

第一部分

数字孪生技术发展趋势

人类社会进入 21 世纪 20 年代，世界正处于百年未有之大变局，在变局和危机中，数字化转型和智能化升级已经成为推动各行各业转型升级的关键因素，也成为世界各国关于未来全球发展的共识。作为我国的重点发展战略，“数字中国”最基础的技术驱动因素就是数字化和智能化。

经过近 20 年的发展，数字孪生技术正从制造业走入千行百业，走进普罗大众的生活。数字孪生城市是基于数字孪生技术的城市发展新理念与新模式，对其概念的认识正逐渐清晰。

2002 年，“信息镜像模型”概念首次提出，初步描绘数字孪生概念。Michael Grieves（迈克尔·格里夫斯）教授在美国密歇根大学任教时首次提出“镜像空间模型（Mirrored Spaces Model）”概念，并于 2006 年发表著作明确为“信息镜像模型”，即在虚拟空间构建一套数字模型，可以与物理实体进行交互映射，完全描述物理实体全生命周期的运行轨迹。

2012 年，“数字孪生与数字孪生体”定义首次被提出，之后在工业中开展应用。受美国航空航天局阿波罗计划（NASAS Apollo program）启发，E.H.Glaessen&D.S.Stargel 首次给出了数字孪生的定义：数字孪生是指充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据，集成多学科、多尺度的仿真过程，它作为虚拟空间中对实体产品的镜像，反映了相对应物理实体产品的全生命周期过程。

2017 年，“数字孪生城市”理念首次被提出，并用于智慧城市规划建设。中国信息通信研究院首次提出数字孪生城市概念，即基于数字化标识、自动化感知、网络化连接、普惠化计算、智能化控制、平台化服务的信息技术体系，在数字空间再造一个与物理城市匹配对应的数字城市，全息模拟、动态监控、实时诊断、精准预测城市物理实体在现实环境中的状态，推动城市全要素数字化和虚拟化、全状态实时化和可视化、城市运行管理协同化和智能化，实现物理城市与数字城市协同交互、平行运转。

2017 年，“智慧城市数字孪生体”概念被提出。佐治亚理工学院从城市平

台角度提出，智慧城市数字孪生体是一个智能的、支持物联网、数据丰富的城市虚拟平台，可用于复制和模拟真实城市中发生的变化，以提升城市的韧性、可持续发展性和宜居性。

2018年，“数字孪生五维模型”初步提出并构建。北京航空航天大学陶飞教授提出了物理实体、虚拟实体、服务、孪生数据、连接的数字孪生的五维模型，并认为数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型。借助数据模拟物理实体在现实环境中的行为，通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段，为物理实体增加或扩展新的能力。

2019年之后，“数字孪生城市”概念被广泛推广和普遍认可。从历次概念的提出和演进上来看，数字孪生城市是“数字孪生”概念用于智慧城市建设的一种新模式，即在数字空间再造一个与现实世界一一映射、协同交互的复杂巨系统，实现城市在物理维度和数字维度的虚实互动。

数字孪生作为通用目的技术，以多维模型和融合数据为驱动，通过实时连接、映射、分析、交互来刻画、仿真、预测、优化和控制物理世界，使物理系统的全要素、全过程、全价值链达到最大限度的优化。数字孪生与各产业的深度融合能够有力推动各产业的数字化、网络化、智能化发展进程，成为产业变革的强大助力。数字孪生契合了我国以信息技术为产业转型升级赋能的战略需求，成为了应对当前百年未有之大变局的关键因素。数字孪生日益成为各界研究热点，应用发展前景广阔。

本章先简单回顾数字孪生发展的历史，并通过对其不同发展阶段的侧重点分析明确当下数字孪生概念的内涵与外延，之后再针对当前企业数字化系统现状及存在的问题，说明数字孪生如何整合多元技术，并更高效地加速企业的数字化转型和智能化升级，最后阐述作为通用目的技术的数字孪生怎样成为奠定全社会数字化、网络化、智能化发展的基石。

1.1 数字孪生的前世今生

在20世纪60年代，美国宇航局（NASA）实施了一系列载人登月任务，简称阿波罗计划（Apollo Program），目的是实现载人登月飞行，对月球进行实地考察。在阿波罗计划中，NASA建设了一套完整的、高水准的地面半物理仿真系统，用于培训宇航员和操控人员所用到的全部任务操作。这些功能各式各样的模拟器，由联网的多台计算机控制，其中十台模拟器被联网用来模拟一个单独的问题空间，指令舱模拟器用了四台计算机，登月舱模拟器用了三台计算机，

如图 1-1 所示。在模拟培训中，真实的事物只有乘员、座舱和任务控制台，其他所有的一切，都是由一堆计算机、许多的公式以及经验丰富的技术人员仿真创造出来的。

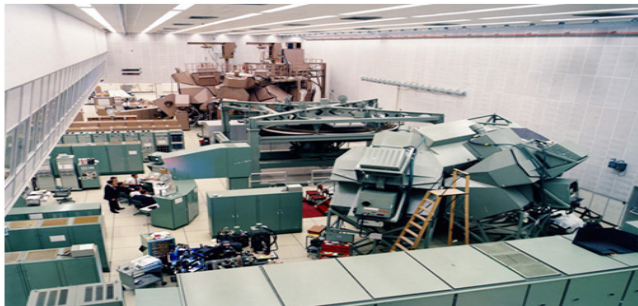


图 1-1 前部的是登月舱模拟器，后部的是指令舱模拟

NASA 在其特定的工程实践中认识到了建设物理孪生的重要性。随着计算机、网络技术的高速发展，特别是软件技术与仿真技术的高度发展，使得各种物理孪生对象，从功能上、行为上完全可以用计算机系统进行仿真替代。首先在汽车、飞机等复杂产品工程领域出现的“数字样机”的概念，就是对数字孪生的一种先行实践活动。数字样机最初是指在 CAD 系统中通过三维实体造型和数字化预装配后，得到一个可视化的产品数字模型，可用于协调零件之间的关系，进行可制造性检查，因此可以基本上代替物理样机的协调功能。但随着数字化技术的发展，数字样机的作用也在不断增强，人们在预装配模型上进行运动、人机交互、空间漫游、机械操纵等飞机功能的模拟仿真。之后又进一步与机器的各种性能分析计算技术结合起来，使之能够模拟仿真出机器的各种性能。

