生设计的框架进行了初探。Helu^[7]为了连接基于数字孪生的设计与制造，提出了基于标准建模规范的数字总线。顾新建等^[8]认为当前制造企业正在向服务业拓展，产品服务系统作为一种新的制造系统模式正在迅速发展。刘振宇等^[9]探索了数字孪生驱动的 14 类应用设想与实施过程中所需突破的关键问题与技术，给出了基于数字孪生进行产品设计的思路。肖静华等^[10]提出并探讨了基于智能制造的企业战略场景的建模概念、方法思想和理论框架。

2.制造服务模式

制造业服务化的核心思想主要体现在制造企业通过有形产品的服务来增强其产品综合竞争力，并逐渐将服务增值作为其利润创造的核心来源^[11]。董明等^[12]提出采用可达矩阵方法来对制造服务要素进行模块划分。Phumbua 等^[13]认为服务化已成为了制造业发展的显著趋势，制造企业不断扩展他们的服务范围以获得更多的利润。Song 等^[14]利用基于模糊树理论方法，提出了一种基于粗糙近理想解法的服务方案决策模型。以互联网为代表的信息技术冲击着传统的制造企业运营模式^[15]，制造企业为能解决资源浪费与产品同质等问题，结合客户行为变化及企业间相互提供集成产品与服务的技术发展趋势，开始实施服务型制造先进制造模式^[6]。

当前，生产性服务多数为制造企业的生产部门服务，而目前生产性服务研究中更多关注的是制造业信息化领域，例如制造服务成熟度模型制造服务平台研发^[18]、制造服务系统总线^[19]等。张富强等^[20]认为，当前制造业正处于由生产型制造向服务型制造转型的关键时期，可以预计，从生产型制造向服务型制造的转变是现代产业分工不断细化、生产组织方式高度协同的必然结果，也是消费升级的客观要求、制造转型的重要方向。陶飞等^[21]结合面向服务的思想和智能制造的概念，提出了面向服务的智能制造，阐述了其内涵和体系架构，并展望了未来的研究方向。齐晓轩等^[22]认为提供基于产品的附加服务，是促进制造业转型升级的重要途径。

这里，服务中各种要素在制造业投入占比中占据越来越重要的地位^[23]，换言之服务成分在制造业的全部产出中占据着越来越重要的关键地位。同时，从 5 个基本要素对制造服务模式进行梳理，如表 1 所示。

表 1 制造服务模式分要素梳理

基本要素	文献分析
运行模式	Greenfield ^[24] 提出了生产性服务业的概念。贺正楚等 ^[25] 从变革发展趋势角度探寻企业发展模式变革趋势。大批量生产 ^[26] 、制造自动化 ^[27] 等强调运行模式单一化以凸显规模经济效应
组织结构	Tuunanen 等 ^[28] 通过两个试验案例验证了与组织结构相应的服务过程模块化设计。柔性生产 ^[29] 和敏捷制造 ^[30] 等强调结构单元化以实现组织结构便捷、快速重组
业务过程	Geum 等 ^[31] 将服务分解为服务过程、服务结果和反馈。精益生产 ^[32] 突出业务过程精简、节约、准时。大批量定制 ^[33] 强调业务过程要以大批量生产的成本和交货期来满足客户个性化需求
决策体系	王保利等 ^[34] 探讨了环境动荡性对服务增强与企业绩效的调节作用。赵云辉等 ^[35] 认为经济转型背景下运用大数据技术有助于提升政府治理效率。韩箫亦等 ^[36] 研究了企业动态能力、平台质量与服务智能化绩效之间关系
制度建设	高清等 ^[37] 在现行有关绿色制造法律制度的基础上提出绿色制造法律制度创新意见。林强等 ^[38] 分析了信任机制、文化机制对制造业供应链企业间契约的影响。吉鸿荣 ^[39] 把生产者责任延伸制度作为一种环境管理制度

3. 数字孪生驱动的大数据制造模式框架

工业互联网引发生产范式变革，推动形成数据驱动制造模式。从构成要素角度看，机器、数据和人构成了工业互联网生态系统。从核心技术角度看，贯彻工业互联网始终的是数据资源，工业互联网的本质就是构建一套数据采集、存储、管理、计算、分析和应用的工业大数据资源体系，即将正确的数据在正确的时间传递给正确的人和机器，以信息流带动技术流、资金流、人才流、物资流，进而不断优化制造资源的配置效率。从杂乱无章的原始数据到具有价值的决策信息，由此形成了用数据生产、管理和决策的制造范式，也就是计划、协调、决策及执行，为

