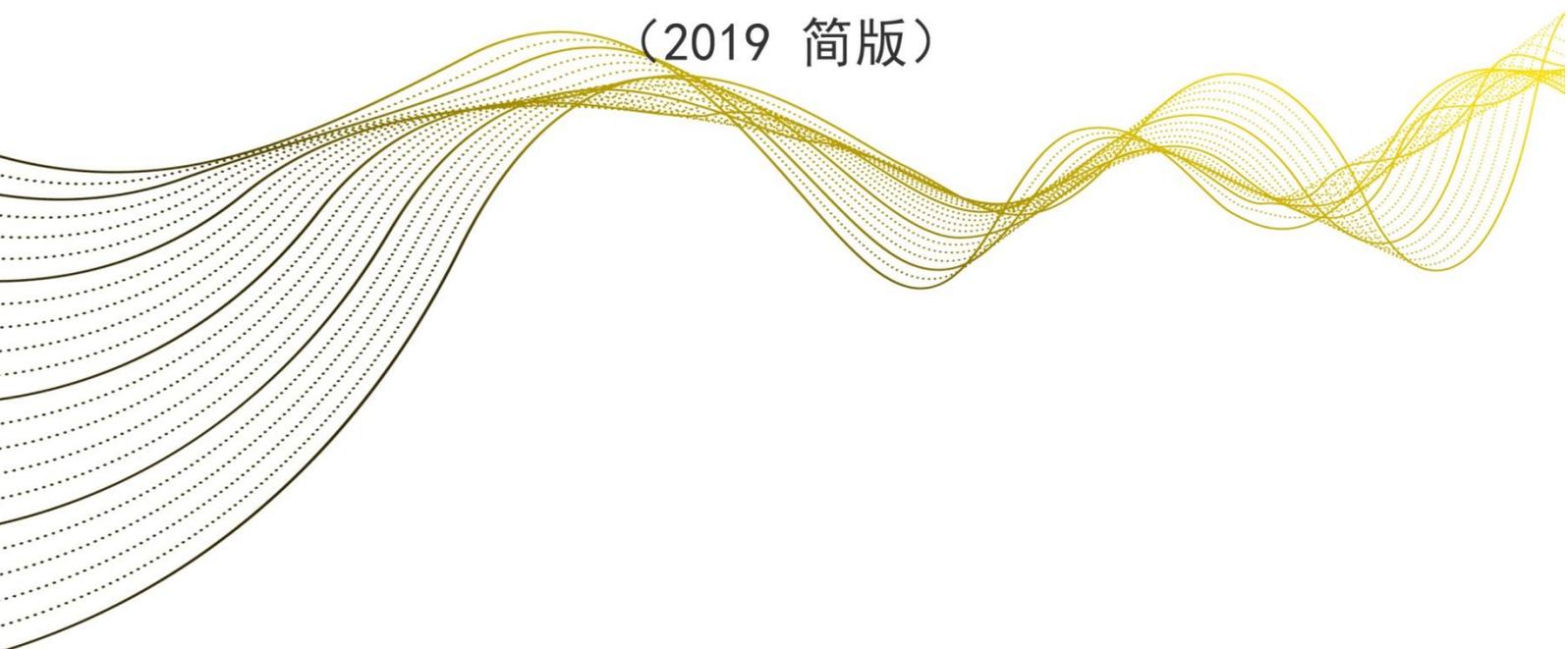


数字孪生体 技术白皮书

(2019 简版)



安世亚太科技股份有限公司
数字孪生体实验室

编委会成员

田 锋

安世亚太公司高级副总裁，北京市综合仿真实验室主任，数字孪生体实验室主任。拥有二十多年研发、技术、管理与咨询经历，为近百家企业提供研发体系规划、建设和信息化咨询，是航空三大主机所、船舶工业某研究院、中车集团等企业的精益研发、知识工程、仿真体系等项目的总设计师，著有《精益研发 2.0》、《知识工程 2.0》、《制造业知识工程》等书籍。

段海波

博士，安世亚太公司咨询总工程师，数字孪生体实验室北美分部主任。INCOSE CSEP (2017)，MATRIZ 三级认证 (2005)；ISO/TC184/SC4、SAC/TC159/SC4 和 SAC/TC28/SC7 委员。

