

MT 机械工程导报

Mechanical Engineering Trends

<http://www.cmes.org>

2020年第4期 总第209期

浅说数字孪生 p1

数字孪生：第四象限的崛起 p10

工业应用中的数字孪生——定义、商业价值、设计、标准及应用案例 p19

十大科学问题和工程难题专题 p31

人机融合智能的再思考 p39



目录

CONTENTS

机械工程导报

MECHANICAL ENGINEERING TRENDS

1998 年创刊
2020 年第 4 期 (总第 209 期)
2020 年 8 月 28 日出版

主办: 中国机械工程学会工作总部
地址: 北京市海淀区首体南路9号
主语国际4号楼11层
邮编: 100048
电话: 010-68799036 (编辑部)
传真: 010-68799050
E-mail: zhongyg@cmes.org
网址: www.cmes.org
主编: 陈超志
责任编辑: 钟永刚
出版: 《机械工程导报》编辑部
发行: 中国机械工程学会工作总部



院士专稿 FEATURE FROM ACADEMICIAN

浅说数字孪生 1



热点关注 CURRENT POINT

数字孪生: 第四象限的崛起 10

工业应用中的数字孪生
——定义、商业价值、设计、标准及应用案例 19

十大科学问题和工程难题专题 31



专家视点 EXPERT OPINION

人机融合智能的再思考 39



学会资讯 CMES INFORMATION

中国机械工程学会科技经济融合系列活动
在天津(滨海)举行 46

发挥组织优势 细化工作举措 努力完成全年目标任务
——中国机械工程学会 2020 年第二次总干事秘书长
会议在天津召开 49

浅说数字孪生



华中科技大学 李培根

一、“现象级”技术？

数字孪生的概念出现是最近10多年的事，但近3年来关于数字孪生的论文数量井喷式增长^[1]。

各行各业都在谈论数字孪生，制造业自不待言，建筑、建造、智慧城市、物流……

近期国内多有关于数字孪生的文章问世，如黄培^[2]、赵敏和宁振波^[3]等，不乏真知灼见。

尤其是有些软件公司、工业互联网公司极力渲染其数字孪生应用（不排除有推销自己的因素），使数字孪生成为当今智能制造或企业数字化/智能化的特别“现象”。炙手可热的数字孪生俨然已成为智能制造以及其它相关领域的“现象级”技术！

二、谁用？干什么？

1. 设计开发者

在产品的设计开发阶段所形成

的数字模型，就是产品最初的数字孪生模型。数字孪生技术逐渐成为优化整个制造价值链和创新产品的重要工具。数字孪生功能最初是设计工程师工具箱里的一种选择工具，它可以简化设计流程，削除原型测试中的许多方面。通过使用3D仿真和人机界面，如增强现实和虚拟现实，工程师可以确定产品的规格、制造方式和使用材料，以及如何根据相关政策、标准和法规进行设计评估。数字孪生可以帮助工程师在确定设计终稿之前，识别潜在的可制造性、质量和耐用性等问题。因此，通过数字孪生模型的应用，传统的原型设计速度得以提升，产品以更低成本，更有效地投入生产^[4]。可以认为：设计阶段的数字孪生是产品（物理实体）“孕育”阶段的数字模型。

（1）产品形态展示。

设计者想象的产品形态特别适宜于在虚拟空间中展示。如VR家装设计分别帮助家装设计师和

家装公司解决其关心的家装设计作品呈现、客户引流和签单等问题。家装设计师需要让客户认可自己的设计才华；广大家装公司更看重VR+家装软件能否吸引更多业主前来咨询，以有效提升签单率。VR家装设计除了高效便捷展现真实的场景式整体家居效果外，还能对企业用户提供诸如人员管理、供应链管理以及沉浸式效果体验等方面的服务。VR家装设计软件是类似CAD、3DMax的室内设计软件，但不同的是，它不仅能做室内设计效果图，还能实现VR交互，实时渲染，让业主身临其境地体验室内装修的效果，如果不喜欢还可自主定制或一键更换。VR家装设计直接让顾客看到虚拟空间中的场景，同时还可通过录视频、拍照等方式，将体验的“真实”场景带回家中与家人朋友一起参考，实现社会化营销。因此，VR家装设计可大大缩短销售周期，顾客感知装修效果后，可以加快顾客购买决策，

让成交变得更简单。VR+ 家装一方面吸引有家装需求的业主，通过多产品、不同套系、不同主题的一键切换，业主可随时查看到“真实”的装修效果^[5]。至于一些个性化定制产品的设计更需要类似的手段呈现给用户和设计者自身。可以认为，这样的“真实”场景或形态就是潜在的物理实体的数字孪生。

(2) 特别状态模拟。

在产品的设计过程中，自然需要尽可能考虑产品运行中的某些特别状态，如汽车行驶中可能发生的碰撞。良好的设计也应该基于对特别状态有尽可能准确认识的基础之上，为此需要在仿真的虚拟空间中模拟特别状态。在汽车被动安全性研究中，其安全评价的主要目的是确保乘员的生存空间，缓和冲击，防止火灾等。汽车碰撞是瞬态大变形非线性问题，碰撞过程极为复杂。如利用 ANSYS LS-DYNA 程序进行汽车碰撞仿真，具备模拟汽车碰撞时结构破损和乘员安全性分析的全部功能，其内置安全带、传感器等单元，以及气囊和假人模型，可高效仿真汽车在发生碰撞或紧急制动时安全带系统和安全气囊系统对乘员的保护情况，从而优化安全保险装置的设计，提高汽车

的安全性能。^[6]

(3) 协同设计。

在产品或生产单元的设计开发过程中，也需要建立其数字孪生体的虚拟空间，尤其是融合 VR 技术的数字孪生体。在虚拟空间中，设计者更容易获得直观体验，又便于设计者之间的协同交流。此外，还能进行某种仿真验证。^[7]

(4) 虚拟调试验证。

虚拟调试是使用模型驱动的数字孪生体实现整机级集成测试，物理调试前的设备选型和验证。产品开发的早期论证，是数字孪生技术最基本的应用。数字孪生体是一个物理实体（也可能是想象中、设计中的实体）的数字表达，除最基本的三维结构外，还应该能够对产品的性能和物理过程进行表达。绝大多数产品的过程是多物理过程，因此还需要多领域物理统一建模。只停留在三维表达不是真正意义上的数字孪生体。

借助数字孪生技术大大加快拥有全新产品的工厂设计。应用数字孪生技术对机器和工厂进行仿真能够使全新一代的产品在 12 个月上市，而通常需要 18 ~ 24 个月。^[8]

虚拟调试技术用于生产线、车间 / 工厂的设计特别有效。在

数字化环境中建立生产线的三维布局，包括工业机器人、自动化设备、PLC 和传感器等设备。对于已有的新设备，在现场调试之前，可以直接在虚拟环境下，对生产线的数字孪生模型进行机械运动、工艺仿真和电气调试，让设备在未安装之前已经完成调试。在虚拟调试阶段，将控制设备连接到虚拟站 / 线；完成虚拟调试后，控制设备可以快速切换到实际生产线。对于运行中的生产线，还可随时切换到虚拟环境，分析、修正和验证正在运行的生产线上的问题，避免长时间且昂贵的生产停顿。^[2]Maplesoft 在数字孪生应用于虚拟调试方面颇具特色，他们与一些自动化公司建立了合作伙伴关系，包括 B&R、Rockwell、Beckhoff，以便有更好的工具接口和工作流；另外，三维 CAD 模型文件可直接导入，使用友好——数小时即可获得结果，而不是数周或数月。^[9]

数字孪生支持从创新概念开始到得到真正的产品的过程。从产品设计、工艺设计验证、生产线设计优化，到生产运行、质量检测和产品提交。

(5) 加速试验。

武田制药 (Takeda) 开发了一套指导制造商生产的流程。医

药行业的质量把控和监管十分严格，任何创新都必须在开发实验室进行全面的合规性测试之后才可投入正式生产。一种新药的问世可能需要长达 15 年的时间。因此，他们一直都在寻找能加速试验进程和业务流程的方法。即使在数字时代，医药制造流程仍包含人工操作。例如，生产生物制品、疫苗和其它从活体中提取的医药产品都涉及生化反应，这些反应多变且难以测量，因此实现自动化无疑是一大挑战。迄今为止，还没有实现这些生产步骤的自动化。他们认为，真正的端到端的生产自动化就是这个行业的最高目标，其中数字孪生技术彰显了重要的作用。孪生技术可帮助团队加速试验进程，开发新的生产方法并生成数据以便做出更明智的决策和预判，从而实现复杂化学和生化过程的自动化。制药行业真正的驱动因素是围绕整个流程建立的控制架构，并且其基础是在发展过程中逐渐成熟的复杂的数字孪生体。最终目标是建立一个无需人工干预即可控制并引导自动化流程的数字孪生体。在武田制药的开发实验室里，这种生态系统已经建成并运用于生物制剂上。^[4]

（6）驱动产品创新。

从新产品开发的角度，产品创新一定要收集产品的运行和服务相关的历史数据，在此基础上判断是否需要提升产品的基本功能和服务环境。在系统孪生数据及其仿真的基础上，通过分析可以发现某些需要进一步改进或提升的地方，例如是否需要收集新的数据，是否需要提升云支持环境中的某些软件（包括 App）的功能等。产品创新的关注点不仅在于物理本体，而且也包括基于云的支持环境，所有这些创新内容都需要孪生数据驱动。

2. 用户

（1）数据透明

数据透明不仅提高数字化系统的效率，而且能创造更大价值。Phoenix Contact 是一家德国制造商，专门提供工业自动化解决方案。它在最大程度上实现了数据的互联互通，并提升了数据的透明度。因此，它所创造的价值要远高于价值链上每个步骤创造的价值总和。Phoenix Contact 借助多个 RFID 标签收集信息，同时建立数字孪生模型，确保数据在流程所有阶段都保持透明可见且易于获取。这种互通性确保了生产线的全天候运

转，不仅提升了 40% 的绩效，还将生产时间缩短了 30%。最终，Phoenix Contact 以批量生产的成本实现了定制化产品的生产。该公司有效利用了数字化测试和数据共享。数字孪生包含所有测试参数，所有测试数据也都会被记录下来，供生产团队参考。此外，生产团队也能直接对接客户。他们可以获取客户信息，向客户实时传达订单状态和交付细节。Phoenix Contacts 利用 RFID 信息标签，确保数据在流程所有步骤中透明、可访问。^[10]

（2）运行优化控制。

产品的数字孪生体不是仅仅在设计阶段产生的，对于一个运行中的产品，其数字孪生体的作用恰恰表现在它对运行的指导作用。既如此，产品在运行过程中所收集的各种数据就成为其数字孪生体的一部分。在一个设备的运行过程中，通过对加工状态，如工艺参数、生产环境数据的监控，建立状态改变对于加工质量影响的数学分析模型，通过趋势分析预测加工质量的异常，并能够迅速采取措施，调整设备工艺参数，形成监控—分析—调整—优化的闭环，防止废品、残次品产生。如某酵母企业，对原料发酵过程的温度、湿度、酒精含量、

pH 值等指标进行采集，一个工段上设置 1000 多个数据采集点，每 5ms 采集一次，一个生产批次的发酵周期为 15 小时，数据量多达上亿条，该企业基于海量数据，通过大数据分析确定“黄金批次”的最佳工艺参数，以还原生产的最佳工艺条件，用以控制和优化工艺。^[11] 这些采集的数据及其分析和仿真结果都是形成设备数字孪生模型的基础。

上面的数字孪生模型均是反映实际的物理实体的运行情况。

一个设备之完美的数字孪生体应该能够生成基于实际物理过程数据的虚拟过程，能够展示其性能数据，并且能够向物理系统反馈优化控制的参数。

3. 运行维护者

数字孪生技术可用于运行维护业务。

荷兰皇家壳牌公司 (Royal Dutch Shell) 启动了一项为期两年的数字孪生计划，以帮助石油及天然气运营商更加高效地管理海上资产，加强工人安全保障，及探索可预见的维护时机。数字孪生有助于优化供应链、分销和运营。全球快消产品制造商联合利华 (Unilever) 启动了一个数

字孪生项目，旨在为旗下数十家工厂创建虚拟模型。在这些工厂内，物联网传感器被嵌入到机器内部，向 AI 和机器学习应用程序反馈机器性能数据，并进行分析。分析后的操作信息再输入到数字孪生体中，从而帮助工人预测机器维护的时机、优化产出并提高产品合格率。^[4]

4. 管理人员

数字孪生技术亦可用于管理，下面举两例说明。

(1) 驱动商业模式创新。

普利司通的团队正在开发更复杂的数字孪生，以期最终在整个价值链上提供洞察，其目标是提升利润率、维持竞争优势、减少上市时间，并提供先进的轮胎即服务 (As-a-service) 产品。

欧洲车队正逐渐转向一种按公里数计费 (PPK) 的订购模式，以帮助车队运营商优化现金流，减少整体成本。尽管商业模式很简单，但为每公里设定合适的价格却绝非易事。轮胎的生命周期受各种因素的影响，包括负重、速度、路面情况以及驾驶行为。数字孪生可以通过模拟不同的驾驶条件，洞悉这些相互关联的条件是如何影响轮胎性能的。但是，

如果没有数字孪生体的真实数据输入，想要确定一个令人满意且具有竞争力的 PPK 价格——并且期望这一价格能够持续为企业带来利润——即使有可能性存在，也将十分困难。数字孪生能够让人们从多个维度看到轮胎性能，也可以在尚无可用数据的时候应用于产品的开发。输入的传感数据被增强、净化和处理；而后应用数字仿真和分析获得洞察，从而为维护、更新等其它因素的决策提供依据，这些依据可以为普利司通及其客户带来更多价值。如今，普利司通正使用数字技术为其车队客户带来更多价值。随着时间的推移，企业计划扩大数字孪生技术的使用范围包括从驾驶员、到车队经理、到零售商、分销商、制造商等的整个价值链。企业管理者表示，鉴于未来可能使用无人驾驶汽车，可能还会涉及安全协议。他们确定已经抓住了引领走向未来的驱动因素，这便是数字孪生技术的用武之地。^[4]

(2) 物流管理。

应用数字孪生于供应链系统，就应该使人（供销管理、物流管理人员）或供应链数字系统能够“感知”传统上被人忽略或无法获取的数据，尤其要注意下面几种数据：^[12]

①**实体的观测数据**。如来自资产的传感器、日志或仪表数据，或从其他主要输入计算出的虚拟传感器等数据；从其他来源收到的数据，如卡车上所载货物的信息、设备所有者的姓名、设备序列号和历史维护记录等。

②**衍生数据**。由数字孪生内的逻辑衍生之数据，如有关事物环境（例如环境温度、当地天气条件）或与事物间接相关的对象（例如所有者的姓名和地址以及所有者身份之外的其他细节）的数据。这些数据不属于数字孪生本身，但属于数字孪生中的逻辑，或者使用孪生的应用程序中的逻辑，必要时可能需要访问这些数据。

③**操作数据**。操作数字孪生系统内的输入数据或存储在数字孪生系统外的数据。例如，数字孪生可以通过对卡车观察到的燃油水平、油箱尺寸和平均速度，应用公式来计算并存储卡车耗尽燃油前的剩余时间。此剩余时间是操作后获得的数据。

④**调用外部数据**。基于数字孪生在外部（物理上）实现的逻辑。孪生逻辑可以向外部决策服务调用 API，例如计算卡车预期到达时间的地理空间映射服务。这可以使用卡车当前位置和计划

路线（下一个目的地的标识）上的数字孪生数据，并获取不在孪生中的外部信息（地图和其他系统中保存的实时交通信息）。

从上面的介绍可见，需要把数字孪生技术与实体及其过程充分融合，以达到优化的目的。

三、数字孪生的支撑技术

从前述的例子可以看出，某种意义上数字孪生是一种技术理念，其实现需要多种基础技术，如传感、物联网、大数据、CAD/CAE、仿真、VR/AR/MR/XR（虚拟现实/增强现实/混合现实/泛现实）、AI 等，此处不专门介绍。

促成数字孪生技术应用所需基础要素的部署一直在加速^[4]：

（1）仿真。

构建数字孪生技术所需工具的能力和成熟度都在不断提高。现在，人们可以设计复杂的假设仿真情景，从探测到的真实情况回溯，执行数百万次的仿真流程也不会使系统过载。而且，随着供应商数量的增加，选择范围也在持续扩大。同时，机器学习功能正在增强洞察的深度和使用性。

（2）新的数据源。

实时资产监控技术如激光探测及测距系统（light detection and ranging, LIDAR）与菲利尔（FLIR）前视红外热像仪产生的数据，现在已经可以整合到数字孪生体内。同样地，嵌入机器内部的或部署在整个供应链的物联网传感器，可以将运营数据直接输入到仿真系统中，实现不间断的实时监控。

（3）互操作性。

过去 10 年里，将数字技术与现实世界相结合的能力已经得到显著提高。这一改善主要得益于物联网传感器、操作技术之间工业通讯标准的加强，以及供应商为集成多种平台集成做的努力。

