

随着我国工业互联网创新发展战略的深入实施,部分应用企业已基于工业互联网完成了数字化、网络化改造,少数头部企业渴望通过工业互联网开展智能化升级。作为工业互联网数据闭环优化的核心使能技术,数字孪生(Digital Twin)具备打通数字空间与物理世界,将物理数据与孪生模型集成融合,形成综合决策后再反馈给物理世界的功能,为企业开展智能化升级提供了新型应用模式。

数字孪生由“数字”和“孪生”组合而来,即数字化的孪生体。“孪生”是生物学上的概念,通俗地讲就是双胞胎的意思。“数字”应理解为“数字化”,即将复杂多变的信息转变为可以度量的数字、数据,再以这些数字、数据建立其相应的数字化模型。数字孪生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。作为一种充分利用模型、数据、智能并继承多学科的技术,数字孪生面向产品全生命周期过程,发挥连接物理世界和信息世界的桥梁和纽带作用,提供更加实时、高效、智能的服务。

孪生的概念最早于20世纪60年代由美国国家航空航天局(NASA)提出,当时的概念是发射到太空中的飞行器在地面需要有一个“物理孪生”,以便模拟各类指令的操作,保障太空飞行器各类动作的正确性和安全性。这个思想沿用至今。我国在2021年4月29日发射的天和核心舱,在地面上就有一模一样的装备同步运行,它被形象地称作“地面空间站”,地面空间站通过接收在轨的遥测数据,可以设置成与太空中一样的飞行状态,来验证整个飞行程序和操作指令是否正确。

近些年,数字孪生应用已从航空航天领域向工业各领域全面拓展,西门子、通用电气(General Electric, GE)等工业巨头纷纷打造数字孪生解决方案,赋能制造业数字化转型。数

字孪生蓬勃发展的背后与新一代信息技术的兴起、工业互联网在多个行业的普及应用有莫大关联。

工业数字孪生是一种基于先进信息技术和数字化技术的制造业生产模式,它将实体系统的数字化模型与实际的生产过程进行无缝连接,并实现全流程数据的获取、传递和分析,从而实现对生产过程和产品的全方位跟踪和监控。

工业数字孪生的发展为制造业的自动化、智能化、高效化和可持续化发展提供了强大的支持和保障,可以帮助企业实现高质量、高效率、低成本的生产,提高企业的核心竞争力。

本书将从数字孪生的发展开始讲起,详细介绍工业数字孪生技术体系及关键技术,剖析工业互联网支持下的数字孪生车间构建,总结工业数字孪生在智能制造中的具体应用,阐述如何依托数字孪生打造新时代的智慧工厂,同时介绍部分一线制造企业成功应用数字孪生的实例,展望工业数字孪生在未来的无限可能。

1.1 数字孪生的概念

数字孪生,也有很多学者和机构称之为数字镜像、数字映射、数字双胞胎、数字双生、数字孪生体等。数字孪生不局限于构建的数字化模型,不是物理实体的静态、单向映射,也不应该过度强调物理实体的完全复制、镜像,虚实两者也不完全相等;数字孪生不能割离实体,也并非物理实体与虚拟模型的简单加和,两者也不一定是简单的一一对应关系,可能出现一对多、多对一、多对多等情况;数字孪生不等同于传统意义上的仿真/虚拟验证、全生命周期管理,也并非只是系统大数据的集合。2017—2019年, Gartner公司在连续三年将数字孪生列为十大新兴技术的时候,对数字孪生的定义分别为:数字孪生是实物或系统的动态软件模型(2017),数字孪生是现实世界实物或系统的数字化表达(2018),数字孪生是现实生活中物体、流程或系统的数字镜像(2019)。但就目前而言,对于数字孪生还没有形成统一的定义,不同的学者、企业、研究机构等对数字孪生的理解也存在着不同的认识。

数字孪生的概念最早可以追溯到阿波罗计划中,那时美国国家航空航天局就曾构建两个完全相同的航天飞行器,其中一个发射到太空执行任务,另一个则留在地球上反映太空中的航天器在任务期间的工作状态,以辅助工程师进行分析和处理紧急事件。

2002年,美国密歇根大学(The University of Michigan)成立了一个PLM(Product Lifecycle Management, 产品生命周期管理)中心。Michael Grieves教授面向工业界发表《PLM的概念性

设想》(Conceptual Ideal for PLM)，首次提出了一个PLM概念模型，在这个模型中提出了“与物理产品等价的虚拟数字化表达”，出现了现实空间、虚拟空间的描述。

Michael Grieves教授提到，驱动该模型的前提是每个系统都由两个子系统组成：一个是一直存在的物理系统，一个是包含了物理系统所有信息的新虚拟系统。

这意味着现实空间中的系统和虚拟空间中的系统之间存在一个镜像(Mirroring of Systems)，或者叫作“系统的孪生”(Twinning of Systems)，反之亦然。

