



清华大学深圳国际研究生院
Tsinghua Shenzhen International Graduate School

职途圈www.zhituquan.com

版本：INNOBASE-2021-P0501
数字化转型系列讲座



数字孪生制造新范式

——影响未来十年的先进制造技术和实践

胡权

工业4.0研究院院长、数字孪生体联盟理事长
国家发改委数字经济新型基础设施课题数字孪生体工作组组长
工信部工业领域评标评审专家库专家

2021年5月16日

官方微信：zhituquan



数字孪生体联盟

目录

一 先进制造需要解决什么问题？

二 全球数字孪生制造三大流派

三 打造数字孪生体 DigitaltwinNet

四 工业4.0研究院的探索与实践

一 先进制造需要解决什么问题？

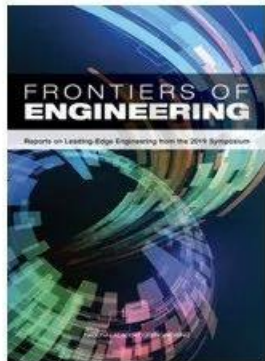
二 全球数字孪生制造三大流派

三 打造数字孪生体 DigitaltwinNet

四 工业4.0研究院的探索与实践

一、2019年，美国工程院发布《工程前沿》报告，指出四个关注领域，其中数字孪生体是数字化转型时代的先进制造技术

- 自2009年DARPA提出“数字孪生体”概念之后，美国科学家和工程师通力合作，解决了理论研究、工程验证（概念）、关键技术等问题。工业4.0研究院认为，数字孪生体范式基本形成。
- 美国空军研究实验室专家帕米拉·可布林回顾了数字孪生体10年发展情况，做了精彩的演讲，她判定，数字孪生体范式建设已经进入到新阶段了。



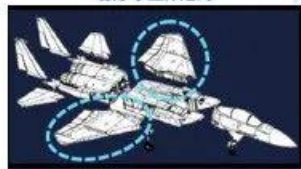
提出数字孪生体概念



验证数字孪生体概念



数字孪生体范式



追溯到上个世纪80年代，日美先进制造之争，体现了高度集成架构和开放架构两种工业哲学的竞争，其影响一直延续至今

- 对于自动化行业来讲，“集成”是一个关键词汇，为了完成某种技术应用目标，设计某种特定的工程系统就成为装备系统的核心工作了。所谓特定的工程系统，可以重用的级别大都在“部件”，而不是“系统模块”，这实际上是人类社会工业化进程中一直的困惑：非标（非标准化）。
- 美国希望采用开放架构，重构工业系统，但最终并未实现该目标。



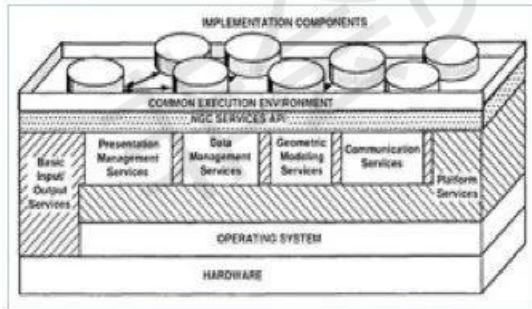
1989年6月，在通产省机械信息产业局举行了“工厂自动化愿景”座谈会，会议汇总了关于面向21世纪工厂自动化未来展望的报告。

VS



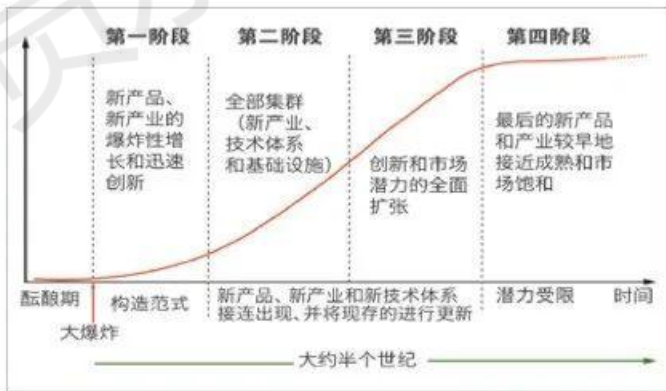
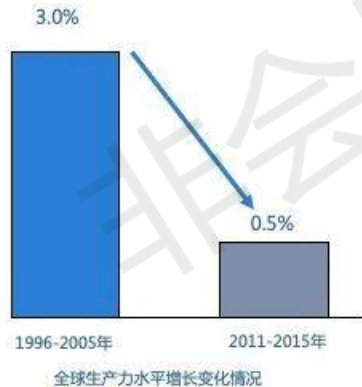
1989年，美国空军下属实验室发起了《下一代控制器》（Next Generation Controller）的计划，希望通过开放的架构和标准与德国和日本竞争。