此从数字孪生、大数据及生产性服务的实现和服务执行机制的角度构建了数字孪生驱动的代理人大数据制造服务模式体系架构（图 2），分为 5 大部分：“虚拟世界（产品全生命周期）”“物理世界（大数据）”“数据处理机制（数字孪生数字模型”及“应用”），从而将各类平台上的创新成果与经济社会各领域深度融合起来，产生化学反应、放大效应，形成更广泛的以互联网为基础设施、数字孪生为桥梁和大数据为工具的数字经济发展新形态。

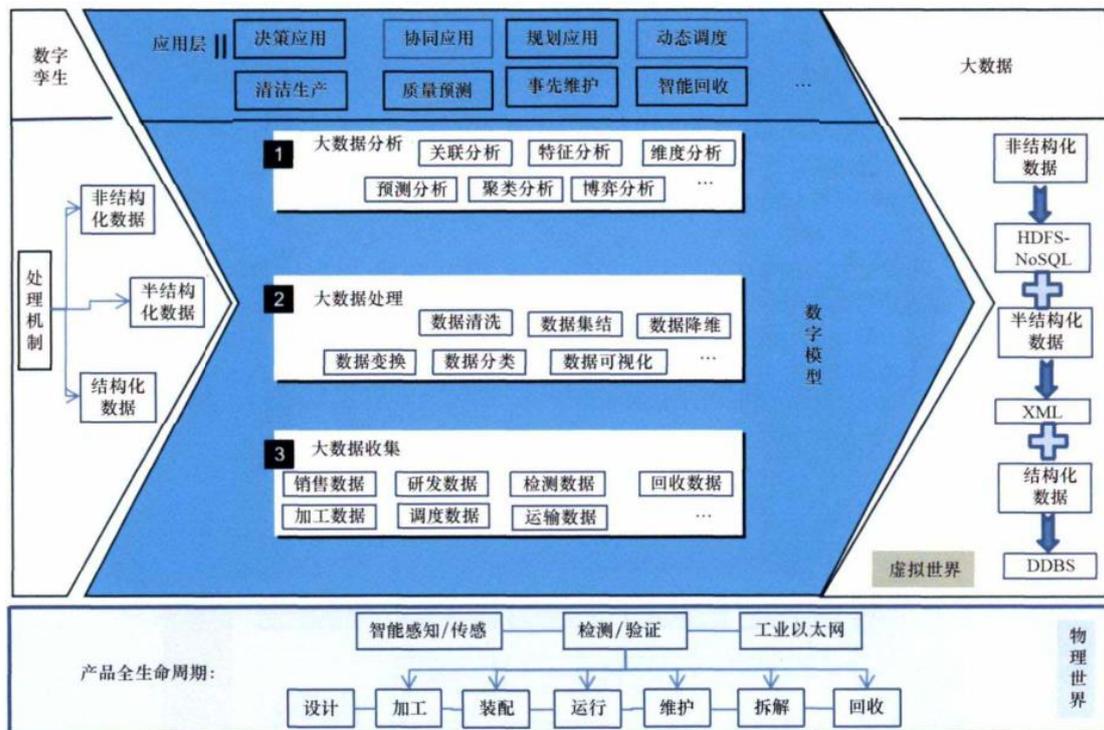


图 2 数字孪生驱动的大数据制造服务模式体系架构

如图 2 所示,数字孪生驱动的大数据制造服务模式针对产品全生命周期中各个阶段(物理世界) (设计、加工、装配、运行、维护、拆解、回收)进行检测或验证,通过智能感知/传感、工业以太网等,实现大数据原始数据采集等;同时,基于数字孪生中针对非结构化数据、半结构化数据、结构化数据处理机制,通过大数