因此，PLM意味着不再是静态的谁表达谁，而是两个系统即虚拟系统和现实系统，将在整个生命周期中彼此连接。PLM贯穿了4个阶段：创造、生产制造、操作(维护和支持)和报废处置。

2003年年初，这个PLM概念模型在密歇根大学第一期的PLM课程中使用，当时被称作“镜像空间模型”(Mirrored Space Model)。2005年，Michael Grieves教授在一份刊物中又提到了这一个模型。

到了2006年，Michael Grieves教授又发表了一篇叫作《产品生命周期管理：驱动下一代精益思想》的文章，在这篇文章里他将数字孪生叫作“信息镜像模型”。

尽管Michael Grieves自称是数字孪生第一人，但行业内对谁先提出数字孪生概念还存在一些争议。因为数字孪生一词最早出现在2010年NASA的技术路线图中，但Michael Grieves在数字孪生的表述从抽象到清晰方面所做出的贡献是不可磨灭的。

1. NASA数字孪生的应用

2010年，NASA在其太空技术路线图中首次引入了数字孪生的表述。为了更好地理解NASA的数字孪生，要先给读者讲一段Apollo 13登月飞行中发生的故事。

50多年前的一天，Apollo 13号宇宙飞船已经飞离了地球210000英里，飞往月球的3名宇航员突然听到“嘣-哧哧-咣咣”的声音，这时一名宇航员看到飞船壳体已经弯曲。几秒钟后，驾驶舱的警告灯亮起，宇航员耳边响起了刺耳的报警声。事后查明，是Apollo 13生活舱中的一个氧气罐发生了爆炸，爆炸严重地损坏了主推进器，同时用于维持宇航员们生命的氧气被泄漏到了太空之中。此时情况十分危急，因为每过一分钟，受损的太空飞船就会飞离地球400英里。这种状况在人类历史上首次发生。如何让3名宇航员安全回家，成了数千名NASA地面支持人员在之后三天半时间里夜以继日工作的唯一目标。同时，3名宇航员通过打开、关闭不同

的系统来判定哪些系统还在正常工作，哪些系统已经受损不能工作。任务控制中心综合各方面的信息，快速而准确地诊断出问题所在，在生活舱中的氧气供应完全失效前，将宇航员们转移到了登月舱中。宇航员们暂时安全了，但他们如何回家呢？这又是一个巨大的挑战，然而，NASA克服了这个挑战，并成功地将宇航史上很可能发生的巨大灾难转化为一个令人振奋的巨大成功。NASA飞行器如图1-1所示。

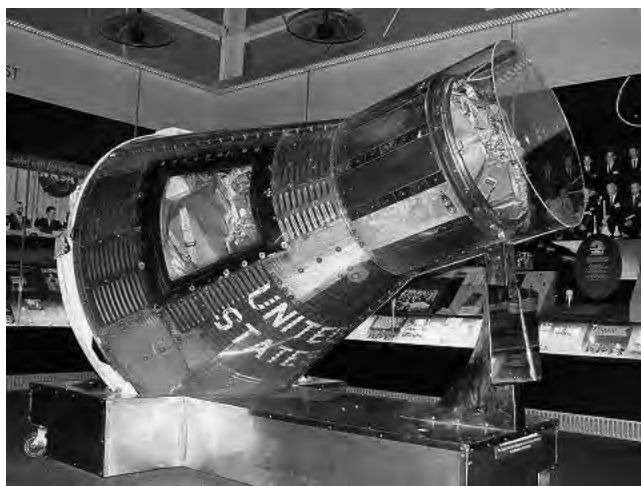


图 1-1 NASA 飞行器

做到这一切的一个关键是，在NASA的身后有一套完整的、高水准的地面仿真系统，用于培训宇航员和任务控制人员所用到的全部任务操作，包括了多种故障场景的处理。模拟器是整个太空计划中技术最复杂的部分，在模拟培训中，唯一真实的东西是乘员、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创造出来的。任务控制人员和宇航员们在综合考虑飞船的受损、可用的电力、剩余的氧气、饮用水等因数的情况后，与登月舱制造厂商协同工作，确定了一个着陆计划，然后安排后备宇航员在模拟器上进行操作演练。演练证明了方案的可行性，这极大地增强了任务控制人员与宇航员们的信心。剩下的工作就是宇航员们百分之百地按照演练形成的操作指令清单去执行就可以了。最终，他们做到了，安全回家了。

NASA的成功主要归功于模拟器（或者叫作仿真器）。这些模拟器正是现在火热的数字孪生的一个实实在在的案例。准确地说，这些模拟器应该是数字孪生和物理孪生的结合体。所以，西门子工程师Stephen Ferguson曾说：“Apollo 13, The First Digital Twin”。

因此，NASA的数字孪生定义诞生了。在2010年发布的太空技术路线图中的Area 11中的

Simulation-Based Systems Engineering部分，是这样定义数字孪生的：

“一个数字孪生，是一种集成化的多种物理量、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提出的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和原型验证等），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、更极端的环境和更多未知因素）的需要，需要找到一种全新的工作模式，这种工作模式就是数字孪生。