（4）可视化。

创建数字孪生体所需的庞大数据量可能会使分析变得复杂，如何获得有意义的洞察就更具挑战性。先进的数据可视化可以通过实时过滤和提取信息来应对该挑战。最新的数据可视化工具除了拥有基础看板和标准可视化功能之外，还包括交互式 3D、基于 VR 和 AR 的可视化、支持 AI 的可视化以及实时媒体流。

（5）仪器。

无论是嵌入式的还是外置的物联网传感器都变得越来越小，

并且精确度更高、成本更低、性能更强大。随着网络技术和网络安全水平的提高，可以利用传统控制系统获得关于真实世界更细粒度、更及时、更准确的信息，以便与虚拟模型集成。

(6) 平台。

增加功能强大且价格低廉的计算能力、网络和存储的可用性和访问是数字孪生技术的关键促成要素。一些软件公司在基于云平台、物联网和分析技术领域进行了大量投资，紧跟数字孪生潮流。其中部分投资正在用于简化行业特定数字孪生应用的开发工作。

需要注意的是，在不同场景下的数字孪生体所用到的技术是不一样的。

四、似，是，与不是

现实中关于数字孪生尚存在模糊认识。从前述例子中可以悟出数字孪生的“是”与“不是”。

CPS 似乎是一个工作系统，但它只是一个理念。数字孪生似乎是一种技术，其实更大程度上是一种技术理念。工业 4.0 的核心理念乃 CPS (Cyber-Physical Systems, 数字物理系统、赛博物理系统)，强调数字世界与物

理世界的深度融合。制造业中人们普遍关注的智能制造之核心技术理念亦是 CPS。若问最能反映 CPS 理念的核心是什么？笔者认为非数字孪生莫属。实现 CPS 需要诸多数字—智能技术，如智能感知、物联网、大数据、工业互联网、仿真、VR/AR、AI 等，但其中每一项技术都不可能成为反映 CPS 理念的核心技术。而数字孪生乃是集前述支撑技术之大成。因此可以言，数字孪生更大程度上是一种技术理念，与 CPS 之理念高度契合。如果说数字孪生是技术的话，并非一种单一的技术，而是多种技术的集合。数字孪生也是数字世界与物理世界深度融合的具体表现。

不只是几何的，更是物理的。虽然数字孪生体包含对象的几何信息，但真正显示数字孪生意义的是其物理信息，如产品在运行过程中的状态，物理过程的仿真等。

不只是静态的，更是动态的。数字孪生的意义本来就不是基于处理静态问题。产品的运行过程都是动态的，只有在对动态问题更深刻认识并施与相应控制，这才是数字孪生最重要的意义所在。

不只是对象的，更是环境的、

系统的。很多人尚未意识到，数字孪生技术可以仿真人在实际问题中感知不到的某些环境。

例如，特斯拉对每一个售出的车都建立数字孪生体。^[13] 未来，特斯拉和其它汽车公司还会继续发展自动驾驶汽车。不难想象，驾驶条件的数据（白天/黑夜、天气等），道路性质（弯道、上下坡等）和驾驶者行为，以及事故发生情况等数据都将被聚合起来进行分析，从而驱动某一型号汽车性能的提升与改善。来自单个汽车的数据被分析后可用来微调车辆行为。

又如，风电系统的运行优化和风场的维护非常复杂，尤其是建设在海上的风场，维护需要调用船舶、直升机、海洋工程船等特殊设备，成本更加高昂，且维修周期更长。由于风机运行环境较恶劣、风资源的随机性，以及风场多地处偏远地区等客观因素，进行人工的状态监控和维护排程难以实现风能利用的最大效率。风场的运维策略和排程的优化需要综合考虑许多的因素，包括风机的当前健康状态、维护机会窗口、对未来几天内风资源的预测、维护资源的可用性、维护人员的数量和技能、船舶的路径和成本、海上天气状况等多个维

度的因素。^[14]这都是建立其数字孪生体时需要考虑的因素。

不只是针对产品，还有针对使用者的。对于常规的非自动驾驶模式，除了车的数字孪生模型，还需建立驾驶者数字孪生模型，以便在困难情况下基于特定的驾驶者行为反应，能使驾车效果进一步微调。在汽车的新产品开发中，公司可通过其正在运行的具有千千万万里程的汽车数据去模拟汽车性能和驾驶者反应，以评估设计改变的效果。更一般地，收集产品使用数据和用户行为及反应数据可建立仿真模型，辅助设计决策，平衡不同设计方案的优劣，且预测市场接受的程度。总之，通过对各种情况下的车辆数据和驾驶者数据的聚集融合，并进行仿真，能够驱动汽车的新产品开发或创新设计。

孪生数据不只是产生在设计中，且产生在产品全生命周期内。孪生数据不仅产生于产品的设计，而且在产品的制造、运行、维护等全生命周期过程中，都不断地产生孪生数据。有必要进一步深刻理解孪生数据：切勿认为孪生数据只是产品设计中的几何、制造、物理等信息，孪生数据在产品的全生命周期内而不断丰富。

一个物理实体不是仅对应一个数字孪生体，可能需要多个从不同侧面或视角描述的数字孪生体。人们很容易认为一个物理实体对应一个数字孪生体。如果只是几何的，这种说法尚能成立。恰恰因为人们需要认识实体所处的不同阶段、不同环境中的不同物理过程，一个数字孪生体显然难以描述之。如一台机床在加工时的振动变形情况、热变形情况、刀具与工件相互作用的情况……这些情况自然需要不同的数字孪生体进行描述。

不同的建模者从某一个特定视角描述一个物理实体的数字孪生模型似乎应该是一样的，但实际上可能有很大差异。前述一个物理实体可能对应多个数字孪生体，但从某个特定视角的数字孪生体似乎应该是唯一的，实则不然。差异不仅是模型的表达形式，更重要的是孪生数据的粒度。

如在所谓的智能机床中，通常人们通过传感器实时获得加工尺寸、切削力、振动、关键部位的温度等方面的数据，以此反映加工质量和机床运行状态。华中数控的做法显然更进一步，他们获取的数据有：^[15]

运动轴状态：电流、位置、速度等；

主轴状态：功率、扭矩、速度等；

机床运行状态数据：PLC、I/O、报警和故障信息等；

机床操作状态数据：开机、关机、断电、急停等；

程序数据：程序名称、工件名称、刀具、加工时间、程序执行时间、程序行号等。

显然，这里收集的数据细目多，粒度细。不同的建模者对数据的取舍肯定不一样。一般而言，细粒度数据有利于人们更深刻地认识物理实体及其运行过程。

数字孪生的关键不仅在于孪生数据的粒度，更在于孪生数据的特别关联。如华中数控认识到，数控机床工作状态大数据与加工G代码指令密切相关，与零件加工质量、精度和加工效率之间也存在关联关系。基于大数据分析和深度学习技术，将从G代码中提取的切削参数、刀具信息和对应的车床加工过程指令域功率数据作为神经网络的输入和输出，建立数控车床工艺系统的神经网络模型。请注意，这里不只是满足于收集的数据更多更细，而且要把这些数据融合起来解决问题。这里融合是关键，意指数据的关联。数据之间缺乏关联，再多再细亦枉然。

其实，数字孪生应用的程度体现企业数字化的深度。企业数字化的深度主要体现在数字孪生技术对企业活动刻画的程度，也就是孪生数据的粒度及其关联程度。

数字孪生尚无固定的技术体系、模式和方法。到目前为止，数字孪生体的构造方式五花八门。反映物理实体的各种数字模型似乎均可视为数字孪生模型。尽管如此，未来关于数字孪生建模的规律与方法还需众多的实践者去完善和丰富。

数字孪生体不能只是物理实体的镜像，而是与物理实体共生。有一些学者或专家或许认为数字孪生只是物理实体在数字空间的镜像。此说只能算部分正确。在产品的设计开发阶段，设计者在数字空间中进行设计时，还没有对应的物理实体，但此时的数字模型依然可视为一种数字孪生模型。最终确认的数字模型可“生”出物理实体。可以认为，这时的数字孪生体是物理实体在“孕育”阶段的“胚胎”。在物理实体（产品）系统（包括特定的环境）的运行过程中，各种过程数据又不断地丰富数字孪生模型。在产品运行过程中，孪生模型对获得的数据进行分析或仿真而获得的衍生数据反过来又能够优化控制产

品的运行。所以“共生”发生在产品的全生命周期。此外，“镜像”说容易使人误解成数字孪生体只是物理实体外观或几何在数字空间中的映射。

数字孪生不能只是物理实体的数字表达，它应该是“物理生命体”的数字化描述。大多数关于数字孪生的定义都指向物理实体的数字化表达，如GE Digital认为数字孪生是资产和流程的软件表示，SAP认为数字孪生是物理对象或系统的虚拟表示，Gartner在十大新兴技术专题中对数字孪生的解释是：数字孪生是现实世界实物或系统的数字化表达。^[2] 本文试图给出数字孪生体的极简定义。

定义1：“物理生命体”是指“孕育”过程（即实体的设计开发过程）和服役过程（运行、使用）中的物理实体（如产品或装备）。

“生命体”的含义不仅包括物理实体（如产品或装备）在服役过程中的运行活动，也包括实体的“孕育”过程，即产品的设计开发过程。如果一个物理实体不具备“使用”意义，则不具备“生命”意义，自然也不是工业过程中被关注的“物理生命体”。如，没人使用的房子就不是“物理生

命体”。生命体的模型包括几何、物理、环境、过程……

定义2：数字孪生体是“物理生命体”在其服役和孕育过程中的数字化模型。

此定义中隐含了前述关于数字孪生的“是”与“不是”。

五、一根主线

讲数字孪生不能不提数字主线（digital thread）。美国军方早期对数字主线有一个通俗的解释，其目标是在系统全生命期内实现在正确的时间、正确的地点、把正确的信息传递给正确的人。数字主线是与某个或某类物理实体对应的若干数字孪生体之间的沟通桥梁，这些数字孪生体反映了该物理实体不同侧面的模型视图。达索3D EXPERIENCE平台之上创建数字孪生体，强调数据不受不同软件的束缚，不受流程的影响，可跨越不同工具、不同用户、不同系统，这就需要数字主线的作用。埃森哲认为，数字主线可端到端地在流程与系统间穿针引线，助力在企业及其生态系统中构建一个互联的产品信息网络，打破企业内部藩篱，加强与外部供应商的协作。它能整合产品全生命周期数据资源，为

数字孪生应用创造条件。数字孪生也必须要有数字主线向其输送数据“血液”。如某企业设计某手机产品时创建了其数字孪生，却在后续的生产物流、销售、维保等环节未能及时反哺数据，则这个数字孪生是死的，与传统的CAD与仿真没有实质区别。^[16]

不妨在综合各家之言的基础上梳理一下数字主线的脉络。看不见的数字主线之主要目的是保证数据的流通、集成、融合，主

要表现在下面几个方面：

(1) 一个物理实体之不同的数字孪生体（反映同一物理实体之不同状态、不同性能特征等）之间的数据流通和融合；

(2) 一个物理实体在其生命周期的不同阶段，其孪生数据的流通、融合；

(3) 不同物理实体之间，其孪生数据的流通、融合；

(4) 产品生命周期的不同环节、企业不同部门乃至伙伴的

相应部门之间，所需孪生数据的流通和融合。

造物主创造的宇宙中，在我们所感知的空间之外或许还存在一个平行的空间；人类创造的工业世界中，除了我们看得见和感知的物理空间，一定还要有一个平行空间——数字孪生空间。

让我们不仅从数字孪生的“是”中去认识那个虚拟空间，还需要从那些似是而非中去体验那个平行空间！

参考文献：

- [1] 陶飞, 等. 数字孪生十问: 分析与思考. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 1-17.
- [2] 黄培. 详解数字孪生应用的十大关键问题. 微信公众号: e-works, 2020-05-07.
- [3] 赵敏, 宁振波. 铸魂: 软件定义制造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [4] MUSSOMELI A, 等. 数字孪生连结现实与数字世界. 德勤 2020 技术趋势报告, 2020: 59.
- [5] 吕云, 王海泉, 孙伟. 虚拟现实: 理论、技术、开发与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2019: 164-197.
- [6] Ansys. AUTO Applications. ANSYS 报告, 2016.
- [7] ROSSMANN J. Digital twins and virtual testbeds: paving the way to advanced industry 4.0 applications. Presentation, RWTH Aachen University.
- [8] FRANCOIS-SAINT-CYR A, KURELICH D. Where Smart Engineering Meets Tomorrow. Siemens presentation, 2019.
- [9] Maplesoft China. MAPLESIM 基于模型的数字孪生实现低风险虚拟调试, 2020.
- [10] BETTI F, de BOER E. 全球“灯塔工厂”网络: 来自第四次工业革命前沿的最新洞见. 世界经济论坛 白皮书, 2019.
- [11] 张荷芳. “5G+云”在智能制造的应用场景深度洞察报告. 德勤报告.
- [12] 唐隆基. 数字化供应链的进展和未来趋势. 罗戈研究, 2019-03-05.
- [13] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering. CIRP Ann Manuf Technol, 2017;66(1):141-144.
- [14] 李杰, 等. 新一代工业智能 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.
- [15] 陈吉红. 智能数控机床 (iNC-MT) 和智能数控系统 (iNC) 的思考与探索. 华中数控报告, 2018.
- [16] 埃森哲. 数字孪生——打造生力产品, 重塑客户体验 白皮书, 2019.

数字孪生：第四象限的崛起



北京联讯动力咨询有限公司 中国科协智能制造学会联合体 林雪萍

一、解释物理实体的背面

信息、模型、软件，一直都在试图解释物理实体的背面。

世界是三元的，由物质、信息和能量组成。信息往往是物理资源的增值部分，它对外释放可以解读的含义。一个不携带任何信息的物理实体，是不可想象的。平时人们一般会更在意物理实体的价值，而信息则往往被忽略。但在关键设备的制造上，信息的掌握远胜于物理产品的拥有。

1980年中国最早引入30万千瓦、60万千瓦的电厂设备，历经三年的谈判才从五家中选择了两家。谈判最艰难的，首先是价钱。例如，普遍被看好的美国GE，报价比西屋公司要高一倍，只能放弃。第二个难点就是技术图纸的转让。当时瑞士BBC（后

来合并成ABB公司）为此离开了谈判桌。而最后入选的西屋和另外一家公司，则做出了巨大的让步。他们最后提供的发电机组信息资料，高达35吨（相比一台重量高达1.5万吨的60万千瓦电站锅炉，这个数字也真是惊人，当然这个单位本身也是一个讽刺。在进入数字化时代之前，一台设备的信息也只能向物理产品借用量度单位）。在这些资料之中，光图纸加起来就近十万张。这就是谈判的价值，技术的引进，最重要的是将信息做了一次巨大的空间交换。如果没有清晰的信息，各种制造活动和产品，都是令人费解的存在，而且运行效率也是极其低效。而在当下，信息的储存方式已经大不相同了，论吨重的样本和技术资料已经消灭了物理载体，这也使得物理实体的增值信息更加难以获取。博世

力士乐的电子液压泵阀产品、卡特彼勒的工程机械，新产品的技术资料已经全部采用电子图纸。以前四处可见的非授权维修厂，凭借一张图纸就可以进行维修的时代，行将结束。信息再次隐身，仅仅靠着物理形态的辨认，追赶者想获取和识别先行者的意图，将变得越来越困难。

信息一直以各种方式替物理实体做解释，模型就是一种常见的例子。模型是信息的一种高级表达，它呈现高度组织化的特点，而且一般具有模块性，可以方便地重复使用。重用性是模型的最大美德，这太符合了人类分类记忆的需要。设计研发工程师借助于这些模型，脑海里的各种创意，被快速组合，形成可制造的产品。

除了模型之外，软件也是信息的一种高级组织形式。它萃取了信息中的知识，成为可执行的

信息组合包。相对于松散的信息而言，它的战斗力优势就像是一个全副武装的士兵之于一个赤手空拳的平民。可惜，这个比喻在中国是经不起推敲的。因为一台设备的估价，和一套软件的估价，几乎是天壤之别。如果没有设备撑腰，软件由于无形而经常被看做是无价。它经常被捆绑在机器中一并销售，看上去像是“免费赠送”的。软件巨大的价值，却只能以设备的溢价来表达。这是一种选择性认知，体现了人们对信息价值依然充满了许多无知。

二、第一和第二象限的穿梭

一个产品在数字化设计的过程中，可以分解成各种颗粒度的数字模型。这些模型存在于一个世界，而物理产品和制造过程则存

在于另外一个世界。这就是数字空间和物理空间的区别，二者可以看成是数学坐标轴上第一象限和第二象限的区别。中间存在着一条虚实分界线。

设计完成之后，最终会有一个确定的数字模型包（比如EBOM），跨越这条隐线，进入制造环节。但实际上，当设计师的细节设计冻结之后，并不会立刻在车间启动机器进行规模性生产，这中间还有一个环节就是物理样机。它会被制作出来，用来检查和验证数字空间的模型，是否准确匹配，包括人机工程、动力特性等。这是作为模型走向产品的最后一道防线，物理样机必须能够证明自身携带了正确的信息。显然，物理样机将生产的预见性，往前推移了一步，尽管两者都在同一个物理空间，都在第二象限。