据收集、大数据处理和大数据分析层的数字模型，以应用层功能化方式（如决策应用、协同应用、规划应用、动态调度、质量预测、事先维护、智能回收等），实现与大数据(虚拟世界)的相应映射，进而利用大数据分析技术推动制造业向定制化和精准服务化转型。这里，应用关联分析法对企业调度信息和订单信息进行回溯研究；应用预测分析法对生产中的设备维护周期和质量监控力度进行模拟预测，形成事先维护、事先控制的质量管理与设备维护机制；利用聚类分析法对能耗数据与回收数据进行动态关联，探索企业生产制造低碳化、清洁化、循环化的发展路径。通过产品全生命周期中各环节的数据互相关联，最终形成数字孪生驱动的大数据制造模式闭环运作生态。此外，从大的使能技术层角度看，则大致可以划分为技术层、大数据收集层、大数据处理层、大数据分析层及应用服务层(表2)。

表 2 大数据制造服务模式体系架构中涉及的主要层次说明

表2 大数据制造服务模式体系架构中涉及的主要层次说明

主要层级	层级特点
技术层	通过智能感知、RFID等先进技术对数据处理、数据分析模块提供相关技术和可行性方案，是数字孪生——连接真实世界和数据世界的物理要素
大数据收集层	将制造模式全生命周期进行延展，对研发、订单、加工、检测、维护、运输、销售等各个环节的数据进行采集、转换和储存
大数据处理层	提供数据处理和分析相关技术，为复杂、多维、多噪声的数据进行降噪、降维和数据可视化处理，为数据分析层提供有效数据
大数据分析层	对数据处理模块提供的有效数据进行进一步的数据挖掘和决策方案生成，主要提供销售客户和订单客户的特征刻画、生成运作系统内部各工艺环节的关联性、预测性规律分析
应用服务层	是整个服务体系的应用层和目标层。通过整合体系内相关内容和技術，实现本制造模式中计划、协调、维护、预测、调度、决策与执行等

4.数字孪生驱动的

大数据制造服务模式使能技术

如图 3 所示,数字孪生驱动的大数据制造服务模式涉及两个世界——物理世界、虚拟世界,涵盖了产品全生命周期各个环节,是近年来兴起的云制造(云服务、物联网、云计算)、制造服务(面向服务的生产、制造网络)、制造服务化(从服务经济进化到服务嵌入)的集成,其核心是数字孪生、大数据两个技术支持,也对该制造服务模式结构、运行方式和演化起到了重要作用。