2. NASA的数字孪生的用途

NASA的数字孪生的用途如下：

- （1）发射前飞船未来任务清单的演练。可以用来研究各种任务参数下的结果，确定各种异常的后果，减轻故障、失效、损害的策略效果的验证。此外，还可以确定发射任务最大概率成功的任务参数。
- （2）镜像飞行孪生的实际飞行过程。在此基础上，监控并预测飞行孪生的状况。
- （3）完成可能的灾难性故障或损害事件的现场取证工作。
- （4）用作任务参数修改后结果的研究平台。

NASA的数字孪生基于其之前的宇航任务实践经验，极其看重仿真的作用。NASA要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，因此，NASA更强调上述内容的集成化的仿真，从某种意义上讲是其系统工程方法的落脚点。换个看问题的角度来讲，NASA的数字孪生就等同于其基于仿真的系统工程。

3. AFRL更具工程应用含义的数字孪生

2009年，AFRL（美国空军研究实验室）发起了一个“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。文章中指出该ADT项目发起于2009年，所以有部分学者认为是AFRL首先提出了数字孪生的概念。但是从文章公开发表的时间以及之前的工程实践规模和带来的影响力来看，还是认为NASA首先提出了数字孪生的概念更为科学。

4. Gartner提出的数字孪生

Gartner在2017年、2018年和2019年连续3年将数字孪生列为十大技术趋势之一，对数字孪生的火热起到了推动作用。Gartner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3类：

(1) 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。

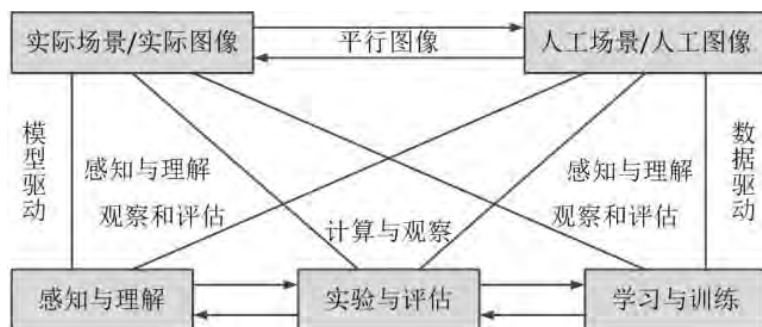
(2) 复合数字孪生（Composite Digital Twins）：用于监视和优化关联在一起的离散数字孪生的组合使用，如轿车和工业机器这样的多部件系统。

(3) 组织数字孪生（Digital Twins of Organizations, DTOs）：DTOs是复杂大型实体的虚拟模型，是数字孪生构成的一部分。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领域中数字孪生的应用。据其内部的一个调查统计，在所有有实施物联网意愿的企业中，59%的企业已经实施了或正在实施数字孪生。

5. 国内数字孪生方面的理论研究工作

2004年，中国科学院自动化研究所的王飞跃研究员发表了《平行系统方法与复杂系统的管理和控制》的文章。文章中首次提出了平行系统（Parallel Systems）的概念。

平行系统是指由某一个自然的现实系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统。通过实际系统与人工系统的相互连接，对二者之间的行为进行实时的动态对比与分析，以虚实互动的方式完成对各自未来的状况的“借鉴”和“预估”，人工引导实际，实际逼近人工，达到有效解决方案以及学习和培训的目的。我们完全可以将平行系统中的人工系统，理解为物理系统的数字孪生这样的结论。需要强调的是，王飞跃是将平行系统（数字孪生）作为解决复杂系统问题的方法论而提出来的，如图1-2所示。



走向智能研究院的赵敏与宁振波在《铸魂——软件定义制造》一书中，对数字孪生有着如下认识和定位：“数字孪生是在数字化一切可以数字化的事物的大背景下，通过软件定义，在数字虚体空间所创立的虚拟事物，与物理实体空间的现实事物形成了在形、态、质地、行为和发展规律上都极为相似的虚实精确映射，让物理孪生体和数字孪生体之间具有了多元化的映射关系，具备了不同的保真度（逼真/抽象等）。”笔者认为，两位专家提出的“虚体测试，实体创新”，是对数字孪生的作用机理的最简洁概括。

南山工业书院的林雪萍在“知识自动化”微信公众号上发表的《数字孪生：第四象限的崛起》一文中，使用二维象限工具完美地诠释了一个产品从设计到制造，再到使用与运营，全生命周期的数字孪生的动态演变过程，依据象限的不同，生动形象地指出了数字孪生的重要作用。其中的3条信息新通道正是数字孪生的不断丰富、不断丰满的发展过程。笔者认为，还可以将林雪萍给出的二维象限结构发展为三维螺旋式上升结构，表达出数字孪生在产品升级换代、不断提高方面的作用。