20 世纪，这些计算机仿真与设计软件的积累，为数字孪生的出现奠定了技术基础，从而使得在进入 21 世纪后，随着产品生命周期管理的加强与传感技术的兴起，数字孪生的概念被提出，并经历了孵化期、探索期，直至当前的爆发期。

1.1.1 孵化期（2000—2015年）

NASA 基于其成功的工程实践，在 2010 年发布的 Area 11 技术路线图的 Simulation-Based Systems Engineering 部分中，首次提出了数字孪生（Digital Twins）的概念：数字孪生是一种集成化了的多种物理量、多种空间尺度的运载工具或系统的仿真，该仿真使用了当前最为有效的物理模型、传感器数据的更新、飞行的历史等，来镜像出其对应的飞行当中孪生对象的生存状态。

NASA 提出数字孪生概念，有明确的工程背景，即服务于自身未来宇航任

务的需要。NASA 认为基于 Apollo 时代积累起来的航天器设计、制造、飞行管理与支持等方式方法（相似性、统计模式的失效分析、原型验证等），无论在技术方面还是在成本方面等，均不能满足未来深空探索（更大的空间尺度、更极端的环境、更多未知因数）的需要，需要找到一种全新的工作模式，称为数字孪生。NASA 的数字孪生基于其之前的宇航任务实践经验，以及未来完成的宇航任务，涉及天上、地下、材料、结构、机构、推进器、通信、导航等众多专业，是一个极其复杂的系统工程，所以，NASA 更强调上述内容的集成化的仿真，从某种意义上，是其系统工程方法的落脚点。换个看问题的角度，NASA 的数字孪生，就等同于其基于仿真的系统工程。

另一个更具工程应用意义的数字孪生是 2009 年美国空军研究实验室 AFRL 发起的一个“机身数字孪生”项目，简称 ADT。该项目综合了每架飞机制造时的机身静态强度数据、每架飞机的飞行历史数据，以及日常运维数据，采用仿真的方法，来预测飞机机身的疲劳裂纹，实现了飞机结构的寿命管理，有效地提高了机身运维效率，以及机身的使用寿命。该项工作发表在 2011 年 Tuegel EJ 等人撰写的文章 *Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin* 中。

在军工制造领域进行数字孪生应用实践的同时，学术界也进行了更具有理论色彩的数字孪生技术探讨。2002 年 Michael Grieves 在密歇根大学为产品生命周期管理 PLM 中心成立而发表的演讲中，首次提出的 PLM 概念模型中出现了现实空间（Real Space）、虚拟空间（Virtual Space），从现实空间到虚拟空间的数据流（Data Process），从虚拟空间到现实空间的信息流（Information Process），以及虚拟子空间的表述，如图 1-2 所示。

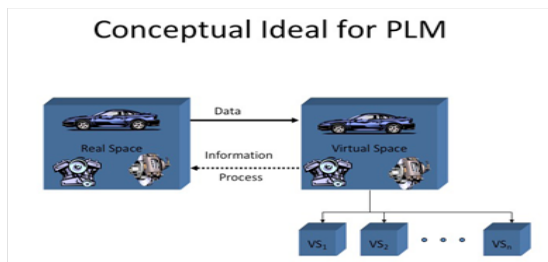


图 1-2 产品生命周期管理概念模型

按 Michael Grieves 的说法，这已经具备了数字孪生的所有要素。该模型在随后的 PLM 课程中，被称为镜像空间模型（Mirrored Spaces Model），而在其 2006 年发表的著作 *Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking* 中被改称为信息镜像模型。2011 年，Michael Grieves 发表的著

作 *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management* 中引入了术语“数字孪生”，以描述信息镜像模型的合作者的方式附属于该信息镜像模型。之后 Michael Grieves 在 2014 年撰写的一份白皮书 *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication* 中提到，这归功于与他一起工作的就职于 NASA 的 John Vickers。

到了 2016 年，Michael Grieves 与 John Vickers 合写的 *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems* 文章中提出了数字孪生的类型（Digital Twin Prototype, DTP）、数字孪生的实例（Digital Twin Instance, DTI）、数字孪生的集合（Digital Twin Aggregate, DTA）、数字孪生的环境（Digital Twin Environment, DTE）等概念。同时将数字孪生可以解决的问题进行了分类：

- 第一类是 Predicted Desirable (PD)，预计得到的期望的结果。
- 第二类是 Predicted Undesirable (PU)，预计得到的非期望的结果。
- 第三类是 Unpredicted Desirable (UD)，未预料到的期望的结果。
- 第四类是 Unpredicted Undesirable (UU)，未预料到的非期望的结果。

尽管 Michael Grieves 在 2016 年文章中称其首先给出了数字孪生的概念，但行业内对谁先提出这个概念还是存在一些争议的。事实上，Michael Grieves 在 2014 年发表的白皮书，以及 2011 年出版书的时间落后于 NASA 在 2010 年发表技术路线图的时间。但不可否认的是 Michael Grieves 在数字孪生的理论方法方面做出的突出贡献，尤其是其归纳总结出了的现实空间、虚拟空间的数据或信息的交互，以及映像或镜像，构成了数字孪生方法论方面的基础。特别是他对数字孪生可以解决的现实问题的划分，非完美且优雅，基本上覆盖了数字孪生的作用范围。Michael Grieves 在数字孪生方面的理论方面的工作，对数字孪生的普及应用，起到了至关重要的作用。

1.1.2 探索期（2015—2020年）

2013 年的汉诺威工业博览会上德国提出了工业 4.0 概念，旨在提升制造业的智能化水平，希望在新一轮工业革命中占领先机，建立具有适应性、资源效率及基因工程学的智慧工厂，在商业流程及价值流程中整合客户及商业伙伴。随着工业 4.0 步伐的加速，产品生命周期管理 PLM 显得越发重要。PLM 是从产品需求开始到产品淘汰报废的全部生命历程，旨在提供有效的手段为企业创造收入，降低成本。传统的管理模式大多仅针对产品的单个信息维度或多个信息维度进行建模仿真，存在信息反映不全面、实时交互性差以及管理低效等问题。