杨振亚

安世亚太公司仿真业务部总经理，中国化工学会过程模拟及仿真专业委员会委员。长期从事计算机辅助设计 (CAE) 软件的技术支持、项目咨询和产品管理工作，在仿真软件 (Fluent, CFX, Flownex, Twinmesh, Rocky 等) 的技术应用方面积累了丰富的经验。

丁 杰

安世亚太战略合作部副总经理，数字孪生体实验室顾问。六西格玛黑带、TOGAF 高级认证 (2015)，美国质量协会 ASQ 和企业架构联盟 AEA 会员。二十余年制造业管理咨询、信息化规划和实施，三年增材制造生态圈战略合作经营经验。

陈志强

安世亚太战略合作部咨询顾问。二十年企业管理咨询和信息化规划，三年增材制造生态圈业务拓展。在企业质量管理、供应链管理、企业管理体系规划等方面积累了丰富的丰富经验。

编写顾问

胡 权

工业 4.0 研究院院长兼首席经济学家，开源工业互联网联盟暨数字孪生体联盟理事长。关注第四次工业革命的经济基础、竞争规律和商业模式的研究，涉及工业 4.0、智能制造、工业互联网、人工智能和数字孪生体等先进技术及应用，目前研究重点在通用目的技术。

编者按

这几年，数字孪生体的概念炙手可热，越来越成为从工业到产业、从军事到民生各个领域的智慧新代表。

在工业界，无论智能制造还是工业 4.0，这些智能化体系都需要网络化和数字化两只轮子来支撑。在中国，工业互联网已成为其中一只，而数字孪生体将成为另外一只。

数字孪生体将撑起数字化之轮，但又不止于数字化。数字孪生体的突破在于：它不仅仅是物理世界的镜像，也要接受物理世界的实时信息，更要反过来实时驱动物理世界，而且进化为物理世界的先知、先觉甚至超体。这个演变过程称为成熟度进化，即一个数字孪生体的生长发育将经历数化、互动、先知、先觉和共智等几个过程。这里首先要强调互动，因为没有实时互动，数字世界和物理世界之间其实是伪孪生。其次，我们提出“数字孪生体是仿真应用新巅峰”这一论断，因为在数字孪生体成熟度进化的每个过程中，仿真都扮演着不可或缺的角色。另外，我们还提出将“共智”作为数字孪生体的理想态，人类认知所限，物理世界各物件是否在“共智”我们不得而知，但数字世界提供了无限便利以实现“共智”，让我们可以把数字孪生体的价值挖掘到极致。

数字孪生体的应用绝不止于工业，我们应以更抽象的层次总结架构和技术，以更广阔的视角来观察场景和案例。本白皮书的第一部分关注对数字孪生体的抽象和总结。无论是参考架构、成熟度模型还是关键技术，都以“放之四海皆准”为原则。其余的章节，我们分别在工业、产业、民生和军事等四个领域分别选择了最关键的场景做实例化论述：数字孪生制造、数字孪生产业、数字孪生城市和数字孪生战场。

田 锋

安世亚太公司 高级副总裁

数字孪生体实验室 主任

2019 年 12 月 20 日

《白皮书（全版）》目录

一、数字孪生体发展综述

二、数字孪生体的定义

三、数字孪生体的模型

(一) 数字孪生体的概念模型

(二) 数字孪生系统参考架构

(三) 数字孪生体的应用框架

(四) 数字孪生体成熟度模型

四、数字孪生体的关键技术

(一) 建模

(二) 仿真

(三) VR、AR 及 MR

(四) 数字线程

(五) 系统工程与 MBSE

(六) 物联网

(七) 云、雾与边缘计算

(八) 大数据与机器学习

(九) 区块链

五、数字孪生制造

(一) 现状

(二) 综述

(三) 数字孪生制造参考架构

(四) 数字孪生制造的关键技术

(五) 数字孪生制造的典型应用场景

(六) 典型应用案例

六、数字孪生产业

(一) 现状

(二) 综述

(三) 数字孪生产业参考架构

- (四) 数字孪生产业的关键技术
- (五) 数字孪生产业的典型应用场景
- (六) 典型应用案例

七、数字孪生城市

- (一) 现状
- (二) 综述
- (三) 数字孪生城市参考架构
- (四) 数字孪生城市的关键技术
- (五) 数字孪生城市的典型应用场景
- (六) 典型应用案例