北京航空航天大学的陶飞等在CIMS期刊上发表的《数字孪生五维模型及十大领域应用》一文中，给出了数字孪生的五维模型：即 $MDT = (PE, VE, Ss, DD, CN)$ 。MDT是一个通用的参考架构；物理实体（PE）是数字孪生五维模型的基础，主要包括各子系统具备不同的功能，共同支持设备的运行以及传感器采集设备和环境数据；孪生数据（DD）集成融合了信息数据与物理数据；服务（Ss）对数字孪生应用过程中面向不同领域、不同层次用户、不同业务所需的各类数据、模型、算法、仿真、结果等进行服务化封装；连接（CN）实现物理实体、虚拟实体、服务及数据之间的普适工业互联；虚拟实体（VE）从多维度、多空间尺度及多时间尺度对物理实体进行刻画和描述。五维模型对数字孪生的落地具有重要的指导意义，在工程应用中，可以直接将该模型映射或转换为面向服务的软件体系结构。

综上所述，我们可以简单地用一个编年史对数字孪生的演进历史做一个总结：

- 1959年，美国航空航天局发射了旅行者1号卫星，并利用其回传的图像进行数学模拟，开启了数字孪生的先河。
- 1970年，航空工业开始使用数字固体建模技术，加强了数字化工程能力。
- 1990年，汽车和宇航工业开始广泛应用数字化技术，销售商在销售型号之前可以提前测试数量。
- 2002—2010年是数字孪生体的概念产生期，即数字孪生体模型的出现和英文术语名称的确定。这段时间，数字技术愈发成熟，出现了仿真驱动的设计、基于模型的系统工程（MBSE）等先进设计范式。
- 2010—2020年是数字孪生的领先应用期，主要指NASA、美军方和达索、ANSYS、GE等航空航天、国防军工机构或工业领域的领先应用。
 - ◆ 2010—2014年，NASA和AFRL促进了数字孪生的应用。2014年前后，国际上有很多大型公司提出了基于数字孪生的产品落地方案，比如达索、GE、西门子、ANSYS等。
 - ◆ 2016年，美国国家工业计划（The National Strategic Plan）开始正式将数字孪生技术视为推动企业数字化转型的重要策略。
 - ◆ 2017年，CNBC评选的全球前50位最有创新力的企业中，几乎都拥有数字孪生方案，而且其应用范围也逐渐扩大，包括工业自动化、机械制造、航空航天、汽车制造、能源领域等。
 - ◆ 2018年，GE公司启动了一项数字孪生计划，其目标是将数字孪生技术应用到GE各个产品线的研发、生产、维护等各个环节，并且通过数字化转型提高其效率和竞争力。

近年来，数字孪生得到越来越广泛的传播。同时，得益于物联网、大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术的发展，数字孪生的实施已逐渐成为可能。现阶段，除了航空航天领域外，数字孪生还被应用于电力、船舶、城市管理、农业、建筑、制造、石油天然气、健康医疗、环境保护等行业，特别是在智能制造领域，数字孪生被认为是一种实现制造信息世界与物理世界交互融合的有效手段。许多著名企业（如空客、洛克希德马丁、西门子等）与组织（如Gartner、德勤、中国科协智能制造协会）对数字孪生给予了高度重视，并且开始探索基于数字孪生的智能生产新模式。更多应用领域如图1-3所示。

