

# 数字孪生系统：技术、应用与挑战

李 靓

中讯邮电咨询设计院有限公司 河南 郑州 450007

**摘要：**工业技术的发展推动工业装备越来越集成化、复杂化。为了应对复杂装备在设计、制造、测试、运行、维护、故障诊断、状态评估、寿命预测等方面的难题，数字孪生技术应运而生，通过构建物理实体在虚拟空间的孪生数字模型，从而实现复杂装备的管控和优化。本文从数字孪生技术的定义出发，详细阐述了数字孪生技术需要的关键技术和目前已有的应用案例，并对数字孪生技术发展面临的挑战进行了讨论。

**关键词：**数字孪生；关键技术；数字化转型；数字模型

## 1 概述

工业技术从蒸汽时代，发展到到机械时代、信息时代，变得日益庞大、系统、和复杂。以大型装备制造、航空航天、半导体为代表的工业技术，为了获得更高的使用能效，呈现出高度集成性、复杂化的趋势。与之相对应的是，越来越复杂的工业设备也将面临更高的故障概率，对设备本身的性能、预期使用寿命的评估也将变得更加的复杂化。因此，如何能够在复杂工业设备的背景下，更加高效地实现设备的设计、制造、测试、运行、维护、故障诊断、状态评估、寿命预测，成为现代工业技术的一个难题。

由于物联网、云计算、多领域多尺度融合建模等技术的相继出现，针对上述工业技术面临的难题出现了一个新的解决方案，即数字孪生技术。

数字孪生技术起源于美国密歇根大学Grieves M.W.教授2003年在其课堂上提出的“镜像空间模型”<sup>[1]</sup>。经过近20年的发展，数字孪生技术的概念更加清晰，即通过信息化的平台，建立一个模拟物理实体、流程或系统的数字孪生镜像。数字孪生技术的形成离不开物联网的发展，物联网利用其终端元器件，采集数据进行反馈，通过无线传输、云计算、人工智能、机器学习、大数据分析等手段，在信息化平台上形成数字化的模拟（如图1所示）<sup>[2]</sup>。因为数据的采集和反馈是实时的，因此在信息化平台上生成的数字模拟也会根据实际情况不断变化，以呈现模拟对象的真实情况。



图1 数字孪生概念模型

中图分类号：TN914 文献标识码：A

## 2 数字孪生系统的关键技术

数字孪生技术之所以能够实现物理实体、流程或系统的数字模拟，离不开多领域多尺度融合建模、数据驱动与物理模型融合的状态评估、数据采集和传输、云计算和边缘计算等关键技术的发展。它的本质是多种复合技术的集成和综合运用，以解决工业设备领域出现的问题。

### 2.1 多领域多尺度融合建模

在多领域多尺度融合建模出现以前，主要的建模方式是针对某个特定的领域开发和熟化模型，后期再通过数据融合和集成的办法，把单个的特定领域已经开发和熟化的模型再融合到一起，形成一个综合模型。这种建模方法可操作性较强，有丰富的实践经验，但存在一个无法回避的缺点，即多个特定模型的融合深度不足，且很难做到完全合理的解释。

与传统的建模方式不同，多领域多尺度的融合建模从不同的领域、不同的视角，在最初的概念形成、初始设计阶段，就从深度的机理层次进行跨领域的融合建模，并且，不论是在正常的工况还是在非正常的工况下，均采用这种建模办法。多领域多尺度的融合建模利用不同时间长度和尺度，通过参数的调节来链接更多的模型，能够实现比传统的建模方式更高的精度<sup>[3]</sup>。

### 2.2 数据驱动与物理模型融合的状态评估

虽然多领域多尺度的融合建模有了一定的发展，但面对机理结构复杂的对象，要完全实现精准可靠的数字模型仍非常困难，如果仅依靠对目标对象解析物理模型来对复杂对象的状态进行评估，就不能得到准确的结果。因此，只有利用数据驱动的方法，把历史的数据和实时的数据均用于对物理模型的补充、修正中去，实现对系统真实状态的更精准模拟，以获取更加完善的评估结果。

目前，针对将数据驱动和解析模型相融合的办法主

要有两个，一个是把数据驱动作为解析模型参数修正的依据，获取更加真实的物理模型；另外一种办法是对解析模型和数据驱动同时采用，通过加权的方法把二者输出的数据结合，实现更精准的评估。