如何构建与实际产品完整且有效的交互体系已成为工业 4.0 发展的关键。

在此背景下，数字孪生自 2015 年后逐步成为跨国企业业务布局的新方向，领头的公司有西门子、达索、PTC 以及 ESI。而且每个公司所主要布局的领域也并不完全相同，西门子侧重于生产过程以及工艺布局规划，达索则侧重于产品研发的生命周期，PTC 则在 AR 领域持续发力，ESI 则在危险环境场所的混合孪生技术方面深耕。值得一提的是美国通用电气公司借助数字孪生这一概念，提出物理机械和分析技术融合的实现途径，让每个引擎，每个涡轮，每台核磁共振都拥有一个数字化的“双胞胎”，并通过数字化模型在虚拟环境下实现机器人调试、试验、优化运行状态等模拟，以便将最优方案应用在物理世界的机器上，从而节省大量维修、调试成本。德国软件公司 SAP 基于 Leonardo 平台在数字世界打造了一个完整的数字化双胞胎，在产品试验阶段采集设备的运行状况，进行分析后得出产品的实际性能，再与需求设计的目标比较，形成产品研发的闭环体系。而在中国也不乏这样的案例。在 2019 年 12 月，被誉为“世纪工程”的中俄东线天然气管道工程正式投产通气，得到了中俄两国元首的热烈祝贺和高度评价。作为中国首条“智能管道”样板工程，中俄东线管道工程就构建了一个“数字孪生体”，实现了在统一的数据标准下开展可研、设计、采办和施工。随着运营动态数据的不断丰富，“数字孪生体”将跟随管道全生命周期而共同生长。

国际咨询公司 Gartner 在 2017 年、2018 年和 2019 年连续三年将数字孪生列为十大技术趋势之一（如图 1-3 所示），对数字孪生的火热起到了推波助澜的作用。其将数字孪生定义为对象的数字化表示。进而将数字孪生分为了三类。

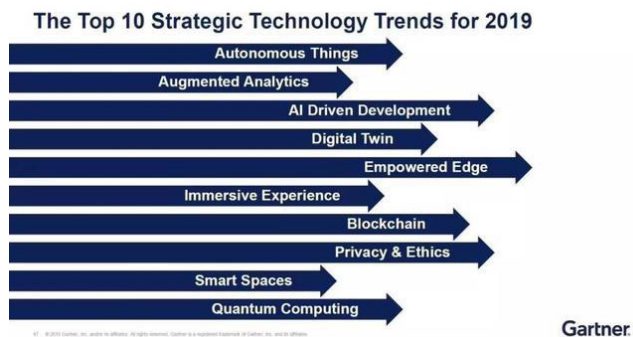


图 1-3 Gartner 2019 年十大战略技术趋势

- 离散数字孪生（Discrete Digital Twins）：单个产品/设备，人或任务的虚拟复制品，用于监视和优化单个资产、人和其他物理资源。

- 复合数字孪生（Composite Digital Twins）：用于监视和优化关联在一起的离散数字孪生的组合使用，如轿车和工业机器这样的多部件系统。
- 组织数据孪生（Digital Twins of Organizations, DTOs）：DTOs是复杂与大型实体的虚拟模型，由它们组成部分的数字孪生构成。DTOs用于监视与优化高级业务的性能。

Gartner 在实践中更为重视物联网 IoT 领域中数字孪生的应用。据其内部的一个调查统计，在所有计划实施 IoT 的企业中，59% 已经实施了或正在实施的数字孪生。这个比例，与 Gartner 在 2017 年、2018 年新兴技术成熟度曲线中将数字孪生的定位相比较而言，落地得实在是快了些，让人感到一些诧异。也许正因为此，Gartner 没有将数字孪生列入 2020 年的十大技术趋势。但事实上，数字孪生在 2020 年的关注度却再创新高。

1.1.3 爆发期（2020年以来）

进入 21 世纪 20 年代以来，数字孪生已广泛被全球各行业、各背景、各层次的专家、学者和企业研究与应用，当前数字孪生已得到了十多个行业关注并开展了应用实践。除在制造领域被关注和开展了较多的应用探索和落地实践外，近年来数字孪生还被应用于电力、医疗健康、城市管理、铁路运输、环境保护、汽车、船舶、建筑等领域，并展现出巨大的应用潜力。

文献统计分析表明，当前全球 50 多个国家、1000 多个研究机构、上千名专家学者开展了数字孪生的相关研究并有研究成果发表，其中包括德国、美国、中国、英国、瑞典、意大利、韩国、法国、俄罗斯等科技相对发达的国家的研究机构与一流企业。随着不断深入的研究，数字孪生作为物理世界和数字空间交互的概念体系，既是一种新技术，也成为一种新范式。自 2009 年正式被提出以来，经过十多年时间的发展，数字孪生体已经演化为一个新产业。

在产业数字化转型的过程中，传统基于虚拟仿真和启发式的工程方法虽然可以满足诸如车辆认证、车队管理、运维等场景的基本需要，但却并不是最有效的方法，因为虚拟仿真只能解决可以预计或经历过的问题，对于“不知道的未知问题”（Unknown Unknowns）则毫无办法，而这个问题对于具有高可靠性要求的航空航天设备，大部分时候是致命的。

作为新一代通用目的技术（General-Purpose Technologies, GPT），数字孪生本质上具有降维特征。从人参与的角度来看，人与机器的协作是高维度的自动化，人与信息系统的协作是中维度的自动化，而机器与机器之间进行协作则是低维度的自动化，这是数据驱动的数字孪生的最大特点。降维作为数字孪生