很显然，没有物理样机的模型，直接进行生产将是冲动而危险的做法。而在实践中，物理样机依然也是昂贵的，尤其是当它无法证明一台样机的信息恰如其分地表达了模型的诉求，那么，返工自然是难免的。工期、成本都会急剧上升，这是很多产品开发失败或者延期的原因。经常有人会说，设计决定了70%的成本，那是因为设计不仅仅需要完成物理产品的功能表达，而且在一开始就要设计出好的逻辑，让信息在整个流程中前后保持一致，贯穿产品生命周期之中。而大量失败的物理样机，则证明了信息的一贯性并不容易保持。产品不得不重回原点，而大量的资源早已经被消耗，一个工厂就会表现出缺乏竞争力的态势。

为了避免物理样机做无谓的冒险，生产的预见性，再一次被前移。它重新回到数字空间，数字样机在第一象限出现了，它对于一个模型的性能、可制造性等，给与了更多的仿真与模拟。1989年，当时的仿真公司 Mechanical Dynamics Inc. (MDI, 后来被 MSC Software 收购) 最早提出了“虚拟原型”的概念，而其他计算机辅助设计 CAD 厂家如欧特克、UG、达索系统等，都从各自角度提出了数字原型、主动样机、数字样机等概念，其中数字样机 DMU (Digital Mock-Up) 的说法被广泛使用。它将三维模型之间

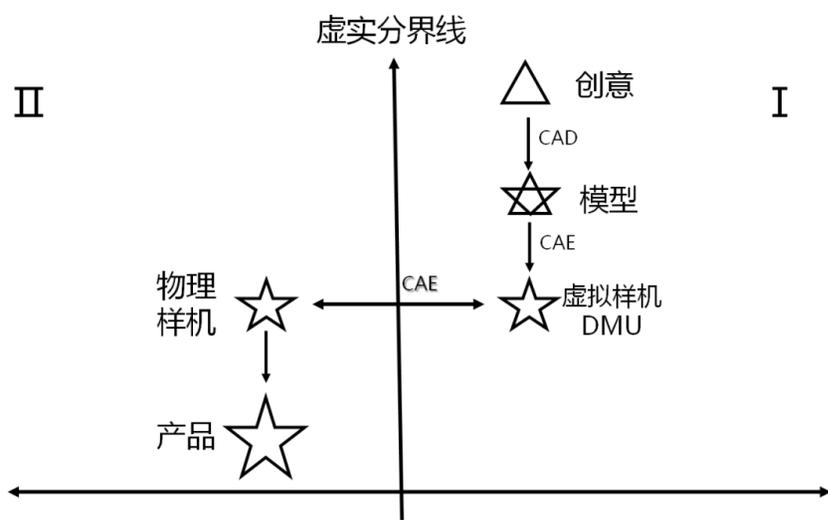


图1 从数字空间到物理空间

的更多关系和上下文含义都倾注之中，并且进行了复杂的模拟。数字样机的存在，大大减少了物理样机的失败性（有些时候干脆直接替代真实的样机）。由于信息传递的一致性，制造的难度被大幅度降低。数字样机是一种信息代替物理的彩排，也是工业软件的一次大胜，它大大推动了用户端的普及。从这个角度讲，物理样机是一种信息资源阻塞而形成的昂贵过渡品。一辆汽车在真正走向规模制造前，需要花费巨大的成本去做风洞实验。汽车会被安置在一个巨大的风洞，通过强大的气流来模拟挡风玻璃、车体造型等阻力分布情况。而飞机、航天器的风洞实验则更为昂贵。造价巨大的风洞，可以说是为物理实体准备的纯金试验台。风洞一响，黄金万两。这都是信息堵塞而形成的昂贵代价。而后来，人们开始采用数字样机进行风洞实验时，成本开始大幅度降低。美国最著名的风洞实验室——兰利实验室的风洞，开机次数现在是越来越少。

从这个角度而言，设计是最昂贵的制造。可惜这个环节，经常被选择性认知的障眼法给抹掉了。人们只相信在车间里高速旋转的机器，和跑来跑去的AGV小车。只有这些忙碌，才被认为是昂贵的成本因此格外受到重视。而设计，往往沦为制造工艺的从属。信息则更是被甩到一边。

密歇根大学 Mr.Grievess 教授在《虚拟完美模型：驱动创新与精益产品》一书中曾经提到：

“信息是被浪费的物理资源的替代品”。如果我们往前推一步，就会发现，许多工厂里的成本浪费，其实都是从信息被忽视开始的。一台机器开始“生病”的时候，总会出现先兆性的信号。然而这种信号或者过于微弱，或者直接被忽略，最后会造成工厂设备的OEE效率很低。从这个意义而言，如果要真正关注机器效率的提升，关注物料消耗的合理性，那么仅仅采用高档机器或者自动化仓储系统，是远远不够的。这些机器、零部件之间的信息是如何传递和识别，才是提高效率的关键。

当这种信息传递被堵塞之后，物理资源的浪费将不可避免地加速。为什么丰田的精益模式经美国学者整理披露之后，一鸣惊人，成为所有工厂管理者的楷模？那是因为，在几乎所有看上去组织管理良好的工厂里，仍然存在着大量漫不经心的浪费。这些浪费是以机器停歇、重复加工、原料堆压、质量恶化、延迟交货等看得见的形式存在。而丰田的精益模式，则找到了背后那些关键的不可见的信息流。物品不再轻易被移动（如及时生产所倡导的零库存模式，就是为了避免不必要的物体搬动），因为物理移动是有巨大成本代价。而廉价的

信息流则需要先跑动起来。正确的时间、正确的工位，正确物料，都是由于信息流先行一步，才得以实现。

这是工厂一侧繁忙的景象，而工厂的另一边，则是用户的天地。

三、第三象限的产品孤儿

一件产品最终来到用户的手中，之前其实是走过了漫长的路。它最早起源于一个设计人员的神经元冲动，那个冲动就是一个主意。设计师将这个神经元冲动，捕捉后通过设计软件，将其转换成一个有尺寸有约束的模型。这个模型，通过虚拟数字样机DMU和各种模拟仿真以确定未来的性能表现之后，就进入物理样机阶段，并且走向物理产品的制造。这是一个从数字空间，进入物理空间的过程。产品从第一象限的数字空间，进入了第二象限的物理空间。

产品制造完毕之后，就会交付给用户使用。产品离开了第二象限，进入第三象限的用户空间，而这正是一个产品的正常归宿，也是它实现价值的地方。唯有购买使用，一个产品才被确认为一个商品。第三象限最大的价值，就是确立了产品的终极意义。

然而，绝大部分产品，进入第三象限之后，就会和制造厂家

失去联系。这种现象，可以被称之为“产品孤儿”。它在第二象限由制造工厂生产，但它出厂进入第三象限之后，就基本与厂家无关——只有在故障需要质保的时候，二者才重新搭建那未必愉快的连接。产品失联最重要的原因是，产品从设计到制造全过程的信息，基本停止了流动。它或许留在制造商的手里，用户并不知道；或者产品运行的信息，留在用户这一头，粗心的用户未必关注，制造商也无从了解。

产品孤儿，本质上是因为信息流的断裂而形成的。这种断裂，是以用户与制造商之间的若有若无的连接作为分界线。支付完成的一霎那，二者的连接强度立刻急剧下降。考虑到制造商与用户之间，还有众多的分销商、代理商、安装队等，信息被彻底地打碎，七零八落，稀稀疏疏地存放在不同层级的机构之中。

设计、制造和用户，是发生在 I、II、III 三个象限的事情。设计和制造，在用户的另一边；制造和用户所构成的物理世界，在设计模型的另一边。象限之间的穿越，对于信息而言，并不完美，有些有用信息会流失而有些无关信息则会增加。这些都增加了回溯的难度。但重要的是，物理实体的移动是昂贵的，而信息流的移动是极其廉价的而且可以重复使用。因此让信息流替代物理的移动，总归是廉价的方式。

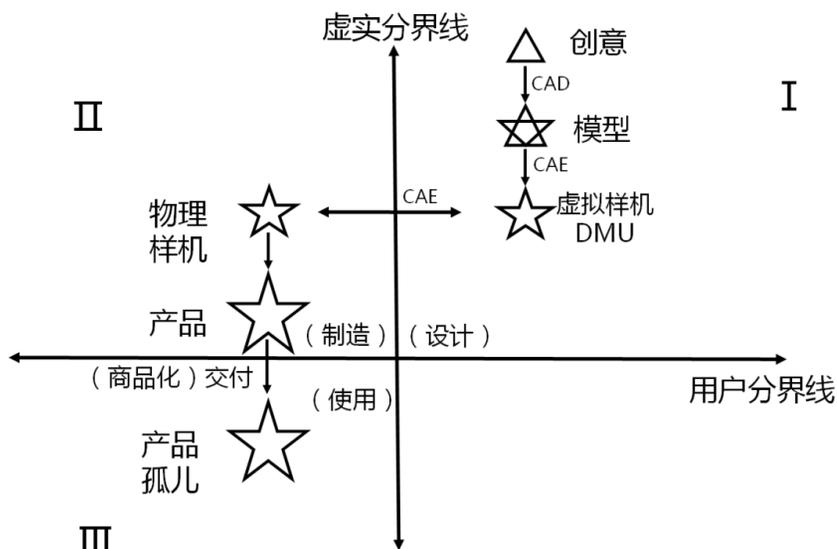


图 2 传统制造的产品三象限

这种最基本的产品流转路径和背后的信息流动，主宰了数千年的商品社会的模式，而半个多世纪以来的设计工具和软件的大量使用，让信息的流动变得越来越透明，信息流动不畅而导致物理资源的浪费也变得令人瞠目结舌，信息的价值也开始备受人关注。

四、数字孪生的崛起

这样的认识，正在缓慢地得到强化。有了信息、模型、软件、数字样机的概念作为铺底，一种更容易理解、更亲民的概念开始登场。

数字孪生的概念，跟前面提到的 Grieves 教授有密切的关系。不出意料的是，这位教授是数字化制造四十多年的参与者，对全生命周期管理（PLM）软件了如

指掌。很显然，这个概念的提出，和产品全生命周期、产品模型、数字化制造等都有着密不可分的联系，数字孪生被看成是“把物理系统的数字化信息，重新构建成一个独立体”。而美国宇航局（NASA）在 2010 年发布的《模拟仿真技术路线图》则应该算是最早在文献中明确提出了数字孪生的概念。

如果认为这是一个明星的动作替身，考虑到这个替身从来就是一个不曾公开的存在，物理存在几乎零，那么这种理解也是未尝不可。相比而言，Gartner 将其定义为“真实世界实体或系统的数字表示”，这就要宽泛和笼统的多。它甚至提出的数字孪生组织 DTO，未免让人更加难以摸得着头脑。

美国 NASA 在火箭台上则展开了非凡的实践。一台火箭和它

对应的数字孪生，给予了人们直观地想象，并且真正形成了工程价值。然而，彼时的数字孪生，仍然是一个昂贵的奢侈品，或者说是一个高高在上的模型。它只能在非常有限的场合下工作。再到后来，GE 航空的发动机，将数字孪生进一步请下神殿，形成商业化应用。在 GE90 的发动机引擎中，物理传感器只有 14 个，但它构建了数字孪生的模型。通过大量虚拟传感器和各种时序数据，形成了庞大的数据流并进行针对性的分析。发动机的远程维护，变得更加可控，这是一个巨大而成功的商业模式。顺势而为，再到后来，GE 的工业互联网概念名声大噪，也就顺理成章。

那为什么到了今天，这个概念才开始变得炙手可热。这背后最大的推手，无疑要属于物联网。万物互联，这种野心也包括万物的影子。而廉价传感器的普及、数字化技术的深度覆盖，让连接几乎无处不在。这也使得数字孪生，彻底摆脱了一个学术概念，成为舞台中心的关键角色。

数字孪生的“生命”从什么时候开始激活？这诞生一刻的荣耀，并不属于它的制造商。它并不是从设计软件 CAD 开始，也不是从 PDM 开始，无论设计师、制造商赋予它多少丰厚的“嫁妆”（模型、数据库、算法等），它的生命都是从交付给用户的那一霎那开始。这是一个模型，打开

窗口走向光明最有意义的时刻。在此之前，所有的动作，都只是调试，都只是一个生命的准备。如果说，跟随新产品相伴而生的孪生，可以称之为原装数字孪生，那么围绕着已经运转的既有设备，也可以直接构建出“流通数字孪生”，它将指向更加明确的目标。

数字孪生就像是一张维基百科的网页，从一开始的空白，到第一篇文章，到更多的文章，这些网页会越来越厚，相互之间的连接也会越来越复杂。它们记载着数字孪生的成长，而这背后就是一种尝试，试图记录物理产品随时随刻的真实状态。再想一个简单的场景，如果翻阅微信支付上的一笔笔流水，这些数字所形成的轨迹，其实是以一种数字孪生的形态，记录了你的信用表现。

从这里我们会发现，数字孪生跟传统的模型、软件，最大的不同在于，它是自生长的动态模型。如果能够快速浏览一个数字孪生的全部寿命（这可能是几分钟，也可能是几十年），或许可以看到它进化的痕迹。就像一闪而过的人类进化史：一只猿猴站起来，手里有了火种，学会驯服小麦和绵羊，成为食物链顶端的万物之王，从田边进入城市。同样，数字孪生，由于具备积累记录、仿真优化的能量，开始学会不断增长。《人类简史》的作者赫拉利提到：认知革命（智人最

早的起源阶段）让历史从生物学中脱离而独立的推动力，在此之前，所有人类的行为其实都是生物学的范畴。数字孪生当然不具备生物体的特征，但如果以这种比喻的方式来看，可记录能仿真，也使得数字孪生从模型范畴中进一步分离，二者有交叉，但也有更大的作用。

五、第四象限的新主人

产品的全生命周期（包括交付后的使用、运维直至报废），一直是产品制造商非常感兴趣的地方。但是这样的代价和成本往往都很高，只有少数高价值的产品才具有如此开发的必要性。对于美国 NASA 这样的机构，每一个发射的航空器都是昂贵无比，全生命周期追踪更是一个关乎生死的问题。因此这些实践，只能用于大型工程背景，并无法使得数字孪生在商业上广泛使用。

然而物联网的普及，改变了这一布局。一个产品交付用户之后，由于网络的无处不在，数据传输的便利性，追踪一个实体以及根据它的模型进行仿真，都变得触手可得。在用户侧出现了数字空间的全新疆土。原本空荡的第四象限，有了新主人。数字孪生，它既呼应了物理产品的存在，同时也和用户的使用息息相关。安静的第四象限，由于数字孪生

的出现而变得热闹起来。

在没有数字孪生之前，三个象限有两个信息流通道，设计与制造之间是双向通道，这是信息空间和物理空间的交互。它可能在一个机构之内，也可能不属于一个机构。而制造与用户之间，一般而言是单通道，产品制造的信息传递给用户之后，就关闭了通道。产品处于“孤儿”无联系的状态。当然也会有例外，例如远程维护，就是一个制造与用户的双向信息交流。即使没有数字孪生的概念，1998年的时候罗罗公司已经成功地将它远在天边飞翔的发动机监管起来，并且成功地将其锁定为一种商业模式。这一奇袭，曾经导致GE发动机，丢失了全日航空公司这样的忠实客户。而后来，这种商业模式，已经成为航空发动机行业的标配，并且成为工业互联网领域最经典的奠基性案例。

由于数字孪生在第四象限站稳脚跟，它增加了三条数据通道。一条是数字孪生与物理产品之间的交互：这是数字孪生的支点性定义。如果没有这一点，数字孪生与它的前身——各种模型，就毫无差别。数字孪生之所以从模型堆里面脱颖而出，就是它具备了与物理实体的交互性、相似性，许多场合还具有实时性。一向沉寂无声的数据仓库中，第一次传出了规律性的心跳声。这是第四象限作为全疆土，对第三象限