- 2019年5月19日,本人在中国自动化学会前沿学科分享中,以《工业互联网体系下的控制系统命题》做了一次分享,认为工业互联网即为“开放架构”,它延续了早期的NGC工程模式,但如何平衡数字化和工业化需要,这是一个较为突出的挑战。
- 数字化容易实现“服务化”和“分享”目标,但对于工业化来讲,容易大幅改变传统的价值链结构,从而使得大家都不愿意去做工艺、材料等方面的改进,这会导致完整产业链有部分缺失,从而使得“产业化”的目标难以形成。



回到全球先进制造业竞争格局，各个国家都希望解决技术周期切换的问题，找到一种新制造范式，引入新一代数字技术，提升生产力水平

- 在过去20年期间，全球制造业普遍处于生产过剩的状态，一方面促使解决生产力效率的互联网蓬勃发展，另一方面，全球主要发达国家推进“去工业化”（转移低端产能）和“再工业化”（加强先进制造）的进程。中国在2015年开始进入第四次工业革命竞争中来了。



对于进入后工业时代（人均GDP为1万美金）的中国，如何平衡数字化和工业化之间的融合，是第四次工业革命的核心命题

- 进一步推进互联网公司的反垄断，重点解决其“市场话语权”太大的弊端。互联网公司本质上不创造“工业增加值”，从推进我国制造业高质量转型来讲，必须适当控制互联网公司毫无边界发展的势头。
- 对于工业企业数字化转型来看，继续推进两化融合，让多种制造范式进行应用，以适应制造业多样化的特点和要求，诸如工业互联网、数字孪生制造等新范式的应用，有助于突破开放和集成的瓶颈，推动先进制造业进入第四次工业革命发展阶段。



目录

一 先进制造需要解决什么问题？

二 全球数字孪生制造三大流派

三 打造数字孪生体 DigitaltwinNet

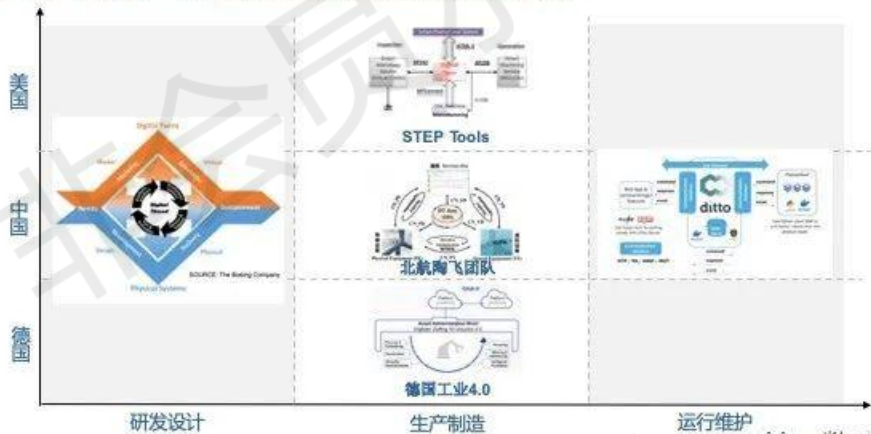
四 工业4.0研究院的探索与实践

二、从研发设计、生产制造和运行维护三个阶段来看，美国、中国和德国形成了三种不同的模式，特别是生产制造环节基于各种原因有较大的不同

智途圈 www.zhituquan.com

工业4.0研究院
ACADEMY OF INDUSTRIE 4.0

- 在研发设计和运行维护两个环节，各国专家有较为一致的选择，但在生产制造环节，主要存在美国、中国和德国三大主流的做法，美国沿袭传统的STEP数据标准，中国以陶飞等学者的看法比较典型，德国依托工业4.0衍生出来的“资产管理壳”（AAS, Asset Administration Shell）。