体的本质特征，体现为颗粒度更小的数据驱动。数字孪生要求围绕数据来设计和运行，最近十年物联网、数据科学和人工智能等新一代信息技术快速发展，可以保证实时数据的获取和处理，这为数字孪生工程应用提供了基本条件。从技术上实现从人到信息再到数据的降维，促成数据自动化（Data Automation），最终可以实现系统级的自感知设备及产品。

从通用目的技术驱动经济增长规律来说，数字孪生降维策略将在企业战略规划中发挥巨大的作用。颠覆性创新强调从满足性能较低的需求开始，探索一条增长速度更快的新路径，随着时间的推移，这条路径提供的高性能将超越传统路径提供的性能要求，数字孪生就是迭代传统工业技术的新路径。数字孪生降维策略符合技术革命和经济增长的规律，可满足第四次工业革命发展的需要，它需要通过重点解决技术革命所需的基础设施问题，以加快技术的成熟和产业化发展。作为一种新型通用目的技术，数字孪生将遵循三个阶段的规律：第一阶段为发现通用目的技术；第二阶段为企业获得模板；第三阶段为在特定领域加以应用。

经过十多年时间的发展，数字孪生产业已经进入了一个新阶段，中国作为后发国家，加强数字孪生基础设施建设具有特别意义。国家发改委和中央网信办在2020年4月7日发布的《关于推进“上云用数赋智”行动 培育新经济发展实施方案》中，明确提出了“数字孪生创新计划”，这也成为了中国的数字孪生战略，并极大地促进了数字孪生技术的发展及其在各行各业的创新应用。

1.2 数字孪生的内涵与外延

数字孪生是一个伴随着计算机技术不断发展的，一个长期的、综合的、动态的、不断进化的过程。Gartner自2017年开始，将数字孪生纳入其十大新兴技术专题进行了深入研究，以下是不同年度Gartner对数字孪生的解释。

2017年：数字孪生是实物或系统的动态软件模型，在3~5年内，数十亿计的实物将通过数字孪生来表达。通过应用实物的零部件运行和对环境做出反应的物理数据，以及来自传感器的数据，数字孪生可用于分析和模拟实际运行状况，应对变化，改善运营，实现增值。数字孪生所发挥的作用就像一个专业技师和传统的监控和控制器（例如压力表）的结合体。推进数字孪生应用进行文化变革，结合设备维护专家、数据科学家和IT专家的优势，将设备的数字孪生模型与生产设施、环境，以及人、业务和流程的数字表达结合起来，实现对现实世界更加精确的数字表达，从而实现仿真、分析和控制。

2018年：数字孪生是现实世界实物或系统的数字化表达。随着物联网的广泛应用，数字孪生可以连接现实世界的对象，提供其状态信息，响应变化，改善运营并增加价值。

2019年：数字孪生是现实生活中物体、流程或系统的数字镜像。大型系统，例如发电厂或城市也可以创建其数字孪生模型。数字孪生的想法并不新，可以回溯到用计算机辅助设计来表述产品，或者建立客户的在线档案，但是如今的数字孪生有以下四点不同——模型的健壮性，聚焦于如何支持特定的业务成果；与现实世界的连接，具有实现实时监控和控制的潜力；应用高级大数据分析和人工智能技术来获取新的商机；数字孪生模型与实物模型的交互，并评估各种场景如何应对的能力。

2020年：估计将有210亿个传感器和末端接入点连接在一起，在不久的将来，数十亿计的物体将拥有数字孪生模型。Gartner公司副总裁David Cearley指出，通过维修、维护与运营（MRO）以及通过物联网提升设备运营绩效，有望节省数十亿美元。

从上述分析中可以看出，Gartner对于数字孪生的理解也有一个不断演进的过程，而数字孪生的应用主体也不局限于基于物联网来洞察和提升产品的运行绩效，而是延伸到更广阔的领域，例如工厂的数字孪生、城市的数字孪生，甚至组织的数字孪生。因此，本书也针对综合业界的主流观点进行分析，并明确我们所理解的内涵及外延。

1.2.1 百家争鸣

为了更全面地理解数字孪生的含义，首先来看看独立的咨询或研究机构的学术观点。全球著名的PLM研究机构CIMdata认为数字孪生模型不可能单独存在；可以有多个针对不同用途的数字孪生模型，每个都有其特征，例如数据分析数字孪生模型、MRO数字孪生模型、财务数字孪生模型、工程孪生模型以及工程仿真数据孪生模型；每个数字孪生模型必须有一个对应的物理实体，数字孪生模型可以而且应该先于物理实体而存在；物理实体可以是工厂、船舶、基础设施、汽车或任何类型的产品；每个数字孪生模型必须与其对应的物理实体有某些形式的数据交互，但不必是实时或电子形式。

此外德勤认为数字孪生是以数字化的形式对某一物理实体过去和目前的行为或流程进行动态呈现。埃森哲认为数字孪生是指物理产品在虚拟空间中的数字模型，包含从产品构思到产品退市全生命周期的产品信息。而北京航空航天大学的陶飞教授指出，当前对数字孪生存在多种不同的认识和理解，目前尚未

形成统一共识的定义，但物理实体、虚拟模型、数据、连接和服务是数字孪生的核心要素。另外在赵敏先生和宁振波先生撰写的《铸魂：软件定义制造》一书中指出，数字孪生是实践先行，概念后成；数字孪生模型可以与实物模型高度相像，而不可能相等；数字孪生模型和实物模型也不是一个简单的的一对一的对应关系，而可能存在一对多、多对一、多对多，甚至一对少、一对零和零对一等多种对应关系。赛迪提出了数据、模型、软件这三大技术要素，认为“数据是基础，模型是核心，软件是载体”，这是实现数字孪生的技术链，如图 1-4 所示。