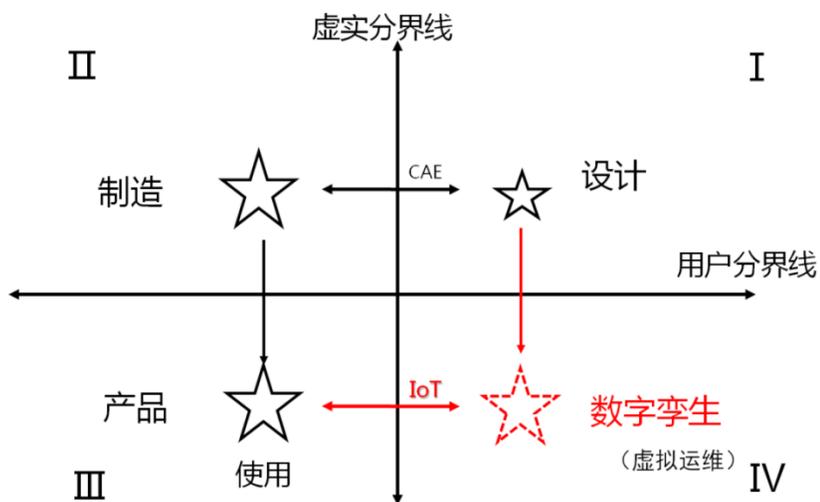


图3 第四象限的新主人

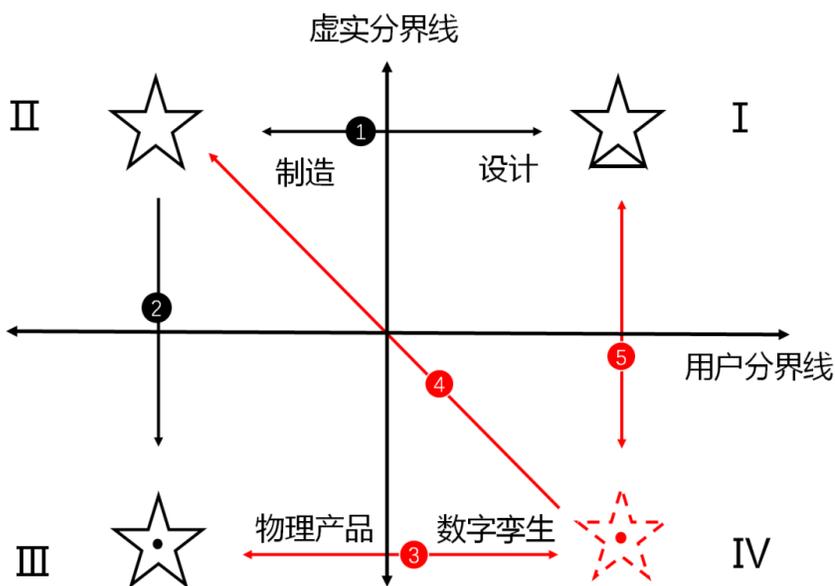


图4 三条信息新通道

宣告了一个兄弟般的存在。

如果说产品孤儿是一个少言寡语的物理实体，那么数字孪生可就是一个热情洋溢的饶舌者。如果不加以限制，无时无刻它都在“说”个没完，海量数据是它最拿手的产出。这些海量数据是对物理世界的描述、诊断、预警

甚至预测。而在特殊的情况下，这些数据也会触发实际的操作，从而控制物理产品。当然，这一点在工业领域，往往会被视为危险的动作。

第二条信息通道，就是它自身的线索，返回到了制造商的手中。这条通道的合法性，还有

很多限制和讨论。但制造商，终于可以拥有足够的信号，倾听产品咚咚的回音。这是一个里程碑性的握手，对于制造商改善产品的性能，意义重大。

中国工业文明有缺陷之痛，其中一点就是制造商与用户之间，无法形成友好而持续的互动。一旦产品交付之后，运行数据就被切断，持续的设计验证之路也成为断头路。而这本来是提升产品反馈信息的最好机会。一个锅炉厂、汽轮机厂，数亿元的设备交付给发电厂之后，基本上就各奔东西了。如果电厂未来有一天回头来找主机厂，那一般不是别的事情，而是“找茬”的，为出现的各种故障而要求修复。

第三条信息通道，是数字孪生指向了设计部门。一般而言，制造环节，会把数字孪生反馈的信息，提供给设计部门。然而更直接的方法就是，设计部门可以直接得到物理产品的动态信息。PTC 曾经展示了一个令人心动的

场景，那就是一辆自行车在穿越街道跨过小溪的时候，给设计部门传递回来的扭矩、胎压等信息。一个设计师，终于可以最直接地看到，自己的想法如何在物理世界进行打拼。那应该是一个无比自豪的时刻。

数字孪生，改变了人们对一个产品工况的期待。一辆汽车、一台机器，无论如何个性化定制，当它离开工厂之后，就会呈现一种平均数的特点。你的机器形状、尺寸，有可能是世界上唯一的一台，但它的平均能耗、常规应用场景都是被锁定在一个区间范围。机器设计参数，都会被提前设定为平均工况。原因很简单，信息流在产品交付的一霎那，就被切断了回路。制造商无法知道机器运行的实时情况。而数字孪生，让个性化定制，进一步走向了应用的定制化。实际上，个性化定制比个性化定制，更能体现用户专有价值的实现。

一家航空公司同时定制的 5

架同一批次同一型号的飞机，其数字孪生是各不相同的。尾号为 N123 的空客 A321，一旦投入运营，就有其独一无二的数字孪生 N123，即使它们出厂交付的时候所携带的信息完全一样。它使得一架飞机的运维，开始走向不同的场景。也就是说，由于有了数字孪生，机器的工况被即时记录，被压缩了的平均工况，开始复原成一种瞬时参数。只有到了这一步，才产生了真正的个性化意义。而这就回归了数字孪生的价值：它本来就是为了实时优化物理产品的性能而诞生的。

而如果能够将全程的数据流打通，那么从第一象限到第四象限，就会形成一个源源不断的数据流。跨越四个象限的数据流动，才是驱动产品设计的澎湃动力。数字孪生在第四象限的崛起，使得整个数据流第一次在全生命周期内形成彻底的闭环。而这种信息交互与通讯的框架，保证信息传递的准确与保真，则显得尤其重要。

五、说到底这只是模型

数字孪生是描述世界的一种模型，或者说是一种高级模型。因为它包含了数据、分析、专业知识和软件能力，有各种接口和应用。但由于它的仿真能力，比模型有更多的针对性和能动性。



图 5 从个性化定制走向个性化定制

在这一点上，它和软件也有类似的地方。

这意味着数字孪生并不是真实世界的全部反映。它永远只是对物理世界的一个局部模仿、一个随动的模型、一个有缺陷的影子。它唯一努力的方向，就是向真实无限靠拢。这意味着，一个数字孪生的高保真度（High Fidelity）是一个关键命题。尽管这个独立体希望尽量接近真身的样子，但这是一个不可完成的任务。琳琅满目的数字孪生，就像苹果园里眼花缭乱的苹果，大大小小的，都经历了丰收的季节。但在摘下之后，大小光泽的不同，要分很多等级。优良的苹果可以卖出好价钱，而没开眼的苹果甚至都无法进入交易市场。数字孪生同样也是可以分好坏等级的。健康的数字孪生，会有更好的保真度；而一个糟糕的数字孪生，会远远地偏离它的物理实体。它完全有可能给人们虚假的信息，这就是危险的数字孪生。可以说，在数字孪生们的世界里，如果一个一个数过去，那一定是到处充满了病怏怏的病夫——它们并不能完成人们对数字孪生所寄予的那些过于热切的期待。

决定数字孪生健康度的要素，就要看数字孪生是以何种方式被构建出来。可惜，数字孪生现在被各个行业使用，全无数字孪生的标准，而每个公司又各有自己的定义。

总而言之，当下过于热闹的描述，未免让人对它充满膜拜、放松警惕而忽略事实的真相：数字孪生并没有全部重构物理产品的全部。恰恰相反，在绝大多数情况下，它是物理实体大量裁剪后的高浓缩简版。一台上千个零部件的机器，会被不同的用户裁剪成不同的颗粒度，也许只有几个零部件，进入数字孪生的世界。数字孪生，天生就是一个不完整的存在。

当然，它还是热烈的来了。

六、上有系统，下有工具

健康的数字孪生，是如何产生的？专业知识当然是关键。而理解它的体系和工具，也是必不可少

的。

尤其是对于复杂产品的数字孪生的构建，需要深刻地理解数字孪生的周边环境。它的出现，代表了一种全新的时空观连接，从过去、现在到未来，从物理空间到数字空间。这背后是一个庞大的关系体系，而破解这种复杂关系的方法，就需要一套系统工程的方法论，需要对系统需求有一套完整的描述方式。

实际上 NASA 在 2010 年提出的数字孪生，有着严肃而宏大的工程背景。首先 NASA 打算把数字孪生完整地用在金星探索（Venus Lander）计划之中，这是 NASA 野心勃勃的太空探索计划中的一部分。更重要的是，数字孪生是出现在一套完整的系统工程的技术架构体系之中，包括计算、建

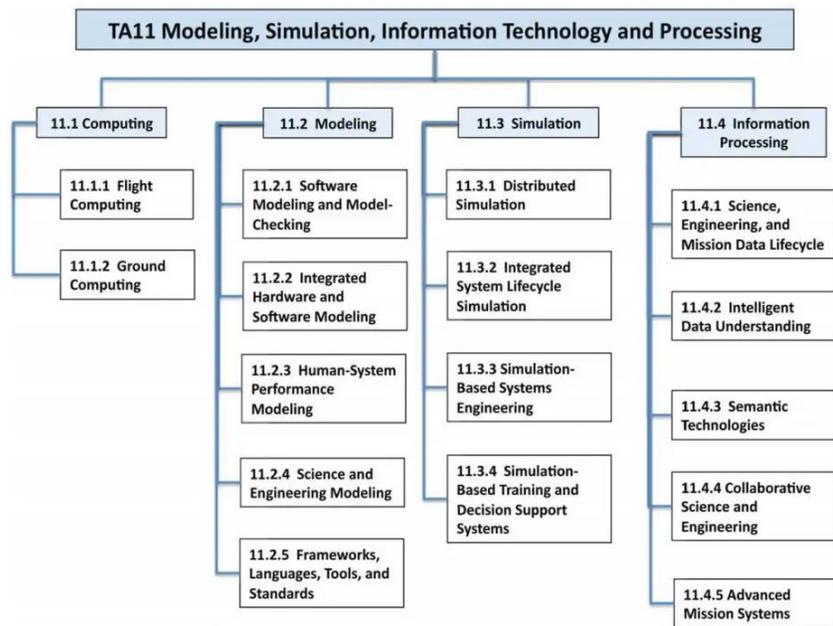


图 6 NASA 的系统分解结构图

模、仿真和信息处理这“四大金刚”。数字孪生是“四大金刚”层层编织之后呈现的数字之心。可以说，数字孪生是推行了多年的基于模型的系统工程（MBSE），与物联网（IoT）时代的一个交集。如果剥离这些前后环绕的条件要素，视 MBSE 如无物，数字孪生难免不被庸俗化，被单独拎出来，变成了一件有趣好玩的界面游戏。单独的数字孪生是乏力的，它只是视觉上肤浅，满足了一种追求华丽表面的心思。只对数字孪生呈现了偏爱而舍弃了它背后的系统工程思维，就和买椟还珠并无两样，这是工业界的一种选择性短见。如果进而将数字孪生放大成一种轰轰烈烈的示范项目，那更是会成为一个悲哀。

要建设数字孪生，底层工具必不可少，工业软件最为明显。如果能够理解数字孪生最早是源自 PLM 的思考和延展，那么就可以理解为什么传统的 PLM 软件厂商（包括 CAD、CAE 软件），对数字孪生会如此热心。原有的武器擦得雪亮，就可以大展身手。有了传统工程师一直在使用的工具，结合当前流行的微服务、容器等技术，数字孪生也可以借助工业互联网平台进行搭建。GE 为它的 GE90 的引擎，建立一个数字孪生，需要 25 周的时间。而借助于工业互联网平台，这个时

间被期待降低到 6 周。构建之后，数字孪生可以以各种功能模块的方式，被嵌入到工业 APP 之中，也可以通过浏览器的方式，看到它所推送的信息和结果。

构建数字孪生就像是构建一座宫殿。屋顶是系统工程的架构，地基是各种软件。建造者将各种行业知识加载其中。当数字孪生备受赞美的时候，更需要深度领会系统工程才是引领结构的根本，而工业软件则是离不开的工具。

小记：小心概念风暴

数字孪生在第四象限所要代表的物理实体，无论是一台海上风机，或是一座宏伟的建筑，还是一个人口繁荣的城市，甚至是一个供应链，情况并没有太大的变化。少数、局部的物理特征，重新构建了一个令人耳目一新的新世界，这个世界可以伸缩、可以回放、可以重构，它更接近于“一切尽在掌握”的雄心。

数字孪生从第四象限的崛起，意味着制造商关注的焦点，从“产品经济”转向了“体验经济”。一个用户的体验，是一个很难量化的事情。然而通过数字孪生，很多抽象的参数，被实实在在的行为，忠实地记录下来。体验经济，不再是心领神会的艺

术，而是可以被捕捉的科学法则。这使得制造商的盈利点，有了新的蓝海航程。数字孪生实现了“个性化定制”，这也使得“个性化定制”的内在属性得以充分的发挥，这是体验经济的终极目标。大规模定制实现千人千面千机变。

可以说，数字孪生成为数据的全新分发中心。这就是第四象限的崛起的真正含义。它让一个三象限世界，终于变成一个完美对称的四象限世界。而产品的全生命周期的数据流，终于可以形成一个有价值的闭环。制造与服务的融合，变得更加顺理成章。

然而数字孪生终究只是一种可以仿真的模型，一种与工业互联网相得益彰的模型。它本身并不自动地释放价值，更不能看成是一种独立的生产力。单独拔高数字孪生的价值，并无太大的意义。它带来的最大启发，就是用更多的信息流动和数据分析构建一套“行为暴露真相”的叙事方式。在美国、在日本、在德国，数字孪生都只是一个普通的学术概念，工程界平静地拿来引用，不沾半点神奇星火。这更多的是一种思维方式的进化。与其迷恋数字孪生的魔力（其实没有），不如借机大力熏陶和推动系统工程思维的落地，否则数字孪生真的变成了一种推销工具软件的最好广告语。MCT

工业应用中的数字孪生

——定义、商业价值、设计、标准及应用案例



美国工业互联网联盟

编者按：本文为美国工业互联网联盟于2020年2月发布的工业互联网联盟白皮书。本刊全文翻译刊登，为国内相关专家学者提供参考。

本白皮书提供了数字孪生的操作指导，对数字孪生的定义、优点、架构，以及构建数字孪生体所必需的模块进行了阐述，通过举例说明了工业物联网（IIoT）系统与其孪生体之间的关系。

本白皮书明确了：

- 数字孪生的本质特征；
- 形成复合系统的各数字孪生体之间的关系；
- 数字孪生体在实体生命周期中的作用，考虑到有无数字孪生体的两种情况及数字孪生体的商业价值；
- 数字孪生体的内部设计；

• 随后，本白皮书对多种设计决策进行了更为详尽的描述；

• 对设计数字孪生体时需纳入考量的数字孪生标准进行了概述；

• 并给出了数字孪生在不同行业中的应用案例。

寻求提高系统效率有效途径的商业领袖，物联网（IoT）系统的系统架构师，以及其他从业者和测试团队，均可使用本白皮书：

- 识别并评估整体解决数字孪生问题的最佳标准、实践和特征，必要时可突出差距；
- 识别部署模型，部署数字孪生体时，多功能交替使用，解

决模式与特征方面的问题。

一、工业互联网联盟（IIC）数字孪生定义

数字孪生是对资产、过程或系统的正式数字表示，能捕获对应实体的属性和行为，并在特定语义中进行通信、存储、解释或处理。

数字孪生信息包括但不限于以下几类信息的组合：

- 物理模型和数据；
- 分析模型和数据；
- 时间序列数据和历史；
- 业务数据；

- 主数据;
- 可视化模型;
- 各种计算。

图 1 中的图标展示了数字孪生体的多个侧面。本白皮书借此对数字孪生体进行阐释。



图 1 数字孪生体图标

二、不同系统中数字孪生体间的关系

数字孪生的抽象程度足以满足设计数字孪生的应用案例的需求。

离散数字孪生体是能够提供价值的单一实体，无需进一步分解。例如，在矿业中，可利用这一级别实体对球磨机的齿轮箱或电机进行监控、报告。将离散数字孪生体组合成复合数字孪生体，图 2 中展示了这一纵向变化，描述了数字孪生体从单个实体到多个实体的增加过程。

复合数字孪生体是离散数字孪生体的组合，代表由多个独立组件、零部件组成的实体。数字孪生体的复杂程度不尽相同。例如，一个生产单元是一个复合实体，它的数字孪生体是由其内多个设备对应的多个数字孪生体组

成的。整个工厂是一个系统，它的数字孪生体则是由多个复合数字孪生体组成的。

如图 3 所示，在同一复合结构中，各数字孪生体之间的关系可分为以下类型：

层次型：与其对应的物理实体一样，一组零部件数字孪生体可以组建成一个设备数字孪生体，一组设备数字孪生体可以组建成一个生产线数字孪生体，一组生产线数字孪生体可以组建成一个工厂数字孪生体，等等。

关联型：与其对应的物理实体一样，不同的数字孪生体相互关联，如天然气管道的数字孪生体与天然气生产使用设备的数字孪生体之间相互关联。

点对点型：若一组设备的类型和功能是相同或相似的，其中便存在着此类对等关系。将多个单一设备的效果简单地组合在一起，即为整体设备可实现的总体效果。如风力发电场中，多个单一风力发电机的数字孪生体组成了风力发电机的复合数字孪生体。