八、数字孪生战场

- (一) 现状
- (二) 综述
- (三) 数字孪生战场参考架构
- (四) 数字孪生战场的关键技术
- (五) 数字孪生战场的典型应用场景
- (六) 典型应用案例

九、数字孪生体标准化进展

- (一) 标准化相关活动
- (二) 相关标准研发进展

十、结论

参考文献

一、数字孪生体的定义

本白皮书给出数字孪生体的定义如下：数字孪生体是现有或将有的物理实体对象的数字模型，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，通过优化和指令来调控物理实体对象的行为，通过相关数字模型间的相互学习来进化自身，同时改进利益相关方在物理实体对象生命周期内的决策。

二、数字孪生系统参考架构

本白皮书提出数字孪生系统的通用参考架构。一个典型的数字孪生系统包括用户域、数字孪生体、测量与控制实体、现实物理域和跨域功能实体共五个层次。

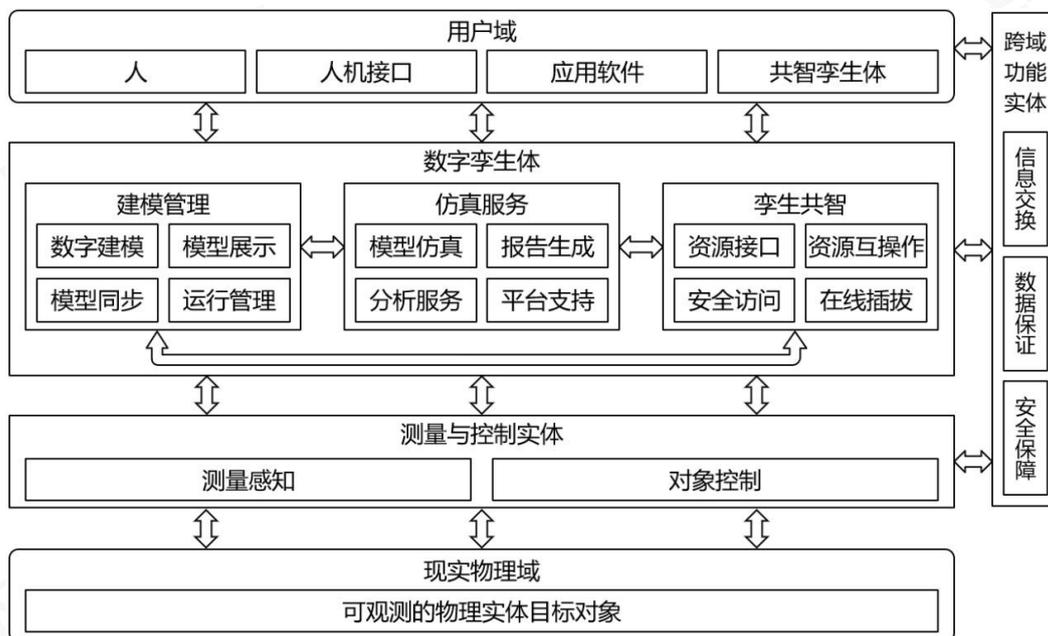


图 1. 数字孪生系统的通用参考架构

第一层是使用数字孪生体的用户域，包括人、人机接口、应用软件，以及其他相关数字孪生体（本白皮书称之为共智数字孪生体，可简称共智孪生体）。

第二层是与物理实体目标对象对应的数字孪生体。它是反映物理对象某一视角特征的数字模型，并提供建模管理、仿真服务和孪生共智三类功能。建模管理涉及物理对象的数字建模与展示、与物理对象模型同步和运行管理。仿真服务包括模型仿真、分析服务、报告生成和平台支持。孪生共智涉及共智孪生体等资源的接口、互操作、在线插拔和安全访问。建模管理、仿真服务和孪生共智之间传递实现物理对象的状态感知、诊断和预测所需的信息。

第三层是处于测量控制域、联接数字孪生体和物理实体的测量与控制实体，实现物理对象的状态感知和控制功能。

第四层是与数字孪生体对应的物理实体目标对象所处的现实物理域。测量与控制实体和现实物理域之间有测量数据流和控制信息流的传递。

测量与控制实体、数字孪生体以及用户域之间的数据流和信息流动传递，需要信息交换、数据保证、安全保障等跨域功能实体的支持。信息交换通过适当的协议实现数字孪生体之间交换信息。数据保证负责数据传递的安全保障，负责数据和信息传递的认证、授权和保密。数据保证和安全保障一起提供数据的准确性和完整性。