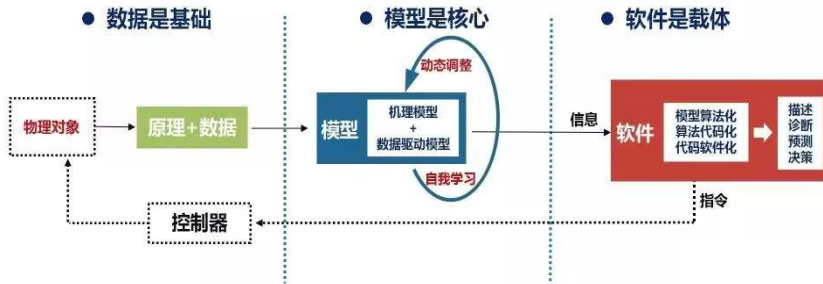


图 1-4 赛迪对数字孪生的定义

工业界基于自身的实践，各个企业也对数字孪生有不同的认知。GE Digital 认为数字孪生是资产和流程的软件表示，用于理解、预测和优化绩效以改善业务成果。数字孪生由三部分组成：数据模型、一组分析工具或算法，以及知识。西门子认为数字孪生是物理产品或流程的虚拟表示，用于理解和预测物理对象或产品的性能特征。数字孪生用于在产品的整个生命周期，在物理原型和资产投资之前模拟、预测和优化产品和生产系统。SAP 认为数字孪生是物理对象或系统的虚拟表示，但其不仅仅是一个高科技的外观。数字孪生使用数据、机器学习和物联网来帮助企业优化、创新和提供新服务。PTC 认为数字孪生正在成为企业从数字化转型举措中获益的最佳途径。对于工业企业，数字孪生主要应用于产品的工程设计、运营和服务中，以带来重要的商业价值，并为整个企业的数字化转型奠定基础。

工业 4.0 研究院 2015 年启动对数字孪生体的研究，在相继完成了《数字孪生体发展史》、《数字孪生关键技术》、《数字孪生体演进》和《数字孪生体标准》等主题研究后，形成了系统的知识体系，并提出了知名的三大流派（仿真派、连接派和数据派）判定。在此基础上，工业 4.0 研究院进一步设计了数字孪生体三大基本策略，即基于仿真的数字工程（Simulation-Based Digital Engineering）、物联网平台（IoT Platform）和数据驱动（Data-Driven）等策略。

事实上，基于仿真的数字工程开始成为复杂系统建设的标配，并逐渐用数字孪生体进行描述。航空航天、汽车和石油化工等高价值领域有较大投资冲动应用新技术，数字孪生技术跟它们的需求匹配度高，这些企业通常早就应用了 CAx，转向数字孪生体就成为顺理成章的事情。利用基于仿真的数字工程，在产品设计和生产现场交互上产生较好的效果，通常体现为产品数据管理（Product Data Management, PDM）或产品生命周期管理（Product Lifecycle Management, PLM），供应商为了获得更多收入，大都会推介其仿真功能。工业领域的仿真功能涉及基础科学知识，例如物理学、化学或生物学等，这给企业带来巨大的成本，除非企业产品利润特别高，否则没有必要采用基于仿真的数字工程策略，它们还有物联网平台策略和数据驱动策略可以应用。

2015年，美国几家知名咨询公司发现通用电气采用数字孪生体来构建工业互联网技术体系，以便跟工业自动化体系融合起来，于是纷纷发布预测报告，把数字孪生体称为未来的技术。例如，Gartner、IDC等IT咨询公司发布了多份报告，直接推动了数字孪生体热潮。随着大量企业介入工业互联网应用，云服务模式相对较为成熟，对应过来就成为工业互联网平台，因此，“平台”逐步成为工业互联网体系架构中的一种重要元素，逐步替代了不宜落地的“数据”功能体系。2020年4月23日，信通院发布了《工业互联网体系架构2.0》报告，在报告中，数字孪生体成为了数据功能实现的“关键支撑”。至此，数字孪生体连接派的理论体系已经成型，采用该体系架构的企业通常选择“物联网平台策略”，把物联网平台建设放到价值创造核心地位。需要指出的是，物联网平台策略对是否采用仿真没有要求，这需要企业根据自身情况选择，事实上，大部分企业并不需要仿真级别的数据呈现，它们大都需要有一个好看的几何模型即可。

以生产制造为核心的工业，基于物理学、化学、生物学等多学科建模仿真是前提，这是数字孪生体产生之初的主要需求，后来随着物联网感知带来网络化，改变了价值创造点。在物联网基础上，可实现远程可视化和一定的预测分析，成为物联网平台模式。而对于非制造业的能源、建筑、城市、农业等领域，仿真不是刚需，或者因为成本太高而变成多余的功能，这些应用场景的根本需求是利用数字孪生体，建立一套“数据驱动”（Data-Driven）的数字工程。采用数据驱动策略的企业，遵循的分析框架不同，价值创造方式自然也不一样，人工智能和大数据改变了传统工程科学工作方式。

2019年12月19日，由中国电子信息产业发展研究院推出的《数字孪生白皮书（2019）》，在通信产业大会暨第十四届通信技术年会上正式发布，白皮书认为数字孪生是综合运用感知、计算、建模等信息技术，通过软件定义，对

物理空间描述、诊断、预测、决策，进而实现物理空间与赛博空间的交互映射。

制造业专家朱铎先在其与他人合著的《三体智能革命》一书中认为，作者群体以东方文化视角，创造性地提出了物理实体、意识人体和数字虚体，以及三体联接、三体融合的智能演化路径，该模型也可以对数字孪生进行很好的解读。从三体智能模型视角来看（如图 1-5 所示），数字孪生是在数字虚体崛起的大背景下，以近乎无所不在的传感、无所不在的数据、无所不在的网络、无所不能的算力、无所不能的算法、无所不能的智能，基于意识人体的创想（创意和想法），通过数字虚体，解决意识人体不愿、不善、不能的问题，充分发挥与实现意识人体独特的创想能力，在物理实体世界，优化产品性能及研发/制造/服务过程，以获得更高的效率、更优的质量与更好的用户体验，根本目的是提升企业竞争力。