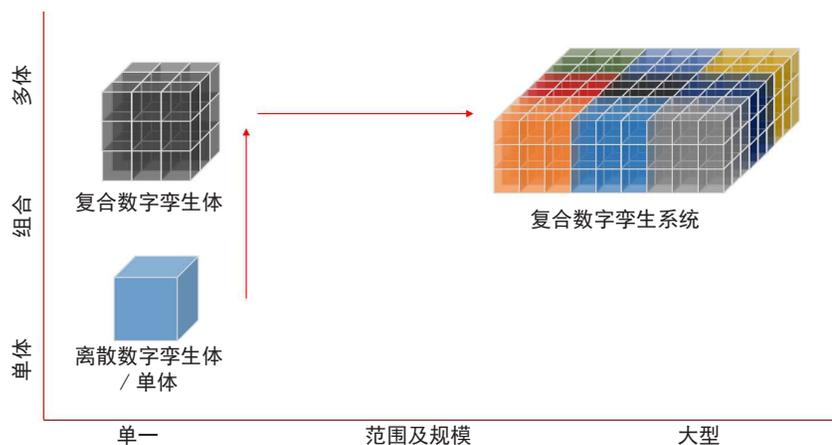


图 2 复合数字孪生体的构建

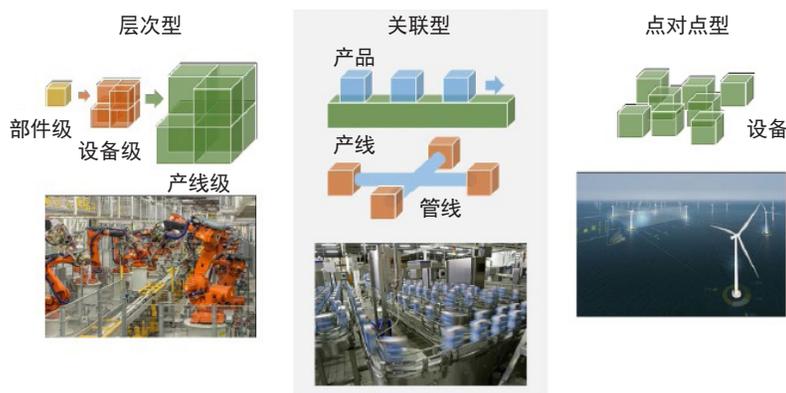


图 3 复合结构中各数字孪生体之间的关系

三、实体生命周期中的数字孪生

如图 4 所示，实体的信息通常分散在由不同组织开发及维护的多个信息源中。这些信息源在

交换信息时可能产生错误，造成实体生命周期中信息流的中断，导致某些信息的重复、不一致或丢失。故而需要大量时间来寻找相关信息，将其转换为正确格式，并弄清其中的语义关系。这些错误还可能导致运行冲突和决策失

误。此外，信息孤岛阻碍了高级分析、人工智能等需访问大量信息的高科技的应用。

图 5 展示了数字孪生体对解决信息孤岛问题的帮助。由数字孪生体充当代理服务器，统一收集各个实体数据，然后通过应用

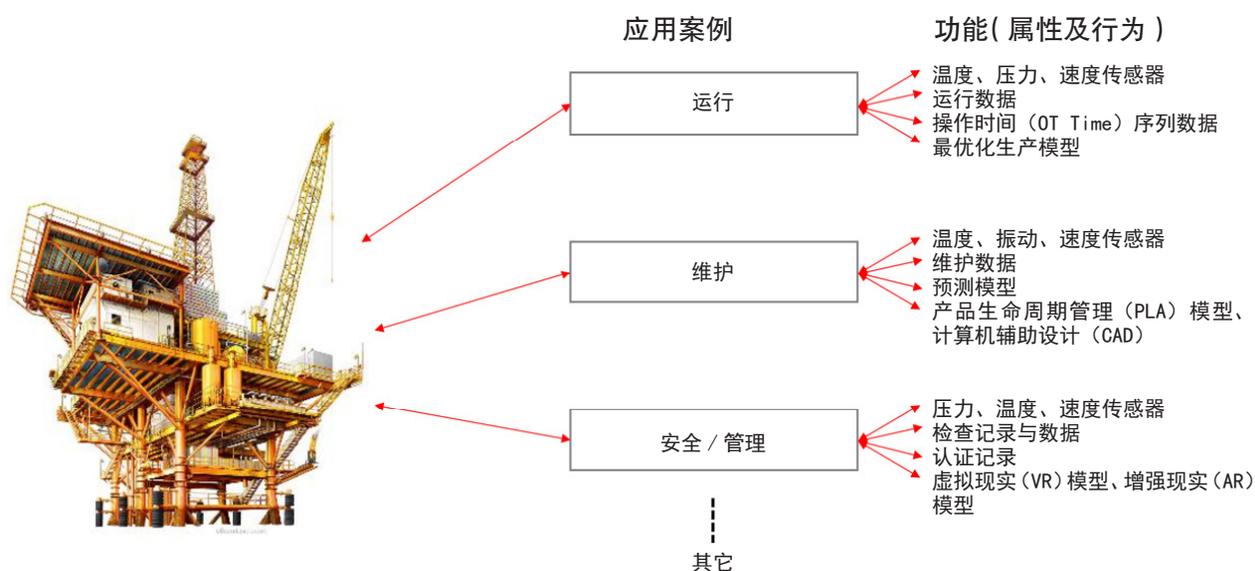


图 4 无数字孪生体时的运行情况

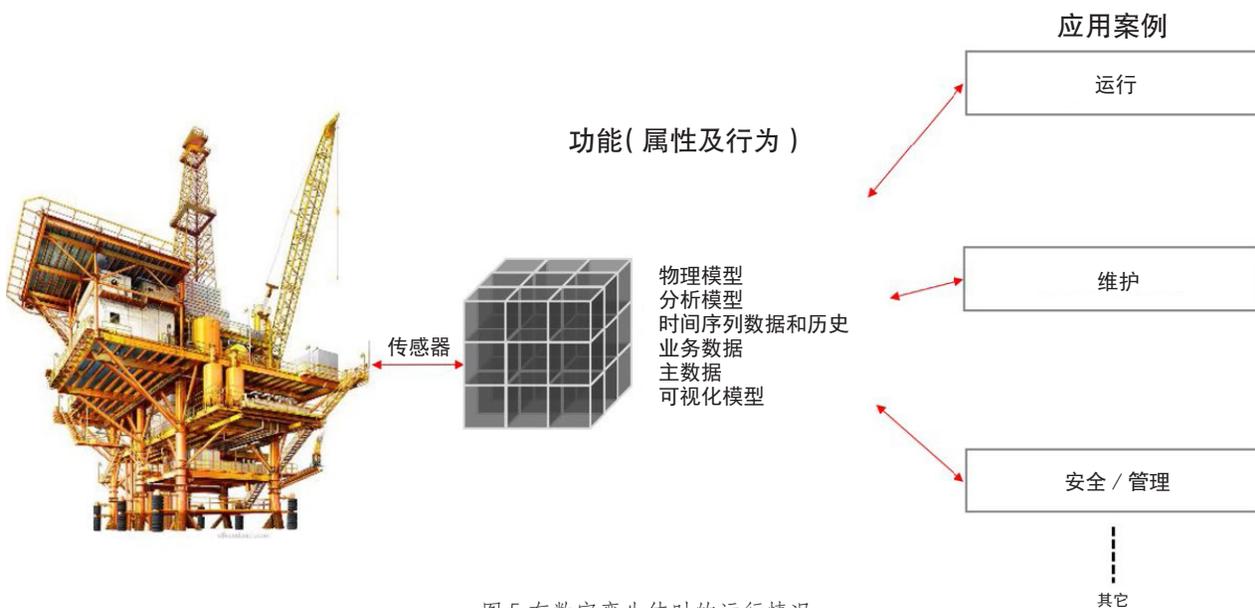


图 5 有数字孪生体时的运行情况

编程接口（API）等集成接口，将数据信息提供给不同业务领域的特定应用程序，供其使用。各方对运行状态的理解是一致的，从而优化决策，并降低工厂在其整个生命周期内的运行和维护成本。

图6展示了数字孪生体在实体生命周期中跨越组织边界发展的一个案例。在制造系统中，制造商可将新产品类型添加至类型目录中。客户根据目录确定要购买的产品类型并提交订单。产品生产好后便会运送给客户。与此同时，客户可利用各种工程工具和虚拟调试工具设计产品，确定产品参数以及该产品与工厂内其他产品的交互方式。客户收到的实物产品是已在工厂内完成安装、调试并投入使用的。产品运行期间，可提供多种维护服务。客户可基于维护信息调整未来的产品选择。制造商可以得知检测

到的产品问题，考虑增大这方面的投入，从而提高产品质量。

上面的简单案例说明了信息在制造商与客户间的流动。如今，这种流动已基本中断。例如，一家公司内，可能存在多种用于选择、工程设计、虚拟调试的工具，这些工具间的联系不够完善，无法彼此交换信息。产品运营信息保存在产品固件中，而维护信息保存在专用数据库中，其与选择阶段是分离开来的。即使合同中规定将部分操作与维护信息发送给制造商，这些信息也分散在产品固件和数据库中，我们无法轻松、经济、准确、及时地将其汇总。

实体的数字孪生体是访问其生命周期信息的手段和单一接口。一个组织的任何相关实体均可构建数字孪生体。在我们的示例中，制造商可囊括所有相关信

息（包含市场分析、计算机辅助设计图纸、设计文档、从客户处收集的性能信息等），来构建产品类型数字孪生体。制造商还可构建产品数字孪生体，将从客户处收集到的生产及维护信息保留在该数字孪生体中。借此，制造商获得了用于访问所有产品和产品类型信息的单一接口，该接口能为多家公司提供价值。由于单一实体的环境和信息使用方式不同，可能需要构建单独的数字孪生体。

同现实世界一样，不同实体的数字孪生体之间也存在着语义关系。若无法建立起这些语义关系，将使各数字孪生体成为信息孤岛。由于信息的来源、时间、格式各不相同，自动建立语义关系就成为了数字孪生设计的一大主要挑战。

通过提供访问实体生命周期

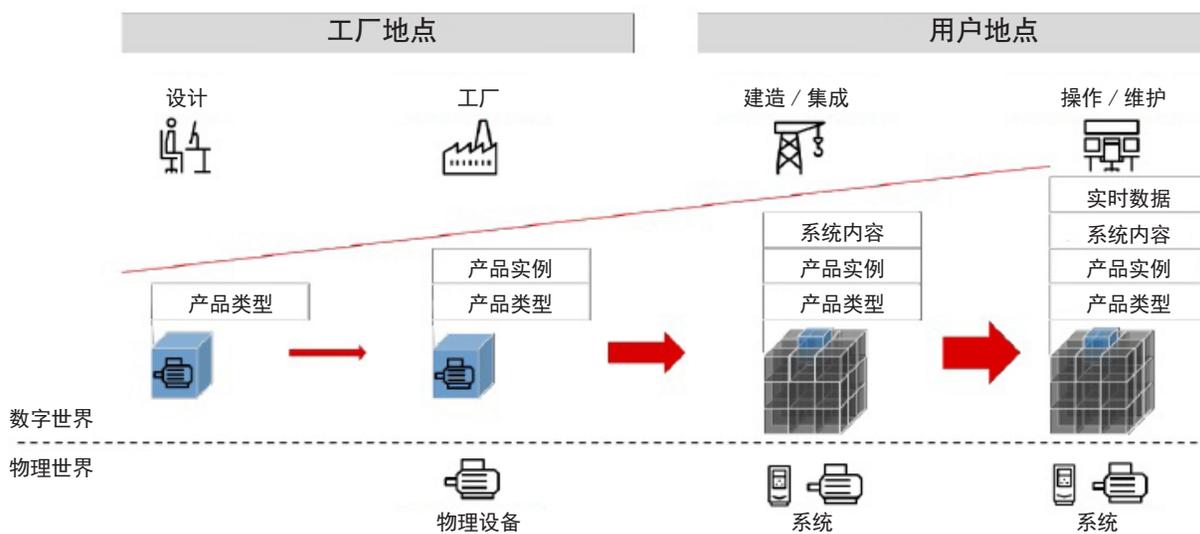


图6 数字孪生缓解信息孤岛现象

信息的单一接口、维护单一数字孪生体和多个数字孪生体之间的信息关系，可以实现多种业务优势。举例如下：

以数字孪生为基础，协助高级分析和人工智能（AI）应用来使用、丰富数字孪生内容。也可将高级分析和 AI 应用纳入到数字孪生体之中，将该数字孪生体构建为智能、独立的实体。

有时，我们无法测量到所有需要的关键物理量。可以借助数字孪生，通过纳入数字孪生体中基于物理原理的模型，研发高精度的软传感器或虚拟传感器，作为物理测量的工具。可能有必要使用数字孪生体对潜在过程进行高级分析和模拟，来预测未来行为。

由于报告运行参数的传感器可能发生失灵、漂移等事故，其得出的产品测量结果的准确度无法得到保证。若由于传感器故障，而非物理产品内部操作故障，导致出现异常，则没有必要发出警报，并避免不必要的停机。我们可以利用基于物理原理的模型，以及该产品的数字孪生体来协调数据，提高感知质量、确保测量结果真实性。例如，一间发电厂的数字孪生体中，电路中简单的质量热平衡系统即可帮助协调数据，检测可能出现的传感器故障。

数字孪生简化了所有生命周期阶段的协作工程，从而减少了生命周期任务所需工具的信息查询、导出、导入时间。

数字孪生可以解决运维问题，降低宕机时间经济成本。

数字孪生使用实时更新，提质增效，避免因过时信息、错误信息而出现生产问题。

数字孪生可不受时间、地点、人员限制地共享世界各地的专业知识，24 小时快速准确响应，并最大化利用专家知识。如需现场操作，可在远程专家的支持下，动员当地工程师完成操作。

因此，数字孪生提供了系统的方法、技术和工具，以代表复杂的物理与逻辑环境，能够有效监控、诊断、预测和规定物理实体和逻辑实体的行动。

四、数字孪生的设计

为动态地表示出物理实体，数字孪生体应当与对应的物理实体相关联（有时需为实时关联），以便收集并组织物理实体的数据。数字孪生应助力计算模型、分析模型来分析这些数据，从而描述、诊断、预测、模拟物理实体和系统的状态和行为。将分析结果与业务逻辑和目标相结合，规定措施，以优化生产过程。为此，数字孪生设计必须配有 AI 应用访问数据与分析结果的服务接口。如图 7 所示，一个数字孪生体由数据、计算模型（以下简称“模型”）和服务接口组成，同面向对象编程语言一样具备成员数据、方法与接口。

数据：数字孪生应包含建模所需的对应物理实体信息数据，用于描述、理解对应物理实体的运行状态和行为。在许多情况下，这些数据由物理实体完整生命周期中的信息组成。若该物理实体为某一设备、数据则包括产品设计数据（规格参数、设计模型、生产过程、工程数据）、生产数据（生产工人、生产设备、材料及零部件、生产方式以及质量保证等数据）、运行数据（安装及配置数据、实时及历史状态与情况、维修记录）、使用周期结束时的程序数据以及包含业务交易数据。

模型：数字孪生应包含用于描述、理解、预测孪生体的运行状态和行为的计算分析模型，以及基于业务逻辑用于指导相对应的物理实体运行的模型。这些模型可能包括基于物理或化学原理的模型、工程或仿真模型以及基于统计、机器学习和 AI 的数据模型。也可能包括 3D 模型和增强现实模型，以帮助人类理解物理实体的运行状态或行为。