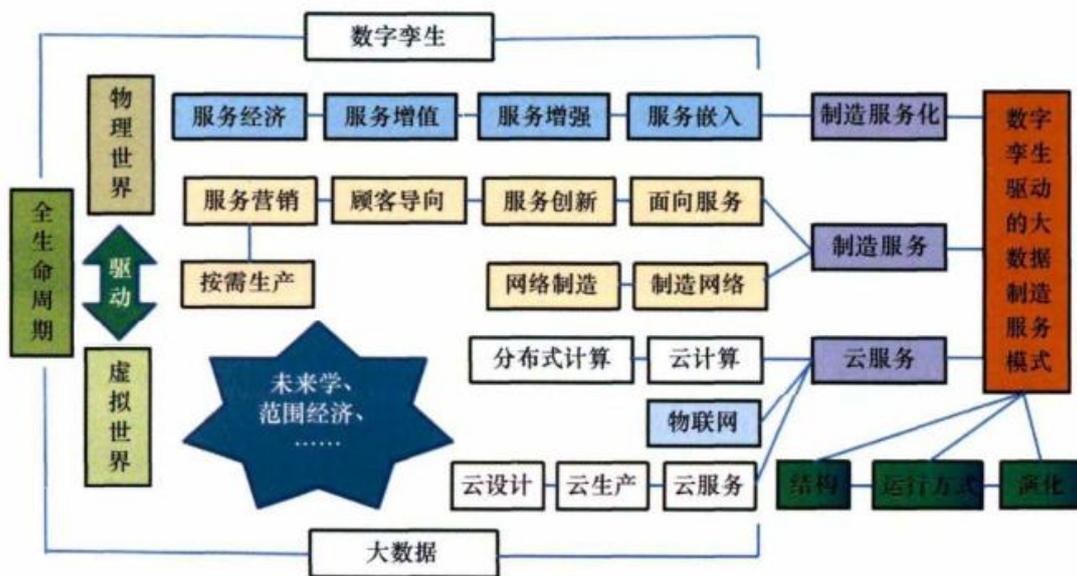


图 3 数字孪生驱动的大数据制造服务模式使能技术范围示意

从制造服务化维度来看,数字孪生相继经历了**服务经济、服务增值、服务增强及服务嵌入等阶段**。“服务经济”是美国经济学家维克托·福克斯(Victor R. Fuchs)在 1968 年对起始于 20 世纪 50 年代的全球经济结构性变革的称呼,也是第三产业在国家 GDP 中占比高的美国、英国等老牌资本主义国家的典型社会特征之一。“服务增值”是伴随着人类社会科学技术的飞速发展而诞生的,目前依然没有权威公认的定义,但其核心内容是:针对客户需要,在原有价值链各个环节为

客户提供超出常规服务（传统服务经济）范畴的服务，使价值链相应环节相对于以前有价值提升（原本没有价值增值的一些环节也由此而成为有效价值链的一环）。“服务增强”是在“服务增值”基础上，使价值链中产生价值增值的环节被突出出来，而且通过对该环节加大“投入”（人力或物力等），从而使得该环节客户满意度在原有基础上有进一步提高。“服务嵌入”是在“服务增强”基础上，把服务融入到价值链各个环节中，使服务成为相应环节的有机组成部分（一体化）。

此外，制造服务维度则可以进一步划分为**两条主线**，一条主线相对简单——**从网络制造向制造网络进化**，另一条主线则由**按需生产、服务营销、顾客导向、服务创新逐渐过渡到面向服务**；云制造维度，一条主线是物联网（当前常说的万物互联），另一条主线是从传统分布式计算向云计算演变。显然，对于任何制造服务模式而言，其结构、运行方式及演化路径都是相关研究的热点和重点。

4.1 数字孪生驱动的两个世界及其描述

如图 4 所示，从劳动者、物质资料和资金 3 要素入手，以订单聚合为起点（以客户需求为中心），探讨现有数字孪生和大数据技术融入该制造服务过程中可能存在的问题和困境；研究在传统制造企业进行转型升级过程中，有效解决当前所面临痛点（如上下游需求不透明、数据利用率低、产业共享信息少、行业趋势捕捉难等）所需要的理论和方法体系，深入了解和总结传统制造企业及其所在行业的发展过程和规律，尝试建构一个以行业信息整合为依托的数字孪生驱动的大数据制造服务新模式，提升中国传统制造企业应对复杂动态多变市场环境和全球性竞争的能力。