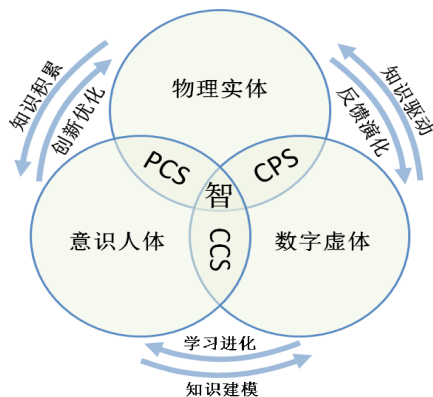


图 1-5 三体智能模型

以航空发动机为例，其设计制造过程首先是在人的大脑中进行构思，然后在计算机中通过 CAD/CAE/CAM/PLM/ERP/MES 等信息化系统进行数字化的设计、分析、加工和管理，经过迭代优化，在物理空间通过机床加工成型，最终装配与调试成所需产品。在这个过程中，最初的创想来自意识人体，最重要的过程是在数字虚体中孕育与发生，经过反复仿真和优化，最后以物理实体的形式体现最终价值。

因此，数字孪生价值不仅仅在于虚实两个空间的映射，也不仅仅是通过仿真实现对物理实体的模拟，更重要的是在数字虚体中对产品结构、制造过程、管理流程等环节进行优化，以最优决策驱动物理实体产生。“形（外观）象”是数字孪生的外在特征，“神（机理）象”是数字孪生的内在逻辑，而产生“形象”“神象”的优化迭代是数字孪生的价值根本。如果一套系统只是一味强调或只能做到“形象”，而没有通过在数字虚体中对物理实体/业务流程进行优化，其价值是有限的，不是一套真正意义上的数字孪生系统。基于此朱铎先将数字

孪生总结为以下几句话：源于意识人体，孕于数字虚体，生于物理实体；形式是映射，内涵是仿真，本质是优化；无优化，不孪生。

1.2.2 数字孪生内涵

综合业界观点，从数字化系统软件工程的角度来看，我们认为数字孪生是人类将自身对物理世界的认知模型通过软件定义所构建的一类具有自组织特性的智能化数字系统。物理世界中的人、机、物等被作为整体所观察的单体对象将被构建为数字孪生体，而实例化的单体对象之间的关联与交互将通过数字线程刻画，最终在人类意识的主导下形成数字世界与物理世界的孪生映射关系。

1. 数字孪生体

数字孪生体是人类将自我意识中现有或将有的物理实体对象进行数字化建模，以软件定义的方式呈现的数字化生命体。它不仅可以使人类通过实测、仿真和数据分析来实时感知、诊断、预测物理实体对象的状态，通过性能和状态优化和指令发送来调控物理实体对象的行为，也能通过相关数字孪生体之间的相互学习来进化自身，同时协调利益相关方在物理实体对象生命周期内的决策。

1994年，凯文·凯利在《失控》一书中提到，人造物是有生命的，未来会发展得和人一样。因此我们认同安世亚太高级副总裁田锋提出的生命体模型，数字孪生体可以具有软件定义的躯体、神经、左脑、右脑、五官并具有相应生命特征。下面我们从生命体的角度来阐述数字孪生体的内涵。

(1) 躯体：数字模型。

数字建模是物理对象的数字化表达，这个过程需要将物理对象表达为计算机所能识别的数字模型，在软件中建立物理对象的结构元素和时空关系，不深入涉及物理机理和运行数据，就像给正在雕塑的人体打造一个躯体。这当然是数字孪生体的基本要素，毕竟既然称为“体”，那这样一个基本的、直观的躯体是必需的。

我们通常使用三维实体来建立物理对象的结构形状和位置关系，用系统建模工具来描述物理对象的行为模式。建模工具通常包括CAD、3D动画、建筑信息模型BIM（Building Information Modeling）、城市信息模型CIM（City Information Modeling）或基于系统建模语言SysML的系统建模工具。建立的模型可以是设备、厂房、人群、运输系统、交通、电网、城市、军事战场、战斗群体系等。

数字建模提供了数字孪生体的“躯体”。不过这样的躯体是一个没有神经、

没有思想，与世界隔离、无生命的躯体。

(2) 神经：感知控制。

感知控制用来实现数字孪生体与物理对象之间实时互传信息和数据。数字孪生体利用测量系统，通过传感器获得物理对象的尺寸、速度、温度、光洁度等状态数据，利用控制系统，通过制动器向物理对象发送停止、加速、调节角度等制动指令，这就像我们给数字孪生体安装一套神经系统。人类的神经系统有两种：一种是感觉神经，就像这里的测量系统；另一种是运动神经，就像这里的控制系统。

工业物联网（IIoT）是测量与控制要素的主要技术，不仅能提供对物理世界的感知，还能对物理世界传递信息，从而驱动物理世界。

感知控制提供了数字孪生体的“神经”。神经系统的存在，让数字孪生体具有了初步的生命特征，可以感知和驱动物理世界。但由于缺乏思考能力，目前的数字孪生体还是个“傀儡”或“僵尸”孪生体。

(3) 左脑：模拟仿真。

模拟仿真是基于完整信息和明确机理计算未来，将“数化”过程建立的模型与物理机理相结合，包括材料性质、理论规律、工程规律等，根据完整和实时的边界条件和物理状态，来计算和预测数字模型的下一步状态。这种仿真不是对一个阶段或一种现象的仿真，应是全周期和全领域的动态仿真。实时边界条件和物理对象状态是被完整测量，可作为物理规律的完备输入条件。模拟仿真的输出结果必须具有确定化和无二义性的特征。“实时”二字依赖“互动”过程的测量系统来保证。

广义仿真指的是那些具有明确物理机理的计算过程，包括物理（如流动、力学、化学等）原理确定并被实践验证，往往被作为成熟理论来使用，包含公理、定理、公式、数值计算、工程算法、经验公式等。模拟仿真采用的工具包括算法程序、各类 CAE 工具，譬如物理场仿真、人群仿真、交通仿真、物流仿真、组织仿真等。

通常来说，CAE 有两种类型：物理场仿真和系统仿真。物理场仿真的计算规模大、时间长，通常无法满足数字孪生体与物理对象实时交互的需要；系统仿真则具有速度快的优势，通常可以达到实时交互要求。因此，在数字孪生实践中，往往需要把物理仿真过程进行降阶（ROM），抽取物理仿真的某些特性和参数，转换成系统仿真模型来参与计算。