服务（接口）：数字孪生应该包含一组服务接口，用于工业应用，以及方便其它数字孪生体进行数据访问和功能调用。

尽管物理实体的形式和内容各不相同，但是在每个对应数字孪生体中都应具备一些公共数据属性和模型的通用结构，以便采用通用方法进行访问和调用。

如图 8 所示，我们可以根据

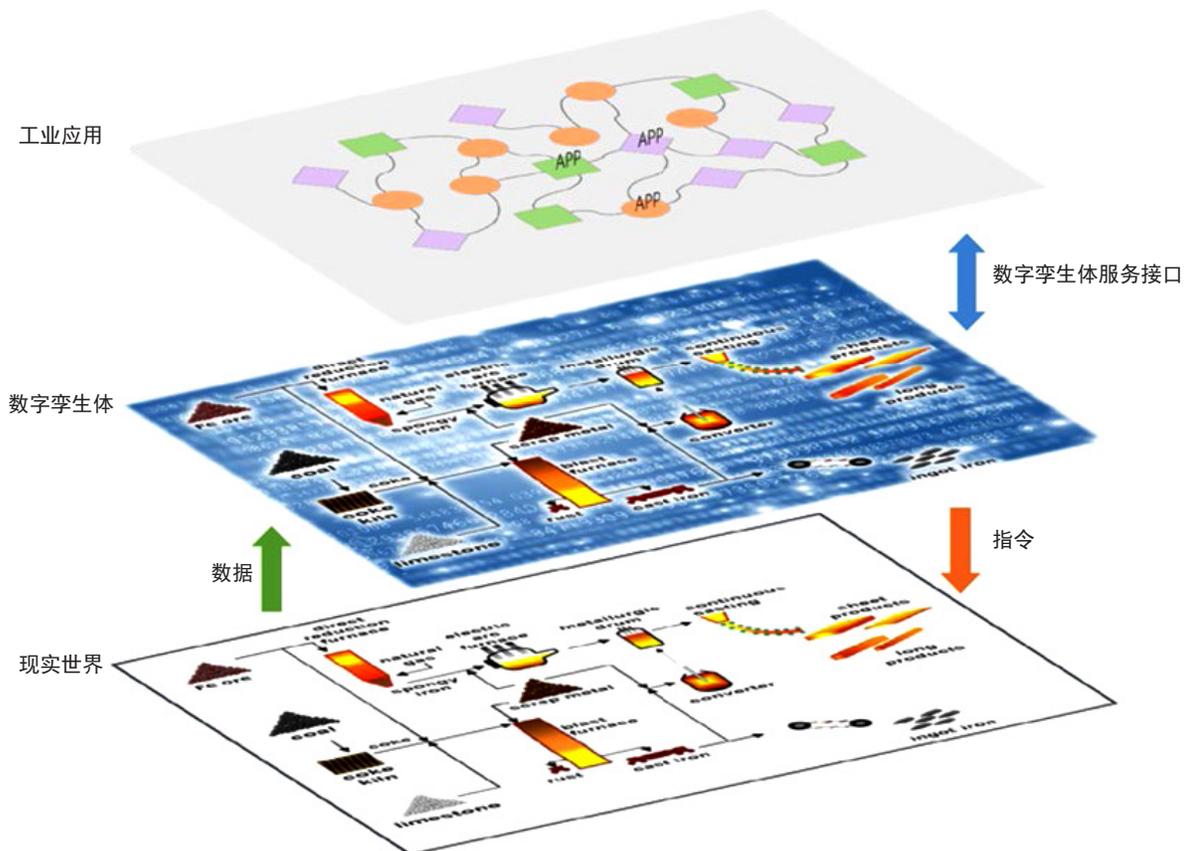
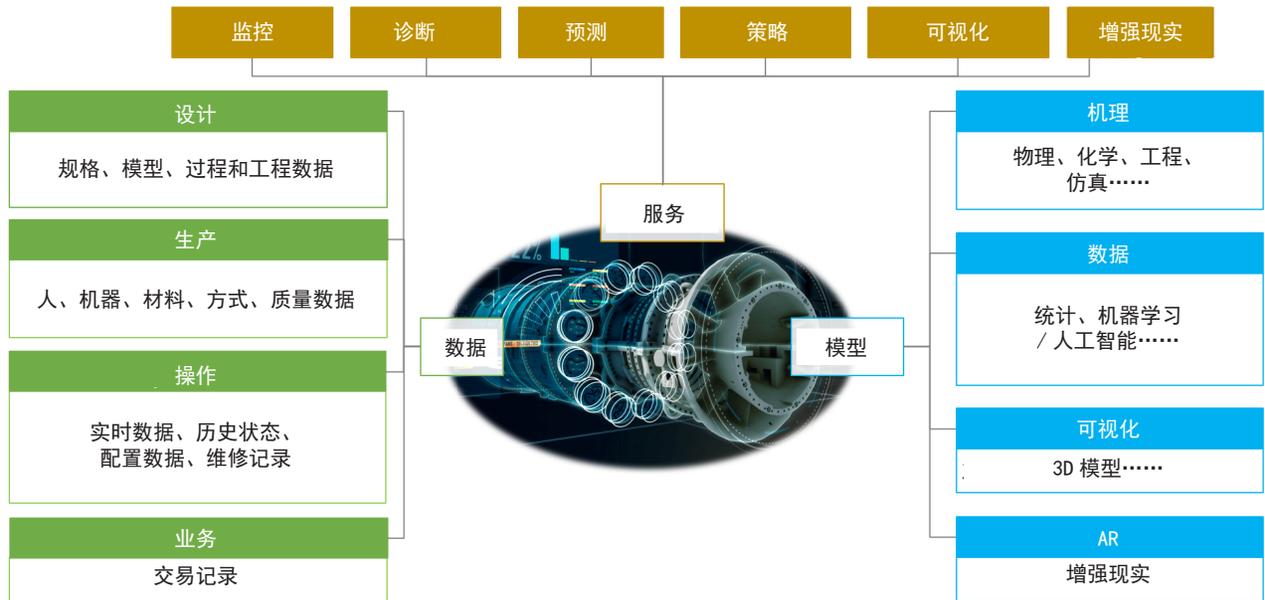


图8 数字孪生体衔接设计与应用

现实世界的物理实体类别来构建对应的数字孪生体。各实例实体是基于其类型的模板，根据其环境配置创建的。类似地，我们可以根据各实例实体的类型在其间建立逻辑关系。

五、数字孪生涉及的技术领域

图9列出了数字孪生涉及的八大技术领域，下文将逐一进行解释。

信息建模：信息乃是数字孪生的核心元素，贯穿实体的整个生命周期。对此，要着重考虑诸多方面的内容。举例如下：

- 数字孪生的元模型——用于描述应用案例所需的内部模

型；

- 数字孪生内容的结构化模块化机制、实体生命周期中出现新型信息时的扩展机制；

- 构建数字孪生结构与内容时必须采用的标准，以促进跨公司信息交换；

- 以上标准与现存信息间的映射机制；

- 单一数字孪生体中的信息关系建模机制；

- 不同数字孪生体组件的建模方法。

信息迁移：各个数字孪生体的信息来源不同。部分信息可能保存于数字孪生体之内。例如，某一高级分析应用要借助数字孪生体进行输入，该应用可能只将分析结果存储于数字孪生体之

内。将信息从各信息源迁移到孪生体时，必须着重考虑以下机制：

- 不同来源（设备、应用程序、数据库以及其他孪生体）的信息迁移机制；

- 向孪生体中复制信息的机制、从孪生体中引用信息的机制以及二者相结合的机制；

- 信息缓存机制；

- 在线离线信息迁移机制（例如对物理实体进行在线监控、或在离线模拟测试中）。

信息同步：要着重考虑以下几点：

- 信息源与孪生体之间的双向信息同步方法；

- 复杂孪生体中，多个子孪生体之间的信息同步机制；

- 信息同步规则（安全性、同步频率等）；

- 保障孪生体及其信息源的互操作性以促进信息同步的标准及方法。

服务接口：数字孪生体需与其他组件进行交互。为促进交互，需配备多种服务接口。我们的服务接口需满足以下条件：

- 适合各种需消耗、迁移数字孪生体内容的应用（如实时模拟应用、分析应用、AI应用等）；

- 可跨供应商与其他数字孪生体进行交互；

- 可与对应的物理实体进行交互，以便从实体收集信息、控制实体；

- 可与其他信息源进行交互，



图9 数字孪生涉及的技术领域

从而丰富、同步数字孪生体内容；

就信息访问服务接口方面，要着重考虑的关键内容如下：

- 离线信息访问机制（如不同文件格式的形式）；
- 在线信息访问机制（如以 RESTful APIs 的形式）；
- 批量 / 信息流形式的信息交换机制；
- 云端、边缘、设备等级别的交互服务接口（如云端—云端、设备—云端、云端—设备）；
- 跨供应商互操作的服务标准。

连接是实体与孪生体交互、各孪生体之间交互的关键推动者。对此，要着重考虑诸多方面的内容。举例如下：

- 唯一识别孪生体与其对应

实体并建立连接的机制；

- 在网络中自动发现实体并连接对应孪生体的机制；
- 发现其他孪生体并建立其间接连接的机制；
- 促进跨供应商进行孪生体互操作的连接标准。

部署：根据应用程序的需求，数字孪生体可边缘部署，也可云部署。选择的根据一般如下：

- 延迟、响应的的时间要求；
- 与其他系统的互操作性程度及一体化的程度；
- 控制要求；
- 分析复杂性及性能要求。

部署数字孪生体需要采取的机制有：

- 灵活部署机制——可对数字孪生体内容进行物联网设备部

署、边缘部署、云部署等；

- 分布式孪生体的组件部署机制——集合不同位置的孪生体，形成复合数字孪生体；
- 多态部署机制——可将数字孪生体以不同形式部署于不同位置。

如图 10 所示，我们须将案例中的数字孪生体视为一个主工作副本，和其对应的主模型、主数据、相关定义一起被保存在存储库中。可以针对不同应用程序定制其它孪生体，例如用于模拟的离线孪生体和用于远程监控的在线孪生体。若要构建的是后一种，该孪生体中的信息将根据对应物理世界的信息不断更新，从而反映物理世界的真实情况（“地面实况”）。

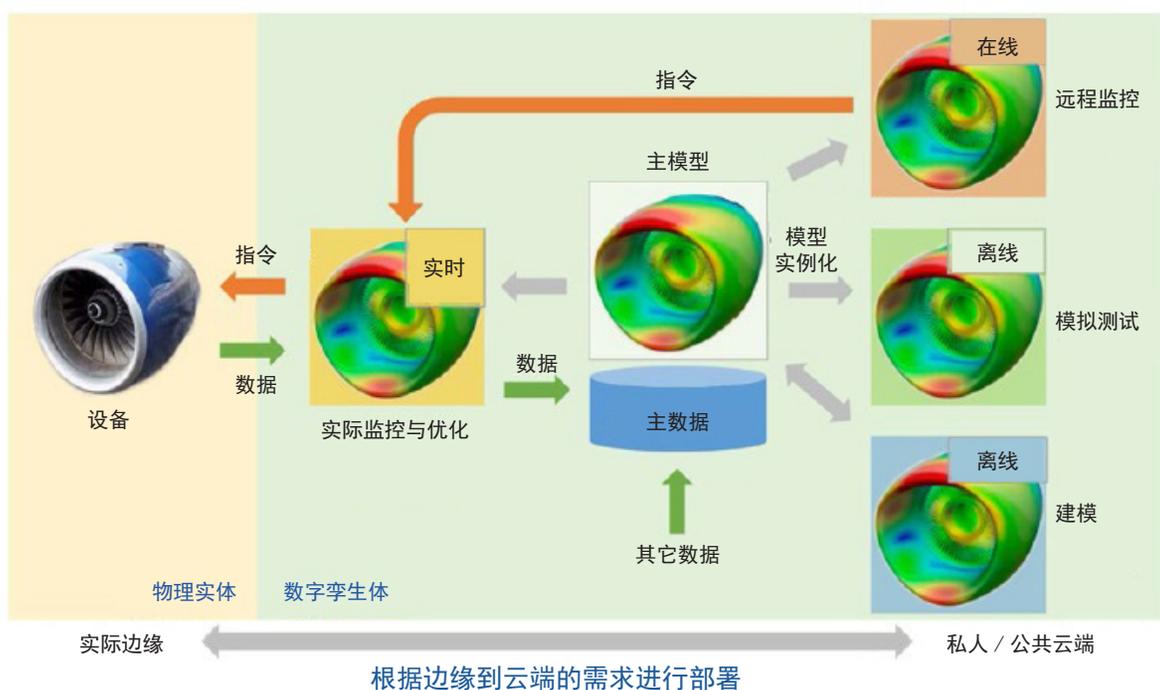


图 10 数字孪生体部署模型

有时，数字孪生体可被部署在对应物理实体的附近。对物理实体执行现场监控、分析，提供实时（或近实时）的反馈，从而以优化物理实体的运作情况。

安全：数字孪生体与不同实体的交互，对应着不同的安全性需求。就数字孪生体部署方面，需着重考虑：

- 孪生体内容的安全访问控制机制（如基于角色的访问控制机制）；

- 复合数字孪生体中各子孪生体的供应商安全访问控制机制；

- 通过数字孪生体与物理实体进行交互的安全交互控制机制；

- 保障信息、模型和其他元数据真实性的方法（如其他各方的身份、加密密钥、访问权限、特权）；

- 安全部署数字孪生体的方法，以及可确保执行中的软件版本正确且未经篡改（以增强特定类型数字孪生体知识产权保护解决方案的可信性）的方法；

- 协助解决纠纷的方法（如有必要），以确定信息来源或时间。

互操作性是“两个或两个以上系统/应用交换信息、共用已交换信息的能力”。为实现互操作性，信息的语法和语义、预期行为和交换规则等都需通过

国际标准或双方同意的通信协议来定义。就数字孪生体的互操作性方面，需着重考虑诸多方面。举例如下：

- 保障多个数字孪生体间互操作性的机制与标准；

- 保障不同应用和孪生体间互操作性的机制与标准；

- 保障孪生体与其对应实体间互操作性的机制与标准；

- 保障孪生体与其对应信息源之间互操作性的机制与标准。

六、标准与框架

就数字孪生方面而言，现有的标准化工作很多，部分并不直接被称为“数字孪生”。IEC 62832 这一完善的标准就定义了以数字工厂资产表示为中心的数字工厂框架，但是没有明确提及数字孪生。ISO/IEC JTC1 的新兴技术创新联合顾问组（JETI）在其发布的技术趋势报告中表示，“数字孪生”是亟待深入研究的首要领域，此外，联合组正在积极探索与开源社区的合作模式。

2019 年，ISO/TC 184 顾问组注意到，国际标准组织（ISO）内部不存在基于标准的“数字孪生”数据架构基础。因此，ISO/TC 184 成立了数字孪生体标准研制组。另外，在 2019 年，IEEE 标准协会发起了 IEEE P2806 项目，旨在研究工厂环境下物理实

体数字表示的系统架构；ISO/AWI 23247 也用类似方法，研究数字孪生制造框架，该框架侧重于孪生体的服务接口和功能性，以实现孪生体双元件的即插即用。

为落实数字孪生体的智能制造，德国平台工业 4.0（German Plattform Industrie 4.0）发布了资产管理框架 IEC PAS 63088。法国、意大利和德国之间的合作推进了这一工作。

ISO TS 18101-1 “为供应商中立的工业数字生态系统框架提供了要求、规范和指导”，侧重于石油、天然气方面的互操作性。在这种情况下，数字孪生体就成为了“服务组织并为其提供价值的数字资产”。而数字资产并不一定是物理资产。

开源工作的重要性愈发凸显。Eclipse BaSyx 项目率先提供了软件开发工具包（SDK）、浏览器、编辑器，用于开发符合资产管理框架规范的数字孪生体。作为 Eclipse 物联网的一部分，Eclipse Ditto 与 Eclipse Vorto 相结合，提供了通用的数字孪生体框架。

除国际标准化组织（ISO）、国际电工委员会（IEC）等传统的标准开发组织（SDO）外，身处物联网大环境下的其他联盟，如万维网联盟（W3C）物联网，也在研究事物的数字表示规范。

七、数字孪生的实际应用

诸多的公司及研究人员提出了大量的数字孪生应用案例。本节列举了数字孪生在不同领域的一些应用案例。

1. 数字孪生在制造业领域的应用

一架商用飞机由发动机、起落装置、航空电子设备等多个零部件组成。因此，飞机的数字孪生体应由这些零部件的孪生体组成。航空公司是飞机运营商，从负责（生产）整架飞机的公司处购买或租赁飞机。因此，飞机的

数字孪生体应由飞机制造商在交付时负责提供。然而，整架飞机的生产过程离不开各个主要零部件的设备制造商，反过来，飞机制造商在构建数字孪生体时，要依赖各零部件的数字孪生体，如发动机制造商的发动机孪生体。各孪生体应能在单一平台或互操作平台上实现互操作。随着时间的推移，各孪生体也须保持正常的运转和维护状态。

就商业价值而言，一架飞机的使用寿命通常为几十年，期间的维护成本可能超过飞机的原始成本，而飞机的数字孪生体有助于进行提前维护、提升运行效率（如燃油效率）、制定飞机维护策略，这些都是构建数字孪生体的能带来的重要收益。

2. 数字孪生在能源与公用事业领域的应用

在粒化过程中，为实现较高的炉产率、能源效率和质量标准，熔炉设备及车间需得到有效控制。

如图 11 所示，粒化炉数字孪生体与车间内分布的控制系统协同工作。然后，孪生体通过向操作员推荐最佳设定值，不断实时优化操作。数字孪生体中包含数据和信息预处理、设备行为模拟数据模型、设备行为模拟物理模型、自学模块、（可根据流程、质量、安全性及环境限制来优化输入的）决策功能。数字孪生体使用基于 7000 余个传感器研发