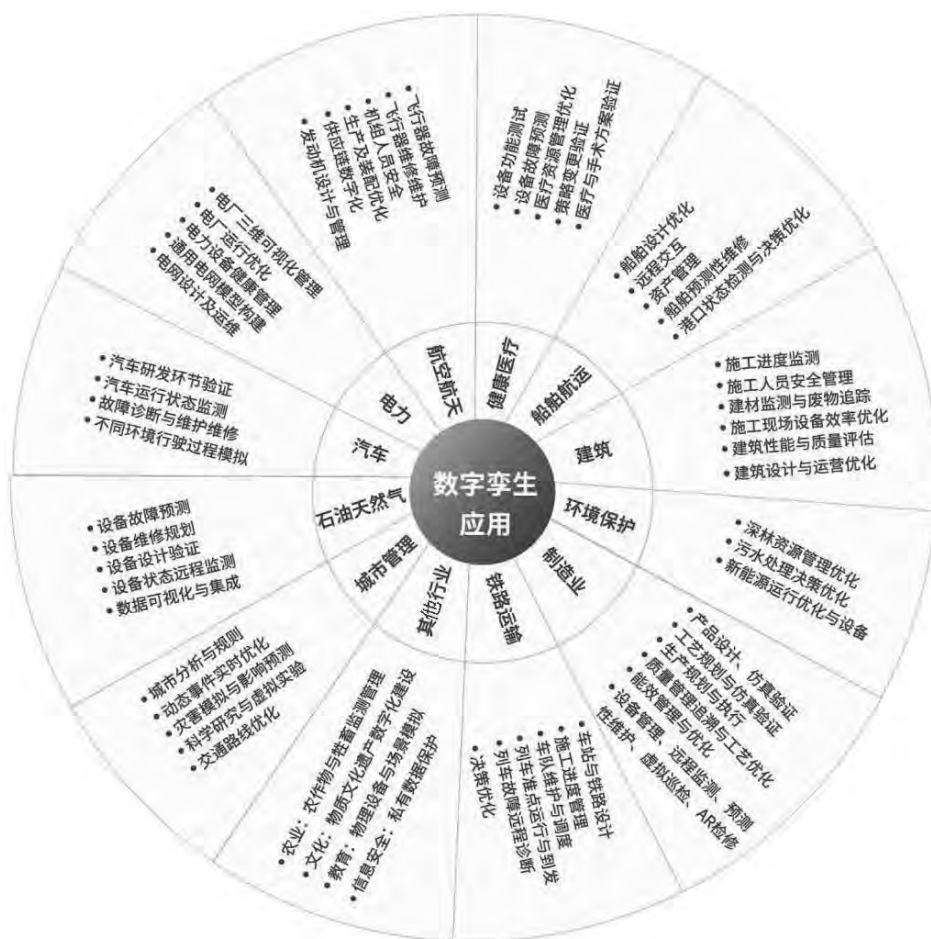


图 1-3 数字孪生的应用领域

总的来说，数字孪生可以概括为：以模型和数据为基础，通过多学科耦合仿真等方法，完成现实世界中的物理实体到虚拟世界中的镜像数字化模型的精准映射，并充分利用两者的双向交互反馈、迭代运行，达到物理实体状态在数字空间的同步呈现，通过镜像化数字化模型的诊断、分析和预测，进而优化实体对象在其全生命周期中的决策、控制行为，最终实现实体与数字模型的共享智慧与协同发展。

数字孪生正从概念阶段走向实际应用阶段，驱动制造业、建筑业等实体产业进入数字化和智能化时代。随着企业数字化转型需求的提升以及政策的持续支持，数字孪生将会出现更深入的应用场景，为实体经济发展带来新的动力。

1.2 数字孪生的特征

数字孪生的概念仍在不断发展,国内外有很多文献分析总结了数字孪生的内涵和特征,但是不同应用场景下的数字孪生系统以及数字孪生系统所在生命周期中的不同阶段都呈现出不同的特征,因此,很难通过一个标准的特征来说某个应用系统“是”或者“不是”数字孪生系统。总体来说,和传统的建模仿真、实时监控、组态软件等相比,数字孪生系统有以下特征。

1. 模型支撑

数字孪生作为仿真应用的发展和升级,与传统的仿真方式有着巨大的区别。数字孪生的模型贯穿物理系统的整个生命周期。以产品数字孪生为例,针对新产品的的设计,传统的产品仿真主要涉及产品本身的建模与仿真工作,不包括其工艺优化、制造过程规划、服务运维、回收处置等阶段的模型与仿真;而数字孪生不仅具备传统产品仿真的特点,从概念模型和设计阶段着手,先于现实世界的物理实体构建数字模型,而且数字模型与物理实体共生,贯穿实体对象的整个生命周期,建立数字化、单一来源的全生命周期档案,实现产品全过程追溯,完成物理实体的细致、精准、忠实的表达。因此,数字孪生模型的构建需要考虑产品全生命周期的数据和行为表述。

现实产品往往包括机械、电子、电气、液压气动等多个物理系统,一个智能系统往往是数学、物理、化学、电子电气、计算机、机械、控制理论、管理学等多学科、多领域的知识集成的系统。多个物理系统融合,多学科、多领域融合是现实系统的运行特点。物理系统在数字空间的数字模型需要体现这个融合,实现数字融合模型。这个融合包括了全要素、全业务、多维度、多尺度、多领域、多学科,并且能支持全生命周期的运行仿真。不同的智能系统关注的重点领域不一,多学科耦合程度存在差异,因而其数字模型需要根据不同的应用场景对其组成部分进行融合,以全方位地刻画物理实体。

数字孪生体和物理实体应该是“形神兼似”。“形似”就是几何形状、三维模型上要一致,“神似”就是运行机理上要一致。数字孪生体的模型不但包括了三维几何模型,还包括了前述的多领域、多学科物理、管理模型。可以根据构建的数字化模型中的几何、物理、行为、规则等划分为多维度空间,还可视为三维空间维、时间维、成本维、质量维、生命周期管理维等多维度交叉作用的融合结果,并形成对应的空间属性、时间属性、成本属性、质量属性、生命周

期管理属性；数字孪生模型的构建应按层级逐级展开，形成单元级、区域级、系统级、跨系统级等多尺度层级，各层级逐渐扩大，完成不同的系统功能。

以产品数字孪生应用为例，数字化建模不仅仅是对产品几何结构和外形的三维建模，还包括对产品内部各零部件的运动约束、接触形式、电气系统、软件与控制算法等信息进行全数字化的建模，这种数字化建模技术是构建产品数字孪生模型的基础技术。一般来说，多维度、多物理量、高拟实性的虚拟模型应该包含几何、物理、行为和规则模型四部分：几何模型包括尺寸、形状、装配关系等；物理模型综合考虑力学、热学、材料等要素；行为模型则根据环境等外界输入及系统不确定因素做出精准响应；规则模型依赖于系统的运行规律，实现系统的评估和优化功能。