模拟仿真提供了数字孪生体的“左脑”。人类的左脑专事逻辑推理和理性判断，只要具有明确规律和逻辑，不管多复杂，总是可以通过推理获得明确的结论，提前知道数字孪生体和物理对象将会发生什么。此时的数字孪生体就是

一个有头脑、会思考的智能孪生体，开始具有明显的生命特征，特别是人类的理性思维特征。

（4）右脑：分析预测。

分析预测过程是基于不完整信息和不明确机理来推测未来。现实世界中，大多数现象的物理规律并不明确，大多数情况无法获得完备的边界条件和物理状态，但我们仍然不得不对未来做出预测，哪怕是再模糊的判断，仍然好于毫无判断。如果要求数字孪生体越来越智能和智慧，就不应局限于人类对物理世界的确定性知识。其实人类本身就不是完全依赖确定性知识而领悟世界的。

大数据和人工智能 AI 技术是数据分析的关键技术。根据通过“互动”过程收集的数据以及“先知”过程输出的数据，利用相关性分析建立物理世界的近似模型，依据当前边界条件和物理状态进行下一步状态的预测，并且对近似模型逐步优化。当前边界条件和物理对象状态是被不完整测量的，但也只能作为近似模型的不完备输入条件，输出的结果当然距离物理世界的真实情况有一定偏差。但随着机器学习的持续，算法和模型逐步改善，近似模型会越来越逼近物理机理，预测结果也会逼近物理世界。正是因为这个原因，业界有人将数据驱动的分析预测视为科学研究的“第四范式”，科研方法从传统的三种方法“理论、实验、计算”拓展到第四种方法“数据分析”。

分析预测提供了数字孪生体的“右脑”。人类的右脑专事感性思维，利用直觉和第六感来获得对世界的判断和预测。当然这里指的直觉是那种优秀的直觉，而非普通人的直觉。优秀的直觉源于对丰富经历和有效经验的高度总结，还需要经常性的深度思考和远期瞭望。现实社会中确有一类具有这种优秀和敏锐直觉的人，是他们引导着你的企业、机构甚至人类的发展方向。

（5）五官：人机交互。

人机交互是人类与数字模型打交道的直观可视化界面。这里可以展示数字孪生体的数据，了解数字孪生体的状态，也可以操作和干预数字孪生体，同时实现对物理对象的干预。

数据的可视化展示技术以及虚拟现实技术是人机交互的两个重要技术。数据的可视化展示技术将数据和信息输出为高清、直观、可视化、可交互的图形图像，通过对数据的操作可以实现与数字孪生体乃至物理对象的操纵。虚拟现实（包括 VR、AR 和 MR）提供的深度沉浸技术让人类与数字世界交互模式可以与物理世界的交互模式类似。

人机交互的特性通常被称为“五官”。对人类来说，五官是人们相互认识、了解和沟通的界面，通过望闻问切基本可以了解人的身体状况，通过眼神和语言的交流可以了解人的精神状况。而数字孪生体的人机交互所提供的能力则超

越了人体五官所能提供的功能。虚拟现实技术使数字化的世界在感官和操作体验上更加接近物理世界，让“孪生”一词变得更为精妙。但在数字世界中，人类又具有超人般的特异功能，可以无限驾驭数字世界，例如变换大小、穿墙而过、隔空取物、时空穿越等，将数字孪生体的应用推向极致。

(6) 生命特征。

综上所述，我们认同安世亚太高级副总裁田锋的观点，认为数字孪生体是一个基于人类认知模型，由软件定义，在数据驱动下的具有思维能力、可持续进化的数字化生命体。

现实世界中除人类之外的物理对象也具有天然的生命特征，但这种生命具有的特点包括：本能、直觉、条件反射、既定式、预设化、确定性、机械性、个体化。数字孪生体的生命特征则有更多发展空间，使其可以进化到更加接近智慧生物：灵性、精神、思考、理性、推理、创造性、变通性、不确定性、生物性、社会性。

2. 数字线程

数字孪生体作为软件所能存取的数据就像生命体的基因。数据的积累、管理、追溯和共享既是数字孪生体存在的基本特征，又是其演进的必要手段。数字孪生体通过传承、协同和进化，可以在不同的时间点记录下与自身相关的感知数据与交互数据，并从这些积累的数据中提炼其生命周期中数据所体现的视图与规律，从而实现持续成长。正如人类之所以进步，是因为我们的祖先通过将他们的思想和成果用文字的方式流了下来，使得我们可以传承祖先的智力资产，可以向老子问道，向孔子习理，向牛顿求知，向亚里士多德讨教。

数字线程指的是一种通信框架，它能展示数字孪生体所拥有的资产数据在整个生命周期（从原材料到最终产品）的互联的数据流和集成视图。利用数字线程可以有效地组织数字孪生体所拥有的数据资产，并在正确的时间将正确的信息传递给正确的人或系统。同样的，从数字化系统软件工程的角度来看，我们认为数字线程是以数据编织的方式将数字孪生体所拥有的数据资产通过时序的方式进行组织，以多模形式有效展示其集成视图，以及整个生命周期中互连的数据流。数字线程将物理对象的全生命周期的各数字孪生体之间的数据资产进行传递和追溯，从而实现优秀基因遗传。

基于工业物联网的制造优化软件可保持生产过程中数字线程的完全可追溯性，记录生产的每一步，从而使质检人员能够始终深入地了解生产过程，以便提高质量控制和随时进行审核准备工作。而先进的基于工业物联网和人工智能的自动化软件，使用传感器从生产的每个阶段实时收集大量数据，创建一个丰富的数字数据日志，该数据日志贯穿每个产品的整个生命周期，帮助制造商满