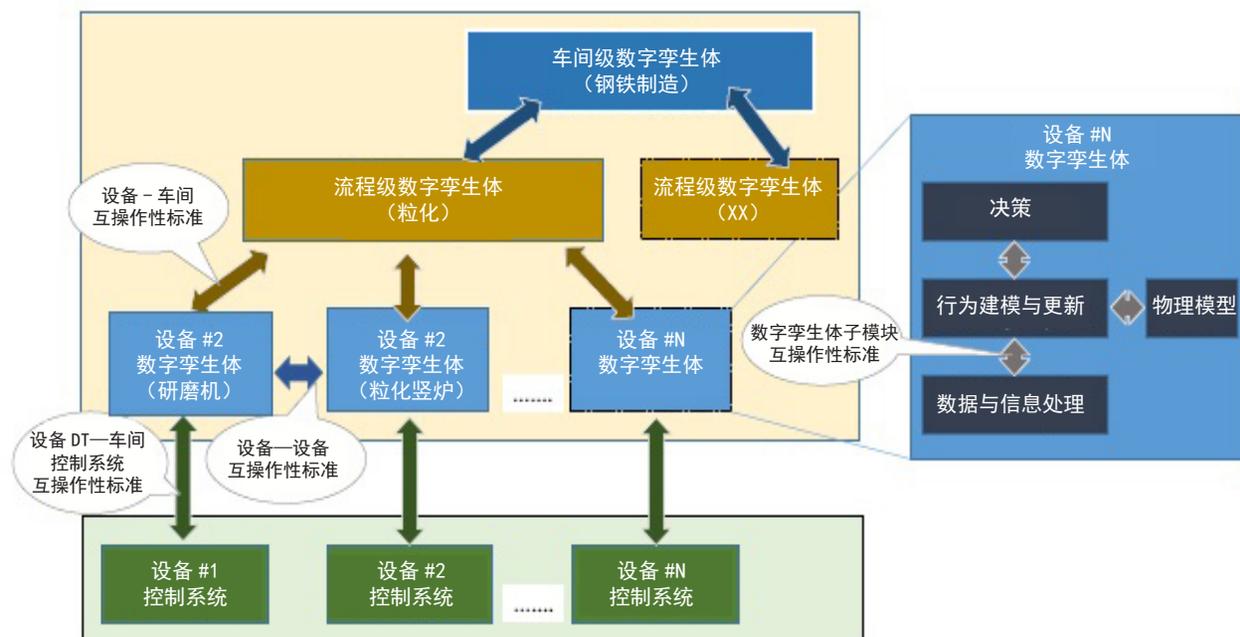


图 11 粒化过程的数字孪生体

的数据传感器、物理软传感器，来预测流速、温度、循环气体的成分。

钢铁制造车间的数字孪生体包括：

- 控制单一设备的设备级数字孪生体；
- 构建设备级数字孪生体必需的子模块；
- 数字孪生体和现有控制系统之间的连接；
- 在工艺流程中控制设备的流程级数字孪生体；
- 控制整个车间运作的车间级数字孪生体。

就互操作性需求而言，需要考虑到用于实现子模块之间通信的互操作性标准，如下所述：

在这一案例中，数字孪生体具有以下商业价值：

- 实时优化，控制关键控制参数，燃料消耗降低 2%，吞吐量提高 3%；
- 实时计算各种质量参数（如粒化矿抗压强度）及熔炉运行参数（如炉床温度），帮助操作员快速准确地做出决策，无需实验室取样测试或进行假设。

3. 数字孪生在石油天然气领域的应用

油井生命周期自石油勘探阶段开始，就有地下油井监控数字孪生体，打井时会借助基于地震数据等地下数据的模拟模型。地下油井监控数字孪生体是一个复合系统。钻井模型由四个不同的独立元件组成，每个元件都对应一个独立的复合数字孪生体。它们分别是地下部分、井筒、钻井设备和地面设备。地下部分则包括周围的地质、石油储层和近井地层。为推导出油井施工过程中待执行的目标函数，需要对这四大密切相关的主要数据元素进行建模：

- 井筒轨迹；
- 钻柱物理；
- 压力控制（泥浆性质）；
- 储层成分和完整性（近井地带）。

可扫描大量地质数据、过往生产数据的 AI 技术，与油井监控、钻井设备传感器相结合，实现了地下储层和跨地面作业间的操作控制和协作。地下油井监控数字孪生体在油井的整个生命周期中不断优化，以解决完井、生产、维护和报废等方面的应用案例附加问题。

地下油井监控数字孪生体具有以下商业价值：

- 提供了可降低成本、优化

油井作业和优化产量的策略评估机制。借助数字孪生体，可以更好地了解财务信息、技术参数、操作参数，从而实时管理油井；

- 地下油井监控数字孪生体可提高油井完整性指数、优化油井施工过程、支持开发高效灵活的油井施工工作流程、并有助于决策得出最高价值的勘探、钻井、完井和生产替代方案。

4. 数字孪生在矿业领域的应用

采矿作业数字孪生体的重要关注点是“处理资产健康”（Processing Asset Health），孪生体中包含了做出最佳维护决策所需的信息，其决策可以是基于现有情况做出的，或是预防性的。此外，工作人员还可借助该孪生体提供的信息，根据实际资产的状态参数与指标，按重要性排列工作订单流程。

在整个业务流程中，都需使用“处理资产健康”数字孪生体。因此孪生体须接入各个系统，来保证其显示信息的正确性，信息的细致程度也符合使用者的需求。

该数字孪生体与以下系统进行交互：

- 企业资产管理系统 (EAM);
- 局域历史数据库及企业历史数据库;

- 客户 IT 系统;
- 现有控制系统。

在这一案例中, 数字孪生体具有以下商业价值:

- 有能力缩短故障间隔时间、平均故障时间, 协助采矿资产的绩效管理。这是可以实现的, 因为可用信息比以前更接近实时信息。将这些信息与来自企业资产管理系统 (EMA) 的关键信息相结合, 可将不同的系统信息在数字孪生体中结合起来, 优化关键决策;

- 最大化实现矿藏的开采潜力, 将因设备维护问题造成的工厂损失降到最低;

- 提高调度准确性, 反过来有助于监控生产状况, 最终实现对资产的预防性监控;

- 工作资产状态与维护计划一目了然, 降低总成本。

5. 数字孪生在过程自动化领域的应用

批次生产的化学产品的数字孪生体, 综合了该批次化学产品的所有必备生产信息, 重点的

信息是生产过程中涉及的生产参数, 如温度、压力、湿度等。

该孪生体能提供信息, 以监控当前产品状态, 包括粘度、pH 值和聚集状态。并可在这些数据的基础上, 通过模拟, 预测出后续加工步骤的最佳生产参数, 使产品质量符合预期。

产品属性的变更可被记录在时序数据库中, 方便追溯质量临界值超标的具体时间及位置, 从而确定超标原因。正是由于这些功能, 产品数字孪生体才成为质量管理进程的一大关键组成部分。

批次生产的化学产品的数字孪生体收集了该批次化学产品的历史数据, 因此, 除实际产出的产品外, 孪生体也可被交付给客户, 其中的数据可为客户在后续加工或使用成品时提供帮助。

在这一案例中, 数字孪生体具有以下商业价值:

- 实现生产参数透明化、可追溯, 或可应用于索赔回溯;

- 直接检测出劣等品, 避免劣等品进入后续的高成本生产过程;

- 分析产品质量及前期生产参数, 进一步了解生产;

- 智能模拟生产参数, 提升

产品整体质量。

八、结语

多数公司在提供数字孪生服务时, 将其视作物联网产品之一, 然而, 数字孪生的概念要早于物联网, 只是当时的名称和定义不同于现在的“数字孪生”。也因此, 人们对数字孪生有着多种解读, 具体是由数字孪生在不同应用领域承担的角色所决定的。尽管架构师在设计不同的数字孪生体时, 所面临的系列决策会有重叠, 人们对数字孪生体的不同理解还是阻碍了通用却抽象的架构的出现, 这是由数字孪生体及其在各个工业系统中的地位所导致的。

本白皮书提供了工业互联网视角下数字孪生的具体定义, 并阐述了数字孪生提高现有应用案例效率、助力开发新应用案例的场景。本白皮书说明了数字孪生体设计的技术因素与决策重点, 为数字孪生技术在工业互联网参考架构 (IIRA) 中的应用奠定了重要基础。我们将沿着这个思路, 推进日后工作, 为实现安全、互操作性等数字孪生体的重要质量属性进行方法探索。MT

十大科学问题和工程难题专题

提出问题是取得科技突破的关键一步^{*}

——解读 2020 重大科学问题和工程技术难题

“提出重大科学问题工程技术难题并判别其优先顺序，是科学发现和技术创新的出发点和动力源，是解决问题、难题，取得科技突破的关键一步。”在 8 月 15 日举办的中国科学技术协会年会闭幕式上，中国科协发布了 2020 “重大科学问题和工程技术难题”。作为一项有 1.88 万名院士、专家、一线科技工作者参与评选的活动，今年的这些问题和难题具有哪些特点，连续三年的发布产生了哪些科研和社会影响，未来会如何解决这些问题和难题，本文通过对中国科协学会学术部部长刘兴平的采访，对此进行解读，同时对评选出的十大科学问题与十大工程技术难题进

行介绍。

一、与国家乃至人类发展密切相关

记者：重大科学问题和重大工程难题已经连续发布了三年，与往年相比，今年有哪些特点？

刘兴平：此次的重大科学问题与工程技术难题征集的覆盖面比往年更广，共有 96 家全国学会、3 家学会联合体和 4 家企业科协参与，覆盖面超过了 2018 年的 69 家和 2019 年 81 家全国学会。同时，也初步建立了国际合作机制。中国航空学会，中国创造学会，中国岩石力学与工程学会等全国学会，联合了世界自然基金

会、荷兰宇航院、国际地质灾害与减灾学会、国际岩石学会、国际岩石力学与岩石工程学会等国际组织和国家组织，共同提交了若干个问题和难题。

为了保证问题和难题提交的质量，今年在征集阶段首次邀请院士提出问题，发动科技界共同参与，今年的网络初评阶段共有 18864 名科技工作者参与投票，其中含 432 名境外科技工作者，实名投票数 50346 票，比往年有大幅提高。

值得注意的是，今年入选的前沿科学问题——“冠状病毒跨种传播的生态学机制是什么”在初选之际就颇受科技工作者关注。该问题最终入选，说明这些

^{*} 本文原载于《光明日报》8 月 16 日 04 版，记者詹媛。本刊获得授权转载。

问题难题同样也是社会发展中迫切需要解决的实际问题。科技工作者的关注点，也同样与社会发展密切相关，与国家乃至人类发展密切相关。这也体现了此项活动具有重要的现实意义。

二、研判前沿趋势，优化爱科学的环境

记者：自中国科协发布重大科学问题和重大工程难题以来，产生了哪些科研和社会影响？

刘兴平：2020 重大科学问题与工程技术难题发布活动征集到 103 家全国学会提交的 490 个问题难题，1.88 万名院士、专家、一线科技工作者参与。

中国科协一直坚持尊重科学家对科学前沿的敏感性和探索精神，重视发挥跨界学术交流孕育创新的积极作用，团结引导科技工作者科学研判前沿趋势、识别重大问题。我们每年的发布活动引起了广大科技工作者的关注，形成了广泛影响力，也让广大科技工作者更好地把握世界科技前沿和发展趋势，引导他们围绕这些重大难题开展科研工作，为经济社会可持续发展贡献力量。

此外，为加强科技前沿进展与未来趋势研判，建言国家中长期科技发展规划，今年中国科协还组织召开基础科学重大问题高层次研讨会，组织中国数学会、中国物理学会、中国化学会、中

国细胞生物学学会等 11 家与基础研究相关的全国学会凝练基础科学重大问题、推动科技体制机制创新、培养领军人才等主题深入研讨，形成若干战略共识。这项工作也受到教育、科技等多个相关主管部门的关注，他们了解重大科学问题与工程技术难题的详情，希望这项活动能够为科技规划和中长期战略规划做参考。

这项发布活动还形成了学术、智库、科普相融互促的良好局面。今年参与评选和关注的人数比往年增加了 160%，国内有 50 多所高校在微博、公众号发布投票和交流信息，公众参与十分广泛。中国科协也以发布重大难题为契机，不断激发青少年科学兴趣、优化爱科学的环境，推动高端科研资源科普化工作，促进公众理解和支持科学，营造讲科学、爱科学、用科学的环境。

三、将不断推动攻克科研问题和难题

记者：在怎么攻克这些问题和难题方面，未来还会开展哪些工作？

刘兴平：提出重大科学问题工程技术难题并判别其优先顺序，是科学发现和技术创新的出发点和动力源，是解决问题难题的关键一步。

自 2018 年中国科协发布重大科学问题和工程技术难题以

来，中国科协通过组织学术交流、专题研讨会等形式，不断推动攻克这些问题难题。中国科协正在完善重大问题凝练与持续性智库机制建设。同时在国内重大问题研讨基础上，探索与国际科学共同体开放协同、与国际科技组织交流合作的机制，以此助推中国科学家深度参与全球科技治理。

中国科协还以“科创中国”建设为切入点，打造“三库一平台”（问题库、项目库、人才库和技术服务与交易平台），推动产学研协同网络与组织创新，推动科技经济深度融合、相互促进。

今年中国科协组织出版了《面向未来的科技——2020 重大科学问题和工程技术难题解读》图书，以解读问题和难题的形成背景、国际发展趋势，分析可能的解决方案，和预测未来的发展前景为主要内容。这本图书可以让广大科技工作者更好地把握世界科技前沿和发展趋势，激发青少年科学兴趣，促进公众理解科学，提升公民科学素质，培育更多科技创新人才，为创新营造良好环境。

我们知道，攻克这些重大科学问题和工程技术难题绝非一日之功。中国科协将继续发挥组织优势，团结引领更多科技工作者面向世界前沿、把握国家战略需求，锚定目标不放松，久久为功解决重大科学问题。

十大科学问题与十大工程技术难题

一、前沿科学问题

问题 1：冠状病毒跨种传播的生态学机制是什么？

目前新冠肺炎在全球肆虐。病毒学家曾多次警示冠状病毒跨物种传播是大概率事件。蝙蝠等野生动物携带冠状病毒的本底情况以及野生动物如何突破生态和生理屏障发生跨种传播和感染，在科学层面都尚不清晰。该问题对于揭示冠状病毒跨物种的传播机制和预防未来冠状病毒导致的流行病具有重要意义。

问题 2：引力波将如何揭示宇宙奥秘？

自 2015 年首次直接探测到引力波以来，引力波已迅速成为国际上基础物理与天体物理前沿研究的热点，预计十余年内宇宙起源问题将有取得重大突破的历史机遇。引力波打开了观测宇宙的一扇新窗户，通过观测引力波源在宇宙中的产生与分布，有望

解答广义相对论与粒子物理的标准模型所遗留下来的深层次科学问题，从而加深对自然界的理解。

问题 3：地球物质是如何演化与循环的？

地球物质主要分为岩石和矿物。人们对地球历史时期岩浆岩和变质岩的演化与循环的认识由于缺乏大数据的综合分析而模糊不清。利用大数据平台和地球深时大数据系统的综合分析，可以在矿物演化历程与行星地质演化的基本历程和特殊事件之间建立联系，从矿物演化的角度厘清行星地球及其多圈层演化规律和耦合关系，并解答行星地球如何演化、地球各圈层是否存在共演化关系的基本科学问题。

问题 4：第五代核能系统会是什么样子？

2000 年，美国能源部倡议发起的第四代核能系统国际论坛把核能的发展分为四代。目前对于第五代核能系统的研究仍处于探索交流阶段，暂无成熟的概念界

定和目标定义，对其实现路径更是少有谈及。如能推动第五代核能系统概念的落地和最终实现，其可以革新核能开发观念，革新核能开发模式，革新核能应用观念，支撑能源系统的深度脱碳；引领世界核能创新，助推中国成为世界核能创新高地。

问题 5：特种能场辅助制造的科学原理是什么？

随着航空航天、交通运输等领域对轻量化和安全性的持续需求，包括超高强度钢、轻合金、复合材料和金属间化合物等高强度材料应用于复杂构件。随着材料强度的提高，制造难度显著提高，成形缺陷更难控制。现有的研究表明，特种能场辅助成形技术在改善高强难变形材料制造难题方面具有巨大潜力。

问题 6：数字交通基础设施如何推动自动驾驶与车路协同发展？

未来自动驾驶车辆大范围社会化运行局面必然会出现，对交

通运输系统而言将是一场变革，道路交通运输系统面临演进换代的挑战。对于支撑自动驾驶社会化运行的新型道路基础设施的研究，我国尚处于起步阶段，国外也无现成的先进技术和经验可借鉴，需要适时将自动驾驶研究的支持重点向基础设施侧智能供给研究及综合集成落地应用研究转移。

问题 7：调节人体免疫功能的中医药机制是什么？

虽然免疫学的基础研究取得了令人瞩目的成就，医学也在突飞猛进地发展，但在许多疑难重症的防治方面仍显得不足。系统性红斑狼疮、类风湿关节炎、强直性脊柱炎等自身免疫性疾病仍然困扰着患者。这些重大、疑难疾病的发生、发展和转归均与免疫密切相关。中医药能够多层次、多靶点、多途径作用于机体，调节机体免疫功能，在疾病预防和治疗中有重要的应用价值。

问题 8：植物无融合生殖的生物学基础是什么？

无融合生殖是一种通过种子进行无性繁殖的生殖方式，可以使杂交品种产生克隆种子，保持杂交后代性状不发生分离，从而永久固定杂种优势。然而，由于无融合生殖发生机制的复杂性，尽管经过了多国科学家近一个世纪的努力，其形成机制依然不清楚，也未能将其成功应用于作物育种中。