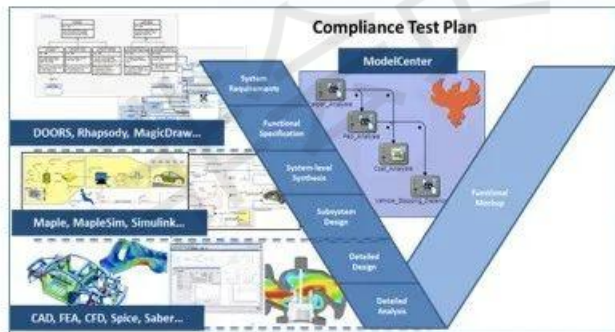


（一）如何解决正向设计问题，大部分基于系统工程V型图做了改进，波音公司和中航工业等公司做了大量的探索

职业圈 www.zhituquan.com

工业4.0研究院
ACADEMY OF INDUSTRIE 4.0

- 随着工业系统数字化程度越来越高，人们引入了系统工程或基于模型的系统工程（MBSE），然而由于系统工程方法过于复杂，对工作人员要求非常高，实际应用上仅限于航空航天、汽车等领域。
- 波音公司主管Don Farr提出，应该改变这样的现状，他牵头发起了系统工程方法的变革，提出了宝石模型。
- 中航工业前副总经理张新国在演讲中，尝试提出了数字孪生体驱动的系统工程方法。



(二) 在生产制造环节，主要形成了美国、中国和德国三大流派，它们决定了全球数字孪生制造流派

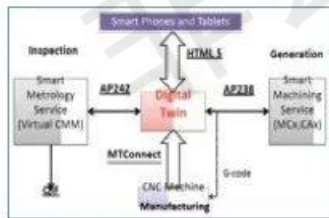
- 美国一直想解决“数字制造”的问题，核心是制造数据的交换、流动和分享，STEP Tools的创始人积极参与了ISO 23247国际标准的制定。
- 中国数字孪生制造模式希望构建类似工业互联网全面的体系，模型较为复杂。
- 德国工业4.0体系下的资产管理壳，过于强调保护传统自动化厂商利用，导致创新不足，进展缓慢。

美国数字孪生制造模式



STEP Tools, Inc.

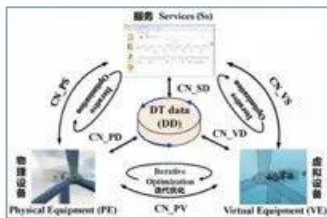
www.steptools.com



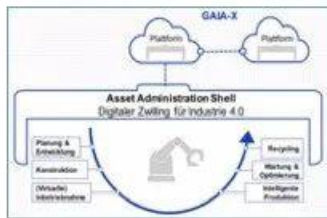
中国数字孪生制造模式



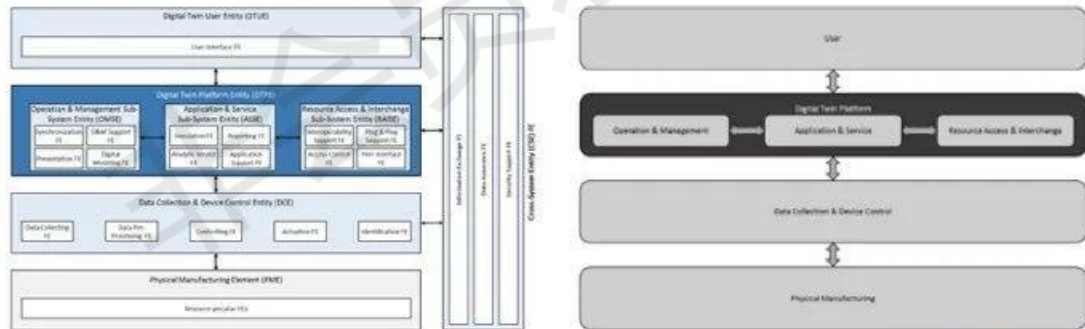
北京航空航天大学



德国数字孪生制造模式



- 目前有不少研究机构围绕ISO 23247设计符合自身需要的数字孪生制造标准。美国STEP Tools结合到美国国防部、NIST和DMDII的需要，做了不少研究工作，延续了上个世纪80年代NIST推进STEP数据交换标准的努力，希望在数字孪生制造方面，继续引领全球的先进制造创新。