数据驱动的建模方法有助于处理那些仅仅利用机理/传统数学模型无法处理的复杂系统，通过保证几何、物理、行为、规则模型与刻画的实体对象保持高度的一致性来让所建立模型尽可能逼近实体。数字孪生技术解决问题的出发点在于建立高保真度的虚拟模型，在虚拟模型中完成仿真、分析、优化、控制，并以此虚拟模型完成物理实体的智能调控与精准执行，即系统构建于模型之上，模型是数字孪生体的主体组成。

2. 数据驱动

数据是数字孪生的基础要素，其来源包括两部分：一部分是物理实体对象及其环境采集而得；另外一部分是各类模型仿真后产生。多种类、全方位、海量动态数据推动实体/虚拟模型的更新、优化与发展。高度集成与融合的数据不仅能反映物理实体与虚拟模型的实际运行情况，还能影响和驱动数字孪生系统的运转。

物理系统的智能感知与全面互联互通是物理实体数据的重要来源，是实现模型、数据、服务等融合的前提。感知与互联主要是指通过传感器技术、物联网、工业互联网等将系统中的人、机、物、环境等全要素异构信息，以数字化描述的形式接入信息系统，实现各要素在数字空间的实时呈现，驱动数字模型的运作。

数据的组织以模型为核心。信息模型是对物理实体的一个抽象，而多学科、多领域的仿真模型又需要不同的数据驱动，并且也会产生不同的数据。这些数据通过信息模型、物理模型、管理模型等不同领域模型进行组织，并且通过基于模型的单一数据源管理来实现统一存储与分发，保证数据的有效性和正确性。

3. 实时映射

物理系统和数字模型通过实时连接进行动态交互，实现双向映射。物理系统的变化能及时反映到数字模型中，数字模型所计算、仿真的结果也能及时发送给物理系统，控制物理实体的执行过程，这样就形成了数字孪生系统的虚实融合。孪生数据链接成一个统一的整体后，系统各项业务也得到了有效集成与管控，各业务不再以孤立形式展现，业务数据共享，业务功能趋于完善。虚实映射如图1-4所示。



图 1-4 虚实映射

4. 适合应用场景的实时连接

“实时连接”在不同的应用场景下，其物理含义是不同的。对于控制类应用（设备的在线监控），实时可能小于1s，达到毫秒级；对于生产系统级应用，实时小于10s甚至1min都是允许的；对于城市等大系统，部分数据可以以分钟甚至小时为单位进行更新，也算满足“实时连接”的定义。

如今的智能产品和智能系统呈现出复杂度日益提高、不确定因素众多、功能趋于多样化、针对不同行业的需求差异较大等趋势，而数字孪生为复杂系统的感知、建模、描述、仿真、分析、诊断、预测、调控等提供了可行的解决方案，数字孪生系统必须能不断地迭代优化，即适应内外部的快速变化并做出有针对性的调整，能根据行业、服务需求、场景、性能指标等不同要求完成系统的拓展、裁剪、重构与多层次调整。这个优化首先在数字空间发生，同时也同步在物理系统中发生。

5. 智能决策

数字孪生将真实运行物体的实际情况结合数字模型在软件界面中进行直观呈现，这个是数字孪生的监控功能。数字孪生的监控一般构建于三维可视化模型之上，各类数据按模型的空间、运行流程、管理层级等不同维度进行展示，能让用户直观感受系统的运行状态，便于做出决策。

展示的数据不但包括采集得到的实时数据,也包括基于这些数据结合相关模型进行分析之后得到的数据挖掘结果,可以进一步提取数据背后富有的信息。分析结果也叠加到展示模型中,可以更好地展示实体对象的内部状态,为预测和优化提供基础。

数字孪生系统具备模拟、监控、诊断、推演预测与分析、自主决策、自主管控与执行等智能化功能。信息空间建立的数字模型本身即是对物理实体的模拟和仿真,用于全方位、全要素、深层次地呈现实体的状态,完成软件层面的可视化监控过程。而数字孪生不局限于以上基础功能的实现,还能充分利用全周期、全领域仿真技术对物理世界进行动态的预测,预测是数字孪生的核心价值所在。动态预测的基础正是系统中全面互联互通的数据流、信息流以及所建立的高拟实性数字化模型。动态预测的方式大体可以分为两类:

- (1) 根据物理学规律和明确的机理计算、分析实体的未来状态。
- (2) 依赖系统大数据分析、机器学习等方法所挖掘的模型和规律预测未来。

第二类更适合于现如今功能愈加多样化、充满不确定性、难以用传统数学模型准确勾画的复杂控制系统。在虚拟空间完成推演预测后,根据预测结果、特定的应用场景和不同的功能要求,采用合理的优化算法实时分析被控对象行为,完成自主决策优化和管理,并控制实体对象精准执行。