三、数字孪生体成熟度模型

数字孪生体不仅仅是物理世界的镜像，也要接受物理世界实时信息，更要反过来实时驱动物理世界，而且进化为物理世界的先知、先觉甚至超体。这个演变过程称为成熟度进化，即一个数字孪生体的生长发育将经历数化、互动、先知、先觉和共智等几个过程。

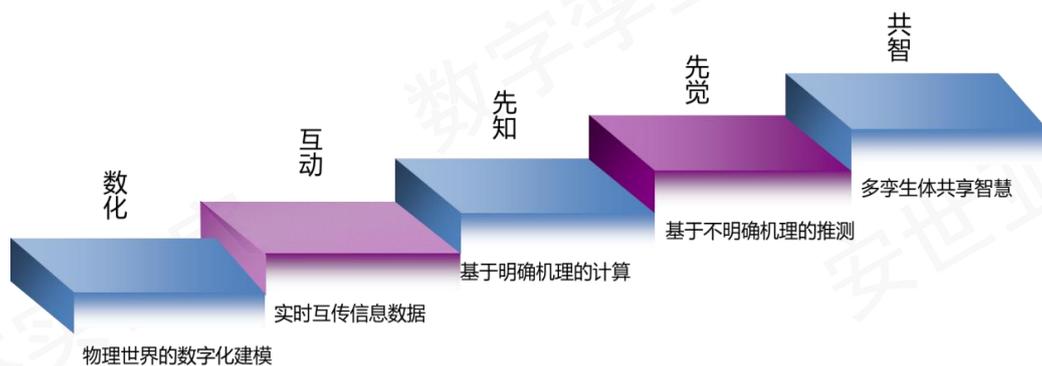


图 2. 数字孪生体成熟度模型

1. 数化

“数化”是对物理世界数字化的过程。这个过程需要将物理对象表达为计算机和网络所能识别的数字模型。建模技术是数字化的核心技术之一，例如测绘扫描、几何建模、网格建模、系统建模、流程建模、组织建模等技术。物联网是“数化”的另一项核心技术，将物理世界本身的状态变为可以被计算机和网络所能感知、识别和分析。

2. 互动

“互动”主要是指数字对象间及其与物理对象之间的实时动态互动。物联网是实现虚实之间互动的核心技术。数字世界的责任之一是预测和优化，同时根据优化结果干预物理世界，所以需要将指令传递到物理世界。物理世界的新状态需

要实时传导到数字世界，作为数字世界的新初始值和新边界条件。另外，这种互动包括数字对象之间的互动，依靠数字线程来实现。

3. 先知

“先知”是指利用仿真技术对物理世界的动态预测。这需要数字对象不仅表达物理世界的几何形状，更需要在数字模型中融入物理规律和机理。仿真技术不仅建立物理对象的数字化模型，还要根据当前状态，通过物理学规律和机理来计算、分析和预测物理对象的未来状态。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。

4. 先觉

如果说“先知”是依据物理对象的确定规律和完整机理来预测数字孪生体的未来，那“先觉”就是依据不完整的信息和不明确的机理通过工业大数据和机器学习技术来预感未来。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。

5. 共智

“共智”是通过云计算技术实现不同数字孪生体之间的智慧交换和共享，其隐含的前提是单个数字孪生体内部各构件的智慧首先是共享的。所谓“单个”数字孪生体是人为定义的范围，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体，这个数量和层次可以是无限的。众多数字孪生体在“共智”过程中必然存在大量的数字资产的交易，区块链则提供了最佳交易机制。

表 数字孪生体成熟度模型、关键特征和关键技术

级别	名称	关键特征	关键技术
1	数化	对物理世界进行数字化建模	建模/物联网
2	互动	数字间及其与物理之间实时互传信息和数据	物联网/数字线程
3	先知	基于完整信息和明确机理预测未来	仿真/科学计算
4	先觉	基于不完整信息和不明确机理推测未来	大数据/机器学习
5	共智	多个数字孪生体之间共享智慧，共同进化	云计算/区块链