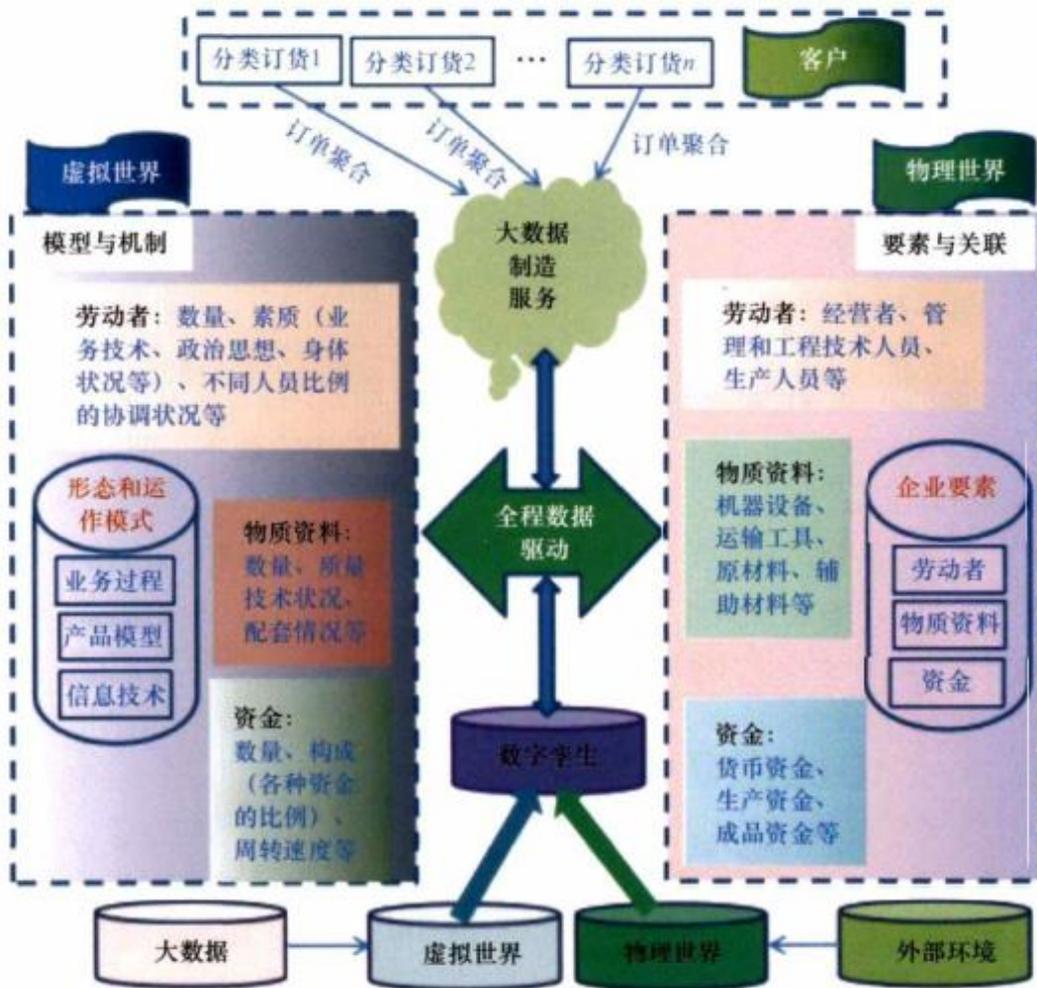


图 4 数字孪生驱动的两个世界及其关系示意

- 1) 在物理世界，以企业要素为节点，以企业体制、经营、管理、生产组织和技术系统的形态和运作模式为对象，通过企业结构单元化及其业务过程单元化，在单元粒度模型及其优化基础上，建立模块化企业结构及其业务过程单元化运行策略。
- 2) 在虚拟世界，进行劳动者、物质资料和资金的要素及其关联分析，提出物理世界中具体企业结构单元及其业务过程单元的映射方法，建立联通物理世界和虚

拟世界的数字孪生模型，实现两个世界的“一体化”。在虚拟世界里，物理世界的数字化构成了大数据。

4.2 数字孪生与大数据的结合

在图 2 中，数字孪生是大数据中数据获取的主要方式，数字孪生与大数据之间在数据类型等方面具有一致性，在某种程度上可以认为数据孪生是虚拟世界(大数据)和物理世界(设备等物质资料)之间的桥梁。换言之，如图 5 所示，企业通过链接虚拟世界和物理世界的数字孪生技术实现制造服务的全程数据驱动。

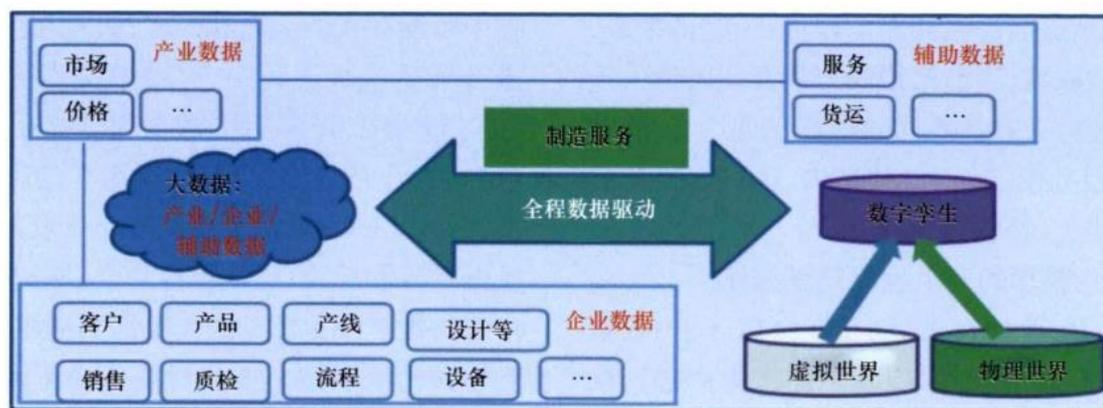


图 5 数字孪生与大数据结合示意

在图 5 中，大数据的数据来源主要包括 3 个方面：企业数据、产业数据（或说行业数据）、辅助数据。其中，企业数据是大数据最主要的来源，它涉及了该企业在产品全生命周期中各个环节的数据，包括了企业内所有信息系统中数据，如：企业资源规划（ERP），产品数据管理/产品全生命周期管理(PDM/PLM)，计算机辅助设计/制造/工程/服务/检测/工艺规划（CAD/CAM/CAE/CAT/CAPP），设备管理系统、财务和会计系统、销售和市场系统等；产业数据(或说行业数据)