数字孪生可以看作一种技术、方法、过程、思路、框架和途径,本质上是以服务为导向,对特定领域中的系统进行优化,满足系统某一方面的功能要求,如成本、效率、故障预测与监控、可靠运维等。而服务展开来说,可分为面向不同领域、用户/人员(专业技术人员、决策人员、终端执行人员等)、业务需求、场景的业务性服务和针对智能系统物理实体、虚拟模型、孪生数据、各组成部分之间的连接相关的功能性服务等。

1.3 面向智能制造的工业数字孪生

制造业作为全球经济发展的重要支撑,世界各国纷纷制定国家级发展战略,我国先后出台了“中国制造2025”“互联网+”“工业互联网”等制造业国家发展实施战略,把推动制造业高质量发展作为构建现代化经济体系的重要一环,推动制造业与新型ICT(Information and Communications Technology,信息与通信技术)融合,实现制造业数字化、智能化转型。在智能制造浪潮下,数字孪生成为最为关键和基础性技术之一。数字孪生作为连接物理世界和信息

世界进行虚实交互的闭环优化技术,已成为推动制造业数字化转型,促进数字经济发展的的重要抓手,以数据和模型为驱动,打通业务和管理层面的数据流,实时、连接、映射、分析、反馈物理世界行为,使工业全要素、全产业链、全价值链达到最大限度的闭环优化,助力企业提升资源优化配置,促进加快制造工艺数字化、生产系统模型化、服务能力生态化。

制造业数字孪生应用发展前景广阔。随着物联网、大数据、云计算、人工智能等新型ICT技术席卷全球,数字孪生得到越来越广泛的应用,被应用于航空航天、电力、船舶、离散制造、能源等行业领域,应用场景包括研发设计、生产制造、营销服务、运营管理、规划决策等环节。在智能制造领域,数字孪生被认为是一种实现制造信息世界与物理世界交互融合的有效手段,通过数字孪生技术的使用,将大幅推动产品在设计、生产、维护及维修等环节的变革。基于模型、数据、服务方面的优势,数字孪生正成为制造业数字化转型的核心驱动力。

制造业数字孪生的基础和关键技术有待提升。数字孪生作为综合性集成融合技术,涉及跨学科知识的综合应用,其核心是模型和数据。在制造业领域,各行业间原料、工艺、机理、流程等差异较大,模型通用性较差,面临多源异构数据采集协调集成难、多领域多学科角度模型建设融合难和应用软件跨平台集成难等问题。基于高效数据采集和传输、多领域多尺度融合建模、数据驱动与物理模型融合、动态实时连接交互、数字孪生人机交互技术呈现等数字孪生基础支撑核心技术,有助于探索基于数字孪生的数据和模型驱动工艺系统变革新路径,促进集成共享,实现数字孪生跨企业、跨领域、跨产业的广泛互联互通,实现生产资源和服务资源更大范围、更高效率、更加精准的优化。

随着企业数字化转型需求的提升,数字孪生技术将持续在制造业领域发挥作用,在制造业各个领域形成更深层次应用场景,通过跨设备、跨系统、跨厂区、跨地区的全面互联互通,实现全要素、全产业链、全价值链的全面链接,为制造业领域带来巨大转型变革。

工业数字孪生基于数字孪生技术发展起来的多类数字化技术集成融合和创新应用,使用建模工具在数字空间构建起精准物理对象模型,再利用实时物联网,数据驱动模型运转,进而通过数据与模型的集成融合构建起综合决策能力,推动工业全业务流程闭环优化。数字孪生的功能架构如图1-5所示。

第一层,连接层。具备采集感知和反馈控制两类功能,是数字孪生闭环优化的起始和终止环节。通过深层次的采集感知获取物理对象的全方位数据,利用高质量反馈控制完成物理对象的最终执行。



图 1-5 数字孪生的功能架构

第二层，映射层。具备数据互联、信息互通、模型互操作3类功能，同时数据、信息、模型三者间能够实时融合。其中，数据互联是指通过工业通信实现物理对象市场数据、研发数据、生产数据、运营数据等全生命周期数据的集成；信息互通是指利用数据字典、元数据描述等功能，构建统一信息模型，实现物理对象信息的统一描述；模型互操作是指能够通过多模型融合技术将几何模型、仿真模型、业务模型、数据模型等多类模型进行关联和集成融合。

第三层，决策层。在连接层和映射层的基础上，通过综合决策实现描述、诊断、预测、处置等不同深度的应用，并将最终决策指令反馈给物理对象，支撑实现闭环控制。全生命周期实时映射、综合决策、闭环优化是数字孪生发展的三大典型特征：全生命周期实时映射指孪生对象与物理对象能够在全生命周期实时映射，并持续通过实时数据修正并完善孪生模型；综合决策指通过数据、信息、模型的综合集成，构建起智能分析的决策能力；闭环优化指数字孪生能够实现对物理对象从采集感知、决策分析到反馈控制的全流程闭环应用，本质是设备可识别指令、工程师知识经验与管理者决策信息在操作流程中的闭环传递，最终实现智慧的累加和传承。