四、数字孪生体核心技术

从数字孪生系统参考架构可见：建模、仿真和基于数据融合的数字线程是数字孪生体的三项核心技术；能够做到统领建模、仿真和数字线程的系统工程和

MBSE，则成为数字孪生体的顶层框架技术；物联网是数字孪生体的底层伴生技术；而云计算、机器学习、大数据、区块链则是数字孪生体的外围使能技术。

1. 建模

“数化”是对物理世界数字化的过程。这个过程需要将物理对象表达为计算机和网络所能识别的数字模型。建模的目的是将我们对物理世界或问题的理解进行简化和模型化。而数字孪生体的目的或本质是通过数字化和模型化，用信息换能量，以更少的能量消除各种物理实体、特别是复杂系统的不确定性。所以建立物理实体的数字化模型或信息建模技术是创建数字孪生体、实现数字孪生的源头和核心技术，也是“数化”阶段的核心。

2. 物联网

“数化”中的另一层意思是物理世界本身的状态变为可以被计算机和网络所能感知、识别和分析，这些状态包括位置、属性、性能等。物联网技术为原子化向比特化转变提供了完整的解决方案。同时物联网为物理对象和数字对象之间的“互动”提供了通道。

3. 数字线程

“互动”是数字孪生体的一个重要特征，主要是指物理对象和数字对象之间的动态互动，当然也隐含了物理对象之间的互动以及数字对象之间的互动。前两者通过物联网实现，而后者则是通过数字线程实现。能够实现多视图模型数据融合的机制或引擎是数字线程技术的核心。

4. 仿真

“先知”是指对物理世界的动态预测。这需要数字对象不仅表达物理世界的几何形状，更需要数字模型中融入物理规律和机理，这是仿真世界的特长。仿真技术不仅建立物理对象的数字化模型，还要根据当前状态，通过物理学规律和机理来计算、分析和预测物理对象的未来状态。物理对象的当前状态则通过物联网和数字线程获得。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，譬如产品仿真、虚拟试验、制造仿真、生产仿真、工厂仿真、物流仿真、运维仿真、组织仿真、流程仿真、城市仿真、交通仿真、人群仿真、战场仿真等。

5. 虚拟现实

人类通过屏幕与数字世界交互既不直观、不真实，而且交互的深度受到巨

大限制。虚拟现实（VR）、增强现实（AR）及混合现实（MR）等三种技术提供的深度沉浸技术让人类与数字世界的交互方式与物理世界类似，使数字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，例如穿墙而过、隔空取物、时空穿越、变换大小等，将数字孪生体的应用推向极致。

6. MBSE

系统工程的建模和仿真方法和流程可以作为顶层框架分别指导系统级数字孪生体和体系级数字孪生体（如共智孪生体）的构建和运行。MBSE（基于模型的系统工程）是创建数字孪生体的框架，数字孪生体可以通过数字线程集成到 MBSE 工具套件中，进而成为 MBSE 框架下的核心元素。从系统生存周期的角度，MBSE 可以作为数字线程的起点，使用从物联网收集的数据，运行系统仿真来探索故障模式，从而随着时间的推移逐步改进系统设计。

7. 大数据

如果说“先知”是依据物理对象的确定性规律和完整机理来预测数字孪生体的未来，那“先觉”就是依据不确定和不完整的信息来预感未来，这是大数据的强项。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。

8. 云计算

“共智”的目标是实现世界上所有数字孪生体智慧的交换和共享，其隐含的前提是单个数字孪生体内部各构件的智慧首先是共享的。云计算、雾计算和边缘计算则为数字孪生体内部和之间进行智慧共享提供了可能。当然，所谓“单个”数字孪生体是人为定义的范围，多个数字孪生单体可以通过共智形成更大的数字孪生体，这个数量可以是无限的。

9. 区块链

数字孪生体是典型的数字资产。在众多数字孪生体“共智”的过程中，必然存在数字资产的交易。区块链提供的去中心化的交易机制能很好地支持分布、实时和精细化的数字资产交易，可以成为数字孪生体最佳的资产交易媒介。同时它也能引入信任度，持续保持透明度，很好地支持数字资产交易生态系统的参与主体，包括数字资产的采集、存储、交易、分发和服务各个流程的参与者。