### 2.3 数据采集和传输

要实现物理实体、系统或流程的数字模拟，最基础的层面是要实现对目标对象状态的实时数据采集和传输。实时的数据采集和传输，主要有两方面的要求，首先是采集的范围要广，能够覆盖目标对象的各个方面，例如目标对象的温度、压力、震动等，均要能够通过传感器实现精准的数据采集。其次则是要有一套稳定可靠、传输速度快的数据传送系统，保证通过分布式传感器采集的数据能够实时地到达信息平台，用于数字模型的建构和更新。

随着科技的日趋进步，传感器水平的迅速提升和新型传输技术的实现为数字孪生技术的发展奠定了坚实的

基础。例如高度集成的微机电系统传感器，以及通信领域的NB-IoT技术，这些新型的数据传感器和传输技术，既能实现高度集成，又能实现低成本大规模应用。

### 2.4 云计算和边缘计算

数字孪生技术因为大规模应用传感器采集数据、利用通信技术传输数据，利用多尺度多领域融合建模技术实现数字模型建构，因此其复杂功能的每一步都依赖于一个高性能的计算平台，以保证各项实时性指标的实现。为了提高计算性能，数字孪生技术有两大保障。首先是广泛应用了依靠分布式计算的云计算技术，依靠众多的云服务器资源，根据算力的大小需求灵活地调动算力资源；其次是依赖于边缘计算的发展，它是集成网络、计算、存储、应用为一体的平台，能够在靠近物的一侧或者是靠近数据源头的一侧，就近地开展计算服务。同时，边缘计算也可以与云计算相结合，云计算可以访问边缘计算的历史数据。



图2 数字孪生的技术架构

## 3 数字孪生系统的应用

### 3.1 空间技术中的应用

在密歇根大学的Grievens M.W.教授首次提出了数字孪生技术的概念以后，NASA就在2010年在空间技术路线图中引入了数字孪生技术的概念，并将其应用到空间设备设计中。以卫星设备的数字孪生技术为例，利用数字孪生技术，通过实时的数据传输能够在地面信息平台建立在轨卫星的数字孪生模型，对在轨卫星的各项运行指标进行实时监测，对其运行状态进行评估，并对预期寿命进行测算，让地面站的工程师能够对在轨卫星的各项状态进行深入地认知<sup>[4]</sup>。通过对在轨卫星运行状态的评估和寿命预测，进一步地优化在轨卫星的工作调度管理，从而实现在轨卫星使用寿命的尽量延长，降低卫星的整体使用成本。

### 3.2 军事技术中的应用

继NASA将数字孪生技术纳入太空技术路线图并进行实践应用之后，美国空军也认识到了数字孪生技术对精密、复杂的军事装备的重要性，并于一年之后将数字孪生

技术引入到战斗机的机体结构寿命评估模型中。在初步应用之后，美国空军进一步将其扩展到了更广的应用范围，先是应用到了飞机机身的状态评估，然后美国空军把设计制造、材料应用、设备维护等所有数据导入数字孪生系统，建立了飞机的全寿命周期的数字孪生模型。利用该模型，可以通过对目标飞机的虚拟飞行分析，来分析其整体状态，并对目标飞机的负载、飞行时长等方面提出建议，来确保飞机的安全性，减少飞机的维护后勤负担。

### 3.3 工业制作领域的应用

在民用领域，数字孪生技术的应用也发展迅速。曾在2017年和2018年被美国咨询公司Gartner评为“十大战略性科技趋势之一”。目前，民用领域应用数字孪生技术比较有代表性的公司有GE、西门子、ANSYS等。ANSYS利用数字孪生技术开创了数字孪生平台产品，该平台与工业物联网可以实现迅速链接，来为ANSYS的客户提供设备故障诊断，制定对应的维护计划等，确保大型设备不因计划之外的原因导致停机，从而产生额外成

本,达到优化资产产出的目的<sup>[5]</sup>。与ANSYS不同的是,GE则走了一条对资产、系统和集群进行数字孪生的道路,通过数字孪生构建的数字模型,对所有资产的全生命周期进行评估和预测,以更好地优化资源配置<sup>[6]</sup>。

#### 4 数字孪生系统面临的挑战

目前,数字孪生技术在多种新技术的加持下,展现出了巨大的发展前景和价值变现能力,受到了军用、民用等多个行业领域的关注、研究和实践,并且已经取得了一批研究和实践成果。但我们依然要看到,数字孪生技术的发展目前还面临众多挑战,如何解决其它行业数字化设计水平较低、复杂工业系统和复杂装备数据价值较低等问题,尚未获得明确的答案。