主要指跨域企业边界的一些带有产业或行业特征的数据,如企业上下游拉动行业及其特征数据、市场规模、市场增长态势、市场占有率、市场定价机制、协调设计与制造、报废制度、回收体系等;辅助数据主要指前面两种数据之外的所有数据,包括售后服务数据、货运数据、行业生命周期、世界经济周期、上下游行业景气数据等。结合图 2、图 3,图 5 中制造服务在产品全生命周期各阶段全程由数据驱动来实现,其中进行全程数据驱动的数据环境是大数据,而大数据重要来源之一就是链接物理世界和虚拟世界的数字孪生;可以说,数字孪生帮助打造了大数据环境,而大数据环境对制造服务提供了全程数据服务。

4.3 大数据制造服务模式中模型建立与优化

普遍认为,人类在经历了 3 次工业革命(蒸汽技术革命、电力技术革命、计算机及信息技术革命)之后,物质生活取得了巨大的进步,人们已经从物质极度匮乏的时代(卖方市场时代)过渡到了产业过剩带来的自由选择的时代(买方市场时代),而第四次工业革命(以石墨烯、基因、虚拟现实、量子信息技术、可控核聚变、清洁能源及生物技术为技术突破口的工业革命,或者简称为智能化时代)将进一步加剧买方市场的竞争(从产品垂直深度、全球化地域广度等),其业务模型也发生了根本性的变化(图 6)。

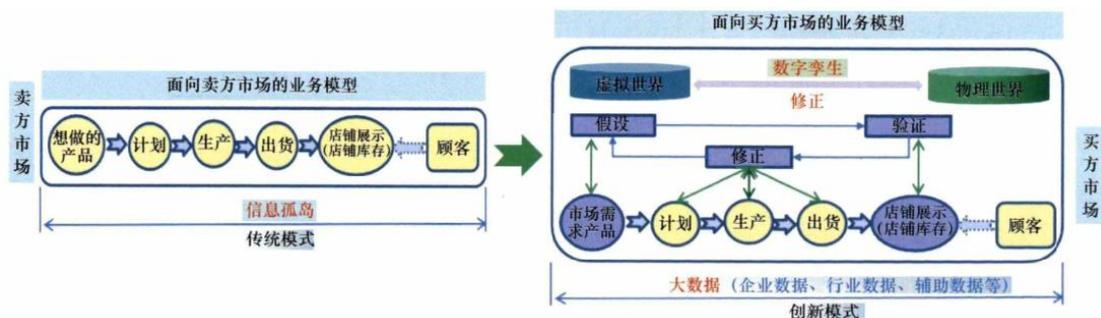


图 6 从传统模式向创新模式(大数据制造服务模式)转变示意

如图 6 所示,从产品全生命周期角度,在传统卖方市场环境下,产品生命周期各个阶段中时间流和信息流都是单一地往前,各个阶段形成了明显的信息孤岛,顾客也只有实体店(店铺展示)才能看到自己想购买的产品,没有办法对产品提出自己个性化的需求。而在买方市场环境下,产品全生命周期是一个不断地“假设—验证—修正—假设”的过程,产品全生命周期中各个阶段都在不断地与客户(个性)需求、市场(大类)需求等进行修正,该过程中链接物理世界和虚拟世界的数字孪生技术将不断地自动产生大量数据(如企业数据、行业数据、辅助数据等),进而完成大数据收集阶段工作(图 2);这里,模型建立和模型优化将成为其中关键。

1) 模型建立。大数据制造服务生态的主体主要是制造企业、服务企业、客户等,如何充分发挥该生态系统最大潜力,就需要构建这些系统成员之间链接而达成的动态网络模型,并以效能最大化等为目标,建立系统模型,该模型通常会具有分形特性,因此如何对其进行最优模块化也是其中一个关键问题。