来源：ISO 23247国际标准

(三) 在DARPA提出数字孪生体之后, AFRL承担了工程概念验证的任务, 启动“机身数字孪生体”, 其目的就是实现数字孪生运行维护

- 美国空军研究实验室的工程师们, 在为空军战斗机机体结构检修维护的时候, 具有强烈的动机去寻求更好的方法“提高分析的准确性和及时性, 以便为结构维修计划提供信息”。

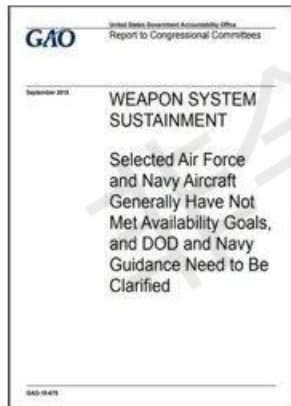


Figure 2: Sustainment Challenges Affecting Selected Air Force Fixed-Wing Aircraft

Aircraft	Aging aircraft	Obsolete maintenance of parts and spares	Delay in depot maintenance	Shortage of depot maintenance personnel	Parts unavailability	Outdated manufacturing manual
B-52	✓	✓	✓	✓	✓	✓
C-17	✓	✓	✓	✓	✓	✓
F-16	✓	✓	✓	✓	✓	✓
F-18	✓	✓	✓	✓	✓	✓
F-35	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Source: GAO Inspector General, GAO-14-478. Discontinuation is a lack of availability of a part due to the lack of confidence in it to no longer current or suitable for production.



目录

一 先进制造需要解决什么问题？

二 全球数字孪生制造三大流派

三 打造数字孪生体 DigitaltwinNet

四 工业4.0研究院的探索与实践

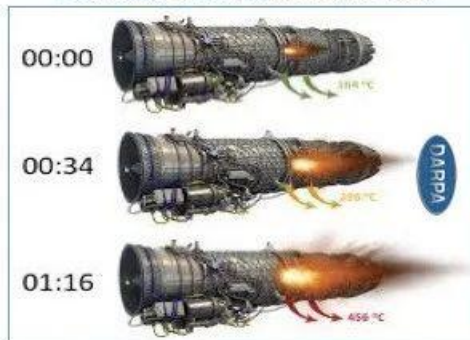
三、2007年李飞飞在ImageNet上的探索，推动了深度学习的发展，当时DARPA深受感触，希望对三维或多维数字物体应用深度学习

- 李飞飞在2007年与普林斯顿大学教授克里斯蒂安·费尔鲍姆会面讨论了该项目，他是WordNet的创建者之一，在WordNet基础上，李飞飞组建了一个研究团队，致力于ImageNet项目。
- ImageNet项目是一个大型视觉数据库，用于视觉目标识别软件研究。该项目已手动注释了1400多万张图像，以指出图片中的对象，并在至少100万张图像中提供了边框。

二维图片 (2D Image)