##### 4.1 多行业的数字化设计水平较低

虽然航空航天、机器人制造、大型装备等行业在集成创新方面获得了很多成果,但在基础技术和基础设计方面,依然尚未取得本质的进步。在这些技术集成度高的行业以外,其他的传统行业更是缺乏数字化的硬件和软件能力。一是在技术储备上,传统行业对数字孪生技术所需要的基础数学模型、仿真模型和核心部件的数字仿真能力都十分缺乏,想要取得快速的技术积累和突破是不现实的。二是数字孪生技术在构建物联网方面需要投入大量的传感器、建立通信信道、建设信息化平台,都需要在原有设备的基础上,投入大量的资本进行设备更新和优化。

##### 4.2 复杂工业系统和复杂装备数据价值较低

很多大型设备制造和应用企业随着物联网和信息化技术的快速发展,也在布局本企业的信息化系统平台,用来进行设备诊断、健康管理等。部分企业因前期信息化系统平台的应用已经收集了大量的数据信息。但一方面,企业的工程师和专业的数据分析师存在有本质上的差别,以及企业管理、技术层面的支撑不足,数字孪生技术的研究、应用方面还受到很大限制<sup>[7]</sup>;另一方面,目前收集的数据信息缺乏数字孪生技术先进理念的指导,在数据收集的质量上难以用于在信息化平台进行数字模拟,如果企业需要快速实现工业设备的实时数字模拟,受到数据资源的限制很难实现。

##### 4.3 垂直领域的软件专业化水平较低

太空技术领域、航天领域、军事装备领域等垂直领域,虽然创新集成技术并不缺乏,但在数字孪生技术领域,依然在软件方面存在技术限制,专业化的水平还有很大的提升空间,相应的人才储备和市场化空间还需要进一步探索。虽然GE研制的Predix平台把自身定位于可以应用到各大行业解决数字建模的问题,但不同行业却存在巨大的差别,即便可以直接移植GE的Predix平台,

但基本都很难在短期内建成数字孪生技术的应用平台。

#### 4.4 成本和收益、研究和应用间的差距短期内难于弥

虽然数字孪生技术从现有的发展前景来看,在未来可以取得巨大的价值转化。但前期要进行大规模的基础硬件、软件、人才投入和储备,产出还需要较长一段时间,规模较小的企业难以平衡投入的成本和眼前几乎没有产出的收益,这也会成为数字孪生技术发展面临的一个巨大挑战。

### 5 总结和展望

#### 5.1 总结

数字孪生技术的诞生不是偶然的,它依赖于相关技术如多领域多尺度融合建模技术、数据驱动与物理模型融合的状态评估技术、数据采集和传输技术、云计算和边缘计算等一系列相关技术的成熟,才能实现数字孪生技术设计的最初目的。虽然目前数字孪生技术在空间技术、军事技术、工业制造等领域已经有了一些初步的运用,但其依然面临多行业的数字化设计水平较低、复杂工业系统和复杂装备数据价值较低、垂直领域的软件专业化水平较低、成本收益短时间内难以弥补等众多的问题和挑战。

#### 5.2 展望

数字孪生依赖感知和控制,伴随着6G技术、AI/ML以及安全技术的发展和成熟<sup>[8]</sup>,有助于建立更完善有效的数字化模型,贯通信息孤岛构成数字孪生社会,产生的人类生活共同体,实现可持续发展。

### 参考文献

- [1]GRIEVES M. Virtually perfect: Driving innovative and lean products through product lifecycle management[M]. Florida: Space Coast Press, 2011.
- [2]彭宇,刘大同,彭喜元.故障预测与健康管理技术综述[J].电子测量与仪器学报,2010,24(1):1-9.
- [3]焦威.数字双胞胎技术介绍[J].数字化用户,2019,25(017):191-193.
- [4]彭喜元,庞景月,彭宇,等.航天器遥测数据异常检测综述[J].仪器仪表学报,2016,37(9):1929-1945.
- [5]何春平.基于数字孪生技术的资产管理方法,存储介质和移动终端:,CN112633822A[P].2021.
- [6]苗田,张旭,熊辉,等.数字孪生技术在产品生命周期中的应用与展望[J].计算机集成制造系统,2019,025(006):1546-1558.
- [7]樊留群,丁凯,刘广杰.智能制造中的数字孪生技术[J].制造技术与机床,2019(7):6.
- [8]刘大同,郭凯,王本宽,等.数字孪生技术综述与展望[J].仪器仪表学报,2018,39(11):10.