2) 模型优化。研究上述模型中基本模块、必选模块和可选模块的动态划分,建立模块之间边界函数,在系统多约束条件下进行上述动态网络模型的优化,进而实现系统效能最大化;同时,建立围绕系统核心能力的适应性创新机制,使该系统对外界条件变化时可以自适应地作出相应的响应,并进而推动系统不断地自我完善与优化。

5. 结论

迄今文献里难以找到一个对于服务模式（更不用说制造服务模式）的权威或者说公认的定义，虽然已有众多文献在制造服务尤其是围绕生产性服务、服务与维护融合、数字孪生和大数据等方面进行了相关研究，并取得了一些成果（如制造模式种类层出不穷、数字孪生在一些大型设备领域应用较多、大数据应用已经深入到人们日常生活中），但是当前市场竞争环境（呈现国际市场竞争立体化新特点：竞争格局提升而情形更加复杂、要素流动更加自如等）对传统制造企业服务模式提出了新的要求。为此，**基于当前新技术大数据和数字孪生等，提出了一种数字孪生驱动的“大数据+业态”的新型服务模式，其特点主要表现在以下 4 个方面。**

1) 动态性。如由于随着企业自身信息化水平的提高，其产品全生命周期中各个环节的数据提取能力自然将变得更加强大，因此该模式中数字孪生模型将是一个开放的、不断与时俱进的动态演变模型。

2) 敏捷性。由于数字孪生技术将会对产品全生命周期中各个环节的任何变化及时地进行反应，使物理世界里的任何变化快速地在虚拟世界中得到反应，进而使该模式也能对周围环境的任何改变及时敏捷地作出响应。

3) 全局性。该模式中核心支撑技术是基于数字孪生的大数据环境，而该环境涉及产品全生命周期各环节，以及企业及其上下游所有与该模式具有关联的企业、产

业和辅助数据，其涵盖了产品、企业及其上下游各个方面或者说全局。

4) 适应性。无论是在卖方市场环境还是买方市场环境，“假设-验证-修正-假设”的闭环逻辑，使该模式中基于数字孪生技术的各种大数据模型的建立与优化能够适应社会科技的进步以及企业生存环境等的变化，自然也将把更多新涌现的新技术融入该模式中。

总之，该模式尝试把新技术数字孪生、大数据等融合起来，在实现物理世界和虚拟世界的互联、产品和服务的虚实映射等的同时，为产品全生命周期中各个环节上下游企业实现最大共赢提供新的思路和方法，也将有助于把“新基建”之一的工业互联网与制造服务有机结合起来，解决传统制造企业转型升级社会问题，推动中国经济高质量发展。

作者简介：李仁旺，浙江理工大学机械与自动控制学院教授，研究方向为智能制造及其服务模式；肖人彬，华中科技大学人工智能与自动化学院教授，研究方向为制造系统工程与复杂产品设计。

参考文献

- [1] 肖人彬,林文广.数据驱动的产品创新设计研究[J].机械设计,2019,36(12):1-9.
- [2] 路甬祥.推动制造业高质量发展加快建设制造强国[J].中国科技产业,2018(8):10-11.
- [3] 周济.智能制造是“中国制造 2025”主攻方向[J].企业观察家,2019(11): 54-55.
- [4]谭建荣.智能制造与数字孪生:关键技术与发展趋势[J].互联网经济,2019(10):40-43.

- [5] 庄存波,刘俭华,熊辉,等.产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J].计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.
- [6] Tao F,Cheng J,Qi Q,et al.Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2018,94(9-12): 3563-3576.
- [7] Helu M,Joseph A,Hedberg J T.A standards-based approach for linking as-planned to as-fabricated product data[J].CIRP Annals,2018,67(1):487-490.
- [8] 顾新建, 李晓, 祁国宁, 等.产品服务系统理论和关键技术探讨[J].浙江大学学报工学版, 2009,43(12):2237-2243.
- [9] 刘振宇, 李浩, 程江峰, 等.数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.
- [10] 肖静华,谢康,迟嘉昱.智能制造、数字孪生与战略场景建模[J].北京交通大学学报(社会科学版), 2019,18(2):69-77.
- [11] Drucker P F. The emerging theory of manufacturing[J].Harvard Business Review, 1990,19(3):123-145.
- [12]董明,苏立悦.大规模定制下基于本体的产品服务系统配置[J].计算机集成制造系统, 2011, 17(3):653-661.
- [13] Phumbua S,Tjahjono B.Towards product-service systems modelling: A quest for dynamic behaviour and model parameters[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(2): 425-442.
- [14] Song W,Ming X,Han Y,et al.An integrative framework for innovation management of product-service systems-International Journal of Production

Research,2015,53(8):2252-2268.