足严格的质量要求，并随时做好审核准备。在这个数字线程中可以基于人工智能的算法分析质量问题、优化下料、分析工作中断和缺陷零件的根本原因，提高质量和质量控制。

3. 数字孪生平台

物理世界的多样性决定了其对应的数字孪生体的多样性，世界的普遍联系决定了数字孪生体的普遍联系。人与人之间的联系构成了人的社会，数字孪生体之间的联系构成了数字社会。也就是说，数字孪生体具有社会性，它不是孤立的，应该能与其他孪生体共享智慧，这就是数字孪生的共智特性。正如人类在共享智慧的过程中进化和升华，数字孪生体也具有进化性，一方面通过 ICT 技术的不断升级数字孪生软件将具有更好的性能，另一方面更重要的是通过物理感知数据和孪生体交互数据的积累与喂养，将不断基于人工智能算法提升数字孪生体的智能。

基于分布式云原生的数字孪生平台将为数字孪生体之间实现共享和协同，从而实现具有社会性的“孪生共智”，多个数字孪生单体可以通过“共智”形成更大和更高层次的数字孪生场景，这个数量和层次可以是无限的，且通过灵活的孪生场景设计与编排能力能够将人类的创新意识通过数字孪生平台快捷高效地体现出来。

因此，从数字化系统软件工程的角度来看，我们认为数字孪生平台是一个数字孪生体的开发、运行及运营平台：面向开发人员，平台提供数字孪生体的集成开发环境，通过集成相关工具支撑其建模、软件功能、实体绑定、数据接入及交互接口等相应多方合作开发流程；面向运维人员，平台在基于分布式算力网络的数字化基础设施资源上提供数字孪生软件的部署、启停与迁移等相关的管控方式；面向运营人员，平台提供数字孪生场景的设计、编排与构建工作，快速高效支撑业务创新与实践。

人类基于数字孪生平台所创建的孪生场景反映了我们对现实世界的认知和意识，与我们所观察到的物理世界一一映射。作为硅基生命的数字孪生体居住在由算力网络构成的硅基世界中，其中算力节点构成了这个世界中的“城市”，网络成为连通各个城市的“道路”，而数字孪生平台则从上帝的视角为人类提供了一个创建、管理、分析、优化与运营数字孪生场景的能力，并通过数字孪生体作用于物理世界，从而能够不断改善人类身处的物理世界。

1.2.3 数字孪生外延

数字孪生的实现和落地应用离不开数字化技术的支持，只有与相关数字化

技术的深度融合数字孪生才能实现物理实体的真实全面感知，多维度多尺度模型的精准构建，全要素、全流程、全业务数据的深度融合，智能化、人性化、个性化服务的按需使用以及全面、动态、实时的交互。

1. 数字孪生与物联网

物理世界的全面感知是实现数字孪生的重要基础和前提，物联网通过射频识别、二维码、传感器等数据采集方式为物理世界的整体感知提供了技术支持。此外，物联网通过有线网络或无线网络为孪生数据的实时、可靠、高效传输提供了帮助。

2. 数字孪生与XR

虚拟模型是数字孪生的核心部分，为物理实体提供多维度、多时空尺度的高保真数字化映射。实现可视化与虚实融合是使虚拟模型真实呈现物理实体以及增强物理实体功能的关键。VR/AR/MR技术为此提供支持：VR技术利用计算机图形学、细节渲染、动态环境建模等实现虚拟模型对物理实体属性、行为、规则等方面层次细节的可视化动态逼真显示；AR与MR技术利用实时数据采集、场景捕捉、实时跟踪及注册等实现虚拟模型与物理实体在时空上的同步与融合，通过虚拟模型补充增强物理实体在检测、验证及引导等方面的功能。

3. 数字孪生与边缘计算

边缘计算技术可将部分从物理世界采集到的数据在边缘侧进行实时过滤、规约与处理，从而实现了用户本地的即时决策、快速响应与及时执行。结合云计算技术，复杂的孪生数据可被传送到云端进行进一步的处理，从而实现了针对不同需求的云一边数据协同处理，进而提高数据处理效率、减少云端数据负荷、降低数据传输时延，为数字孪生的实时性提供保障。

4. 数字孪生与云计算

数字孪生的规模弹性很大，单元级数字孪生在本地服务器即可满足计算与运行需求，而系统级和复杂系统级数字孪生则需要更大的计算与存储能力。云计算按需使用与分布式共享的模式可使数字孪生使用庞大的云计算资源与数据中心，从而动态地满足数字孪生的不同计算、存储与运行需求。

5. 数字孪生与5G

虚拟模型的精准映射与物理实体的快速反馈控制是实现数字孪生的关键。虚拟模型的精准程度、物理实体的快速反馈控制能力、海量物理设备的互联对数字孪生的数据传输容量、传输速率、传输响应时间提出了更高的要求。5G通信技术具有高速率、大容量、低时延、高可靠的特点，能够契合数字孪生的数据传输要求，满足虚拟模型与物理实体的海量数据低延迟传输、大量设备的互

互联互通，从而更好地推进数字孪生应用的落地。

6. 数字孪生与大数据

数字孪生中的孪生数据集成了物理感知数据、模型生成数据、虚实融合数据等高速产生的多来源、多种类、多结构的全要素 / 全业务 / 全流程的海量数据。大数据能够从数字孪生高速产生的海量数据中提取更多有价值的信息，以解释和预测现实事件的结果和过程。

7. 数字孪生与区块链

区块链可对数字孪生的安全性提供可靠保证，可确保孪生数据不可篡改、全程留痕、可跟踪、可追溯等。独立性、不可变和安全性的区块链技术，可防止数字孪生被篡改而出现错误和偏差，以保持数字孪生的安全，从而鼓励更好地创新。此外，通过区块链建立起的信任机制可以确保服务交易的安全，从而让用户安心使用数字孪生提供的各种服务。

8. 数字孪生与人工智能

数字孪生凭借其准确、可靠、高保真的虚拟模型，多源、海量、可信的孪生数据，以及实时动态的虚实交互为用户提供了仿真模拟、诊断预测、可视监控、优化控制等应用服务。AI 通过智能匹配最佳算法，可在没有数据专家的参与下，自动执行数据准备、分析、融合，对孪生数据进行深度知识挖掘，从而生成各类型服务。数字孪生有了 AI 的加持，可大幅提升数据的价值以及各项服务的响应能力和服务准确性。