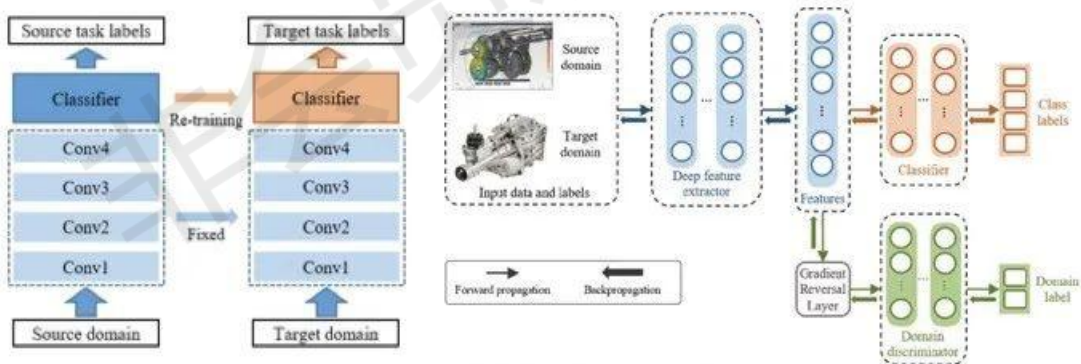


三维/多维数字孪生体 (3D/xD Digital Twin)



对于三维乃至多维的物理系统，可以建立数字孪生体，利用深度学习的方法，实现自动选择特征值（Features）的应用，从而改变物理世界的应用

- 目前不少学者在尝试建立数字孪生体的深度学习方法，主要是基于物理系统自身的深度学习方法，这是从李飞飞之前建立的ImageNet到工业4.0研究院提出的DigitaltwinNet的演进。
- 工业4.0研究院认为，可以为特定物理系统建立深度学习模型和算法，从而实现真正的“深入骨髓”的智能化应用，这应为第四次工业革命的重大突破。

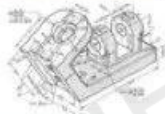


对于物理设备和系统的数字孪生化 (Digital Twinning)，可以有多个维度的三维几何模型，工业4.0研究院把它分为五个等级

职业圈 www.zhituquan.com

- 在《数字孪生体：第四次工业革命的通用目的技术》一书中，胡权明确指出数字孪生化 (DTL, Digital Twinning) 分为5个等级。根据数字孪生化过程中解决的技术难题不同，我们可以把5个等级简化为3大类，分别为初级数字孪生化、中级数字孪生化和高级数字孪生化。

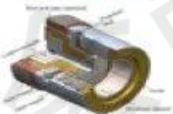
数字孪生化第一级
几何模型



主要解决“可视化”的问题，应用在资产管理中较为有明确价值，可以参考ISO 55000标准



数字孪生化第二级
数据描述



中级数字孪生化/科学孪生化的目标是为了建立物理世界和数字空间之间的数据联系，采用动态数据驱动应用系统 (DDDAS, Dynamic Data-Driven Application Systems) 将是一个较为有效的方法



数字孪生化第三级
数据融合



数字孪生化第四级
动态孪生



为了实现实时场景下的数字孪生化应用，将采用高级数字孪生化 (或自动孪生化)，已在无人驾驶 (环境自动建模) 等领域开始应用，诸如NASA和DARPA提出的更高阶段的数字孪生化将是其应用的终极目标



数字孪生化第五级
自主孪生



如果实现了数字孪生体深度学习的通用方法，那么将对各行各业产生颠覆性影响，工业4.0研究院根据应用特征，分为三大类应用行业和场景

- 在《数字孪生体：第四次工业革命的通用目的技术》一书中，分析了三大类九种行业，指出每种行业的特点和发展规律，阐释了数字孪生体产业的广泛性。
- 数字孪生体技术将在多个领域得到应用，切实推进人类社会各行各业的数字化转型。



编号	行业	特点	种类
1	城市	从目前智慧城市的实践来看，主要用数字孪生体技术来可视化各种资产	资产
2	建筑	建筑常用的BIM，本质上是对建筑元素进行管理	
3	能源	能源管理效率的提升，需要对各种能源单元运行效率进行管理	
4	汽车	汽车不能仅仅作为资产，还需要实现反向控制，才可以起到实时调整优化的效果	控制
5	航空航天	数字孪生体在航空航天领域的应用，跟控制是有紧密联系的	
6	交通	交通的各种数据和可视化，都是为了实现实时控制和管理的目的	仿真
7	医疗健康	要求对人体的细致入微的数字孪生化	
8	材料	从物理特征等进行模拟仿真，以达到理论研究和系统交互控制的目的	
9	国防	对体系 (SoS) 级别的仿真，决定了战争的成败	