[15] Zhang X,Kloosterman R C.Connecting the "workshop of the world":Intra-and extra-service networks of the Pearl River Delta city-region[J]. Regional Studies,2016, 50(6):1069-1081.

[16] 罗建强,吴启飞.供需交互视角下的产品服务系统方案配置[J].计算机集成制造系统, 2019, 25(4):1-16.

[17] 战德臣,程臻,赵曦滨,等.制造服务及其成熟度模型[J].计算机集成制造系统, 2012, 18(7):1584-1594.

[18] 周灼,苑明海,孙超,等.云制造服务平台系统的设计与开发[J].计算机技术与发展, 2018(3):1-6.

[19]王京,陈伟,高长元,等.云制造联盟——一种基于信息服务平台的新型制造业组织模式[J]. 科学管理研究, 2018,36(6):62-65.

[20] 张富强,江平宇,郭威.服务型制造学术研究与工业应用综述[J].中国机械工程, 2018, 29(18): 2144-2163.

[21] 陶飞,戚庆林.面向服务的智能制造[J].机械工程学报, 2018,54(16):11-23.

[22] 齐晓轩,夏国钦,时巍,等.服务型制造发展展望与对策建议[J].产业创新研究,2019(12): 200-201.

[23] Cieslik A, Michatek J J, Gauger I.Regional dimension of firm level productivity determinants: The case of man-ufacturing and service firms in Ukraine[J].Central Euro-pean Economic Journal,2019,5(1):81-95.

[24] Greenfield H I. Manpower and the growth of producer services[R].New York: Economic Development,1966:55-76.

- [25] 贺正楚,潘红玉,寻舸,等.高端装备制造企业发展模式变革趋势研究[J].管理世界,2013(10)178-179.
- [26] Nell C.From craft to mass production[M].Berlin:Spring-er International Publishing, 2019.
- [27] 汪应洛,孙林岩,黄映辉.先进制造生产模式与管理的研究[J].中国机械工程,1997, 8(2): 63-73.
- [28] Tuunanen T,Cssab H.Service process modularization: Reuse versus variation in service extenisions[J].Journal of Service Research,2011,14(3):340-354.
- [29] Hoffmann M.Flexible mmanufacturing based on autono-mous,decentralized systems[M].Berlin:Springer Fachmedien Wiesbaden,2019.
- [30] Orio G,Barata J,Sousa C, et al.The ProFlex methodolo-gy: Agile manufacturing in practice[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [31] Geum Y J,Kwak R, Park Y. Modularizing services: A modified HoQ approach[J]. Computers & Industrial Engi-neering. 2012, 62(2): 579-590.
- [32] Berggren C.Alternatives to lean production[M].New York:Cornell University Press, 2019.
- [33] Candelo E.Mass customization:Another marketing breakthrough[M].Berlin: Springer International Publish-ing,2019.
- [34] 王保利,杨欣.制造企业服务增强对技术创新及企业绩效的影响[J].科技进步与对策, 2020(1):1-8.
- [35] 赵云辉,张哲,冯泰文,等.大数据发展、制度环境与政府治理效率[J].管理世界, 2019(11): 119-132.

[36] 韩箫亦,董京京,许正良.制造企业动态能力对其服务智能化绩效影响的研究[J].工业技术经济, 2020(2):119-124.

[37] 高清,张进福.绿色制造法律制度的构建[J].商场现代化, 2008(2):285-286.

[38] 林强,许文婷,杨承德,等.制造企业供应链的契约制度探析[J].天津大学学报(社会科学版), 2009,11(3):197-201.

[39] 吉鸿荣.基于生产者责任延伸制度的知识服务链模式研究[J].物流技术, 2016,35(7):33-37.