以上技术为数字孪生体的通用核心技术，数字孪生体在工业、产业、民生和

军事等领域的应用中，应有更多具体技术。这在白皮书的具体场景中展开介绍。

五、数字孪生体典型应用

数字孪生体的应用广泛，本白皮书分别在工业、产业、民生和军事等四个领域选择了最关键的领域做实例化论述：数字孪生制造、数字孪生产业、数字孪生城市和数字孪生战场。

1. 参考架构的实例化

针对不同领域，对通用参考架构做了实例化，主要的变化在于：

- 对现实物理域的物理对象做了实例化展开；
- 对数字孪生体中的数字组件做了实例化展开；
- 测量和控制实体的元素做了实例化展开。

2. 成熟度模型的实例化

针对不同领域，对通用成熟度模型做了实例化，分别给出了数化、互动、先知、先觉和共智在各领域的实例化特征。

3. 特定领域的核心技术

针对不同领域，讨论了其特定核心技术：

- 数字孪生制造：CAD、CAE、工艺仿真、工厂仿真、工业控制、CAM、MES、PLM、ERP；
- 数字孪生产业：创成式设计、增材制造、增材制造执行系统（AMES）、物流仿真；
- 数字孪生城市：测绘技术、BIM、3D-GIS、CIM、城市仿真、人脸识别；
- 数字孪生战场：毁伤与损伤评估、体系仿真、军用数据链、战场感知。

4. 特定领域的实例化场景

针对不同领域，讨论了其特定场景：

- 数字孪生制造：研发设计、生产制造；
- 数字孪生产业：市场营销和电子商务、供应链和物流、产品使用和维护；
- 数字孪生城市：市政、交通、环保、安防、医疗、服务、社区、景区等；
- 数字孪生战场：单兵（装备）作战、多兵种战役、战略决策。

5. 特定领域的应用案例

针对不同领域，讨论了其典型案例：

- 数字孪生制造：物料堆放场设计、机床、水泵运行、二氧化碳循环；

- 数字孪生产业：GE 航空发动机；
- 数字孪生城市：虚拟新加坡；
- 数字孪生战场：单兵与作战小队作战训练、航母战斗群体系对抗。

六、结论

本白皮书在吸收了全球在数字孪生体领域最新研究成果的基础上，做了一定创新和发展。我们在数字孪生体参考模型以及标准建设等方面，紧跟国际权威机构的研究成果。在大框架上不特立独行，但在国际空白领域、尚无定论环节和具体应用方案上大胆创新和创造。

首先，不仅限于当前研究较多的工业（或制造业）和城市领域，在产业和军事领域，数字孪生体也将大有可为。所以，作为数字孪生体的通用白皮书，对实例化应用的抽象和总结是首要任务，其次还要回归到更大范围的实践中。

其次，以往的数字孪生体研究过于偏重于数字化，更像是数字化技术的微小升级。其实仅就数字化而言，在 PLM、虚拟城市、战场仿真、工业大数据等方面都已经有很成熟的研究成果，应用也较为成功。所以，我们将数字孪生体的研究视角提升到“互动”和“共智”层面，强调虚实动态实时互动，以及相关数字孪生体的共同进化。这才是数字孪生体区别于过往研究的重点所在，也是该体系价值最大的领域。

再次，我们提出“数字孪生体是仿真应用新巅峰”这一论断：“数化”的核心技术——建模总是和仿真联系在一起，或是仿真的一部分；“互动”是半实物仿真中司空见惯的场景；“先知”的核心技术本身就是仿真；有很多学者将“先觉”中的核心技术——工业大数据视为一种新的仿真范式；“共智”需要通过不同孪生体之间的多学科耦合仿真才能让思想碰撞，才能产生智慧的火花。

最后，关于数字孪生体的成熟度模型，也是基于以上的考虑，从更为抽象的层次和更具价值的领域出发，提出一个放之四海皆准且有益于数字孪生体这门学科进化发展的模型。



关注官方订阅号
DigiTwinLab

致力于数字孪生体技术的研究与发展
通过解决方案和工程化应用造福人类

① 关注**数字孪生体实验室**公众号



② 回复“**2019白皮书**”

获取完整详细版白皮书



数字孪生体实验室
DIGITAL TWIN LABORATORY