在以上3个层次中，数字孪生模型是贯穿始终的核心。数字孪生模型基于连接层，为数字孪生分析与应用层和感知与反馈层提供数据支撑。映射层则通过数字孪生模型进行数据分析、产品仿真和预测，实现对生产过程的优化和控制，提高产品质量和效率。决策层则实现数据的

实时监测、重要信息的报警预警和远程控制，为数字孪生模型、数字孪生分析与应用层提供数据反馈和修正，帮助数字孪生模型更好地拟合实际场景。

1.4 工业数字孪生的发展阶段

工业数字孪生是近年来随着工业物联网和数字化转型的发展而出现的概念，最早可以追溯到20世纪50年代初期的航空工业中。到了20世纪70年代，当时针对福特汽车厂的制造工厂进行了建模仿真，并成功地应用于设计车身装配生产线。但是，这种仿真技术的应用仅限于福特内部，没有被广泛地传播和应用。

可以看出，工业数字孪生是近几年来随着工业数字化转型和物联网技术的发展而逐步成熟的一项重要技术，未来还有广泛的应用前景。

数字孪生能够将实物系统的数据、行为和性能映射到虚拟空间，通过实时的数据采集、模拟、预测和决策支持，实现生产过程的可持续优化，从而提高产品质量，降低生产成本，提升企业效益。数字孪生技术也能够支持企业进行故障诊断和预测维护，提高生产线的可靠性和效率。数字孪生已经成为制造业数字化转型的重要技术手段之一，未来将在不同行业中得到更广泛的应用和发展。

数字孪生的发展具有以下趋势：

（1）**拟实化趋势，涉及多物理建模。**产品数字孪生体在工业领域应用的成功程度，取决于产品数字孪生体的拟实化程度，研究如何将基于不同物理属性的模型关联在一起，是建立产品数字孪生体，继而充分发挥产品数字孪生体的模拟、诊断、预测和控制作用的关键。

（2）**全生命周期化，即从产品设计和制造阶段向产品制造阶段延伸。**现阶段有关产品数字孪生体的研究主要侧重于产品设计或售后服务阶段，较少涉及产品制造阶段，数字孪生体则将会在产品生产制造阶段的研究与应用方面成为全新热点。

（3）**集成化，与其他先进技术的融合也将成为全新的趋势。**现阶段数字孪生体的各个环节之间仍然存在断点，如何将数字纽带技术作为基础技术，并将新一代信息与通信技术、大数据分析技术、增强现实（AR）技术等先进技术有机融为一体，是数字孪生的下一个研究方向。

1.5 工业数字孪生的功能架构

数字孪生是对物理实体的数字化表达，以历史数据、实时数据为基础，融合几何、机理、数据驱动等多种数字模型，实现对物理对象的映射呈现、分析优化、诊断预测以及闭环控制。

- 几何模型主要通过几何概念描述对象的物理形状，将物理对象的实体形状映射到虚拟空间，并通过渲染等实现更好的展示和交互。几何模型在数字孪生中扮演着重要的角色，可以为数字孪生空间提供高精度的物理形状信息。
- 机理模型是在已知物理规律和经验的基础上建立起来的精确模型。它主要根据对象内部机制或者物质流传递机理而建立，对于一些已知规律的场景可以帮助我们更好地理解物理模型的内部机制，并提供更准确的模型分析和优化。
- 数据驱动模型主要通过历史数据、实时数据、人工智能等实现对未知规律在虚拟空间的拟合。它不需要准确的物理规律，而是通过对大量数据的训练和拟合来实现模型的预测和优化，即使在没有先验知识的情况下，也能构建出高度准确的数字孪生模型。

通过以上3类模型的融合应用，数字孪生技术可以实现对物理世界的精细刻画、精准预测和精准控制，为企业提供了数字化转型的重要技术支持。

1.6 发展工业数字孪生的意义

数字化转型是我国经济社会未来发展的必由之路。习近平总书记指出，世界经济数字化转型是大势所趋。当前，世界正处于百年未有之大变局，数字经济已成为全球经济发展的热点，美、英、欧盟等纷纷提出数字经济战略。数字孪生等新技术与国民经济各产业不断深化融合，有力推动各产业数字化、网络化、智能化发展进程，成为我国经济社会发展变革的强大动力。未来，所有的企业都将成为数字化的公司，这不只是要求企业开发出具备数字化特征的产品，更指的是通过数字化手段改变整个产品的设计、开发、制造和服务过程，并通过数字化的手段连接企业的内部和外部环境。

数字孪生技术作为推动实现企业数字化转型、促进数字经济发展的的重要抓手，已建立了普遍适应的理论技术体系，并在产品设计制造、工程建设和其他学科分析等领域有较为深入的应用。在当前我国各产业领域强调技术自主和数字安全的发展阶段，数字孪生技术本身具有的高