目录

一 先进制造需要解决什么问题？

二 全球数字孪生制造三大流派

三 打造数字孪生体 DigitaltwinNet

四 工业4.0研究院的探索与实践

四、自2013年成立以来，工业4.0研究院秉承“引领第四次工业革命”愿景，定位为“兰德”和“DARPA”的有机融合体，加速颠覆性技术的发展

- 工业4.0研究院2015年开始系统研究数字孪生体，形成了完整的方法论和应用场景，目前进入“数字孪生+”战略实施阶段，即在继续推进数字孪生体研究的同时，利用“降维策略”，从入手容易、价值较大的行业建立应用场景，推动数字孪生体往通用目的技术（GPT，General-Purpose Technologies）发展。



（一）在开展数字孪生体研究同时，工信部、国家发改委/中央网信办、工业和信息化部等部分编写政策文件，推动数字孪生体产业发展

- 在工业4.0研究院支撑下，国家发改委和中央网信办于2020年4月7日发布了《关于推进“上云用数赋智”行动 培育新经济发展实施方案》，提出了包含数字孪生体的新一代数字技术和“数字孪生创新计划”等内容。
- 2020年8月21日，国资委发布了《关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知》，提出了要大力应用数字孪生体等新一代信息技术，推动国有企业数字化转型。



(二) 针对电力行业的需要，工业4.0研究院设计了“数字孪生电网”体系，形成了1.0、2.0和3.0的演进路径

- 按照《数字孪生体》一书提出的“降维策略”，电力行业比较适合应用数字孪生体，基于数字孪生基础设施，通过建立全局、全生命周期的数字孪生电网，可以帮助电力企业实现较好的经济效益。
- 目前工业4.0研究院依托数字孪生体联盟，正在开展《数字孪生电网白皮书》的编写。



来源：工业4.0研究院分析

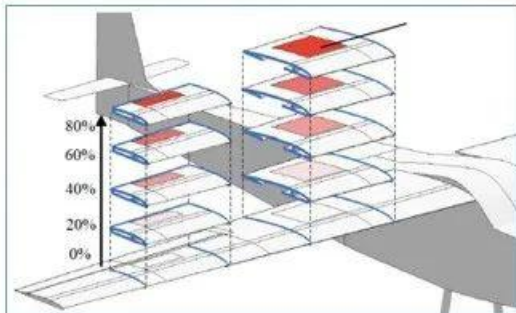
（三）工业4.0研究院为了推动无人系统的发展，建立了“UXV创新实验室”，正在应用深度学习方法，实现真正智能化的无人系统

- 通过建立结构物件多维度数字孪生体，可以引入深度学习方法，从而实现真正意义上的DigitaltwinNet效果，这对于预测性维护乃至个性化系统提供了非常有前景的应用。
- 基于数字孪生城市开源社区，工业4.0研究院在建设智慧城市、智能汽车和能源互联网等一体化的生态。

无人飞行设备（UXV）



基于深度学习的UXV数字孪生模型



工业4.0研究院发起的数字孪生体联盟，代表了中国经济的活力，体现了其前瞻性和创新性，成为全球数字孪生体领域的一支独特力量

- 作为全球第一个数字孪生体行业组织，数字孪生体联盟（DTC, Digital Twin Consortium）由工业4.0研究院牵头发起，于2019年10月16日成立，专注数字孪生体关键技术的研发，立足开源社区建设“数字孪生创新生态”，推动数字孪生体产业发展。



全球各个国家纷纷布局数字孪生体，工业4.0研究院参与其中，扮演了较为重要的角色，希望更多的创新力量加入，共同实现第四次工业革命

国防应用

市场应用

发起单位



中国国防部



中国数字孪生体联盟
(2019年成立)



工业4.0研究院



美国国防部



美国数字孪生体联盟
(2020年成立)



对象管理集团 (OMG)



英国国防部



国家数字孪生体计划
(2018年提出)



英国数字建造中心



无

德国工业数字孪生体协会
(2020年成立)

无标识

德国ZVEI和VDMA联合发起



无

数字孪生体计算计划
(2019年提出)



日本电报电话公司