问题 9：如何优化变化环境下我国水资源承载力，实现健康的区域水平衡状态？

当前，我国生态文明建设进入加速期和关键期，对水资源集约利用和严格保护提出了更高要求。研究变化条件下水资源承载力与水平衡优化这一科学问题，有利于深化认识我国区域水循环要素及其演化规律，完善水资源承载力评价方法，阐明水平衡状态对于水资源承载力的指标意义，明确诸多水问题及生态环境问题的发生机制，为总结与水资源承载力相适应的经济社会发展和生态保护模式，有效保护和修复生态环境提供重要的理论和技术支撑。

问题 10：如何建立虚拟孪生理论和技术基础并开展示范应用？

虚拟孪生是在数字孪生的基础上，利用传感器、物联网、虚拟现实、人工智能等数字技术对真实世界中物理实体和智能实体对象的特征、行为、形成过程和性能等进行描述和建模的过程和方法，也称为虚拟孪生技术。它以数字孪生为基础，但更侧重于对智能实体或生命体的建模和仿真。如何实现制造物理世界与信息世界的交互与共融，是当前国内外实践智能制造理念和目标所共同面临的核心瓶颈之一。

二、工程技术难题

问题 1：如何开发新型免疫细胞在肿瘤治疗中的新途径与新技术？

免疫细胞技术是人类彻底治愈肿瘤的希望，是全球前沿医学和资本追捧的热点领域之一。树突状细胞（DC）作为链接细胞免疫和体液免疫的关键节点细胞，能够调动整个免疫系统，抵抗病原体的入侵以及促进肿瘤细胞的清除，成为新型免疫细胞疗法的重点研究方向。新型 DC 可扩增技术可实现 DC 疫苗的标准化、批量化生产，可显著减低制备成本，服务更多癌症患者，具有明显的经济效益和社会效益。

问题 2：水平起降组合动力运载器一体化设计为何成为空天技术新焦点？

水平起降组合动力运载器具有快速、廉价、可靠的特点，可成为低成本天地往返运输工具。水平起降组合动力运载器一体化设计技术是支撑未来航天运输系统发展与应用的核心技术之一，是未来先进航天运输系统的重要支撑技术之一。

问题 3：如何实现农业重大入侵生物的前瞻性风险预警和即时控制？

农业有害生物入侵不仅仅是简单的植物病虫害或动物疫情问题，入侵生物的发生流行不仅危害食品安全和农业生产，造成巨

大的直接经济损失，还可能对人类健康构成越来越大甚至是灾难性的威胁，对外交、经济和社会产生巨大影响。因此，站在国际化、全球化视角，从科学研究和专业技术层面，开展农业入侵生物跨境传播预警及防减技术合作的协同攻关，将有力解决入侵生物疫情的源头治理和联防联控关键技术难题，保障社会稳定与公共安全。

问题 4：信息化条件下国家关键基础设施如何防范重大电磁威胁？

强电磁脉冲一旦对金融、能源、电力等领域的关键信息基础设施产生影响，将可能导致交通中断、金融紊乱、电力瘫痪等重大事故。开展此项研究，对确保关键基础设施电磁安全、保护经济建设成果、提升关键基础设施容灾抗毁能力具有重要意义。

问题 5：硅光技术能否促成光电子和微电子的融合？

信息光电子芯片已然成为“数字化新基建”的核心和基石，也是全球信息通信价值链的关键领域和网络强国建设的“国之重器”。硅基光电子芯片技术既可应用于芯片级光互连，又适用于长距离光纤通信，可实现全功能光电子集成，具有极高的通用性和兼容性，是微电子和光电子两大产业公认的发展方向。利用国内现有微电子产业资源和互补金属氧化物半导体（CMOS）制造平

台，建立健全硅光产业链，可以有效提升我国信息光电子的制造能力，缓解光电子芯片制造工艺的“卡脖子”困境，为我国信息化新基建提供有力支撑。

问题 6：如何解决集成电路制造工艺中缺陷在线检测难题？

集成电路领域目前是国际科技竞争的主战场和大国博弈焦点。对于集成电路缺陷检测技术及设备，一方面现有最先进技术设备被少数几个发达国家垄断；另一方面，世界范围内 7 纳米及以下节点的缺陷在线检测技术仍未成熟，设备缺口仍然巨大，谁率先掌握了相应关键技术，谁就掌握了未来主导权，这对我国来说既是机遇又是挑战。

问题 7：无人车如何在卫星不可用条件下的高精度智能导航？

以无人救援车、无人采矿车、无人运输车等为代表的特种无人车是完成现代化作业、抢险救灾等任务的核心无人装备。为提高无人车的紧急救援、联合作业等能力，要求其导航系统具备高精度定位、自主避障、智能路径规划及导引等功能。因此，需要研究具有高精度、全自主的导航方式以及需要解决面向无人车的惯性基智能导航问题。

问题 8：如何在可再生能源规模化电解水制氢生产中实现“大规模”“低能耗”“高稳定性”三者的统一？

发展高效低成本的可再生能源和氢能技术是对国家重大需求的及时响应，也是全球减少碳排放和减缓气候变化的优质解决方案。但当前电解水制氢技术的发展水平限制了可再生能源转化为化学能的转化效率及产业化进程。突破高效、低成本、规模电解水制氢技术可极大地促进可再生能源、氢能的利用和发展。

问题 9：如何突破进藏高速公路智能建造及工程健康保障技术？

青藏高原地层岩性复杂多变，新构造运动剧烈，深大活动断裂广布，冰川、冻土与山地灾害群（链）发育，具有“显著的地形高差”“强烈的板块活动”“频发的山地灾害”“敏感的冻土环境”四大地质环境特征，以及“高频冻融循环”“剧烈干湿交替”“极端高寒缺氧”三大气候环境特征，由此带来的系列工程技术难题是制约西藏高速交通发展的关键技术因素。

问题 10：如何突破光刻技术难题？

光刻技术是制造集成电路的关键技术。光刻技术的核心在于光刻机、光刻工艺和光刻胶三个方面。尽管取得了一定的进展，但跟世界发达国家水平相比，我国光刻技术和产业的发展水平仍较落后，差距仍然很大，“受制于人”的困境依然存在。

关于特种能场辅助制造



中国机械工程学会塑性工程分会

编者按：前述“前沿科学问题”中的第5个问题“特种能场辅助制造的科学原理是什么？”是由我会塑性工程分会组织专家推荐的。本文对特种能场辅助制造技术及其进展、难点问题做简要介绍。

特种能场包括电场、电磁场、超声场和激光等。随着加工制造方法和工艺设计的不断进步，材料加工技术正经历着深刻的变革。特种能场辅助制造技术应运而生。

特种能场辅助制造即是利用上述的电、磁、声、光等特殊能量源，对零件变形成形过程进行有效调控，在宏观尺度下降低零件制造难度、提高成形精度、改善材料微观组织、优化构件力学性能、提高表面质量等。特种能场辅助制造技术主要包括电致塑

性成形技术、电磁成形技术、超声振动塑性成形技术及激光板料热成形技术等。

一、特种辅助能场制造技术研究进展

1. 电致塑性成形技术

电致塑性技术是基于电致塑性效应的制造技术。电致塑性效应指材料在脉冲电流作用下变形抗力显著降低、塑性明显提高的现象，最早由前苏联学者

Troitskii 于1963年发现。随后，前苏联和美国的一些学者对此进行理论研究，同时开展工程应用的探索。俄罗斯巴以科夫冶金研究院较早研究了脉冲电流辅助轧制技术，探索了难加工、难变形金属如钨、钼甚至铌及其合金的脉冲电流辅助轧制工艺。在国内，清华大学在脉冲电源设备的研制和不锈钢、有色金属以及镁合金等的电塑性拔丝等方面取得了新的进展。哈尔滨工业大学、航天五院五二九厂和上海交通大学等科研机构将脉冲电流辅助成形技

术应用于难变形材料的大型构件制造中,已取得显著效果。

2. 电磁成形技术

电磁成形技术的历史可追溯到二十世纪初。1907年,美国科研人员 Northrup 将一根通有脉冲强电流的导体插入水银中,发现在电流放电的瞬间水银会发生明显的变形。1958年,美国动力学研究中心的原子能实验室的 Brower 和 Harvey 首次把这种现象应用于金属成形,将其命名为“电磁成形”(Magneform),并申请专利,正式宣布电磁成形技术的诞生。1962年,两人又发明了用于工业生产的电磁成形机,引起世界发达国家的广泛关注和高度重视。到20世纪七十年代中后期,前苏联、美国的电磁成形设备已经系列化,主要用于金属薄板及管成形。1998年,美国联邦政府推出先进技术计划(Advanced Technology Program, ATP),对轻量化板材成形技术进行支持,其中就包括电磁成形技术。2001年,美国能源部启动“铝合金板材电磁成形”研究项目,由福特、通用和

克莱斯勒等公司共同研发铝合金板材电磁成形技术。2007年,由美国 Trim 公司和俄亥俄州立大学等组成的团队在俄亥俄州政府的资助下启动质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cells, PEMFC)金属双极板的电磁成形快速制造工艺研究。

我国在电磁成形方面的研究紧随国际科学界。20世纪六十年代,中国科学院电工研究所启动电磁成形的研究,取得一定成果。20世纪七十年代末,哈尔滨工业大学开始电磁成形相关设备和工艺的研究,于1986年研制出我国首台生产用电磁成形机。如今,华中科技大学、武汉理工大学、西北工业大学、中南大学、北京机电研究所、航天一院、中国兵器工业第五九研究所等单位均开展了电磁成形相关研究工作。2011年,由华中科技大学牵头的“973”项目“多时空脉冲强磁场成形制造基础研究”,针对现有大尺寸、复杂板管类构件的成形受限于工艺装备和材料成形性能的难题,以航空航天领域四类关键板管类构件成形制造技术的突破为目标,力图将电磁成形发展成为航空航天某些关键板管类

零件的主流成形制造方法。这标志着我国电磁成形技术研究进入新发展阶段。

3. 超声振动塑性成形技术

超声振动塑性成形是指对传统塑性加工系统中的加工模具或被加工材料施以一定方向、频率和振幅的可控超声振动,利用超声能量辅助完成各种塑性成形加工的工艺过程。早在1955年,奥地利科研人员 F. Blaha 等在进行超声振动作用下的锌单晶拉伸实验时,发现材料发生“软化”,成形力随之降低,这一现象被称为金属的超声塑性加工效应,也称为“Blaha 效应”。经过几十年的发展,超声振动已经应用于棒料拉丝、管材拉拔、板料成形、挤压成形、铆接、冷锻、旋压等多种塑性成形工艺的研究中,其中振动拉丝和振动拔管已经得到了实际的工程应用。

4. 激光板料热成形技术

激光板料热成形技术是激光热成形技术中应用最广、发展最

快、研究最多的技术，最早由日本科研人员 Y.Namba 于 1985 年提出。他还将激光热成形技术运用到空间站圆筒状舱体的生产当中，以碳钢钢卷作为实验对象，研究材料的温度分布和热变形。随后不久，德国研究人员对激光板料热成形技术开展大量实验和仿真研究，促进了该技术的进一步发展。1997 年，德国通快集团（TRUMPF）开发出世界上首台商品化的激光板料热成形机床，将激光板料热成形技术从实验室推广到工业生产当中。国内的激光板料热成形技术研究始于 20 世纪九十年代，清华大学、中国科学技术大学、北京航空航天大学、上海交通大学、西北工业大学等高校对激光板料热成形技术展开了实验、仿真和理论研究并取得一定的成果，推动了激光板料热成形技术在国内的发展。

二、特种能场辅助制造技术的主要难点

特种能场辅助制造技术已成为各国研究人员研究的热点方向，近几年发表的相关学术论文快速增长，不断向工业化应用积

极推广。但由于核心重要科学问题尚未解答，该技术的持续发展与工程应用仍面临较大困难。未来面临的关键难点与挑战主要包括四个方面。

一是特种能场作用效应的量化与微观机理。目前，特种能场提高新型材料的塑性变形性能和优化微观组织，还停留在定性描述或者间接推导层次。特种能场对材料的作用一般包含多种效应或者机理，包括如何定量地描述特种能场的多种效应或者机理并解耦分析，如何判断哪种效应或者机理占主导地位，如何实时观察特种能场对材料微观组织的影响规律等问题。这些问题是揭示特种能场作用效应和机理的科学基础，也是合理应用特种能场辅助制造技术的科学基础。目前，传统温度场对微观组织作用过程的原位观察已能实现，但是，对特种能场微观作用机制的原位观察尚缺乏特定的微观分析设备，亟待开发。

二是特种能场作用下的力学模型。力学模型是塑性成形有限元模拟的理论基础，现有的力学模型主要针对常规的塑性成形过程或者考虑了传统温度场的影响。如何把特种能场作用效果和

关键参数嵌入到现有的力学模型，正确描述特种能场作用下的材料变形与失效行为，是开展特种能场辅助制造过程有限元模拟的理论基础，也是合理优化工艺参数的关键。

三是多能场耦合作用下的跨尺度建模。特种能场最基础的作用是在原子外层电子上，从原子之间特性的变化，再反映到晶粒内部与晶界、位错等缺陷的改变，在宏观尺度上则影响到材料和模具的界面上等，最终影响塑性变形中的热、力等作用。建立电、磁、热、力等多场耦合下的跨尺度模型，是特种能场辅助制造研究的难点，也是揭示特种能场辅助制造科学原理的基础。

四是多能场耦合制造的参数优化控制原理。特种能场的分布影响着宏观常规的应力场、温度场、组织场、应变场的作用效果，通过成形工艺参数和特种能场的控制参数优化，以最佳效果作用于成形件的组织性能和几何形状。揭示特种能场与传统机械场以及不同能场的有效耦合机理，实现 $1+1 > 2$ 的效果，是特种能场辅助制造发挥最大效益的关键基础理论。MT

人机融合智能的再思考



北京邮电大学人工智能学院 刘伟

引言

近年来，随着科学技术的发展，人工智能取得了显著成果，但依然没有突破性进展。人机融合智能是未来人工智能的发展方向。本文阐述了对人机融合智能的几点思考，首先简要介绍人工智能的起源，提出未来人工智能的发展方向是人机融合智能，并对人机融合智能的相关概念进行了阐述；接着分析了现今人机融合智能面临的困难；最后提出了人机融合智能的探索方法，即深度态势感知，并尝试着建立了人机融合智能理论框架。

一、人工智能的起源与未来发展方向

人工智能（AI）真正起源于

欧洲，最初形态是以哲学、数学的形式表现出来的，如古希腊哲学中的“我是谁？”、莱布尼兹数学里的“普遍文字+理性演算”等。1956年的达特茅斯学院暑期论坛根据英国一位数学家的想法提出了人工智能（AI）的概念。此后六十年来人工智能随着机器学习、数据挖掘、深度学习等技术的发展取得了显著的进步。在这期间人工智能产生了三大主流理论思想，分别是以神经网络为代表的联结主义、以增强学习为代表的行为主义和以知识图谱（专家系统）为代表的符号主义。近两年，美国国防部先进技术局（DARPA）基于技术特征对AI技术发展阶段的分析判断，认为AI已经历第一波和第二波浪潮，将迎来第三波浪潮：第一波AI技术浪潮开始于20世纪60年代初，

以“手工知识”为特征，通过建立一套逻辑规则来表示特定领域中的知识，针对严密定义的问题进行推理，没有学习能力，处理不确定性的能力很弱。第二波AI技术浪潮开始于20世纪60年代末，以“统计学习”为特征，针对特定的问题域建立统计模型，利用大数据对它们其进行训练，具有很低程度的推理能力，但不具有上下文能力。第三波AI技术浪潮以“适应环境”（上下文自适应）为特征，可持续学习并且可解释，针对真实世界现象建立能够生成解释性模型的系统，机器与人之间可以进行自然的交流，系统在遇到新的任务和情况时能够学习及推理。AI的持续自主学习将是第三波AI技术浪潮的核心动力。在此基础上，我们经过思考和分析，认为第四

波 AI 技术浪潮会以“主动适应环境”（更大范围的上下文自适应）为特征，具有可持续学习+不可持续学习并且可解释+不可解释，针对真实+虚拟世界现象能够生成主动适度解释性的模型系统，机器与人之间可以进行自然的深度交流，系统在遇到新的任务和情况时能够实现人机互学习及互推理。人机融合中的主动性互学习互理解互辅助……互助融合能力将是第四波 AI 技术浪潮的核心动力。

客观地说，人工智能只是人类智能可描述化、可程序化的一部分，而人类的智能是人、机（物）、环境系统相互作用的产物。智能生成的机理，简而言之，就是人物（机属人造物）环境系统相互作用的叠加结果，由人、机器、各种环境的变化状态所叠加衍生出的形势、局势和趋势（简称势）共同构成，三者变化的状态有好有坏、有高有低、有顺有逆，体现智能的生成则是由人、机、环境系统态、势的和谐共振大小程度所决定的，三者之间具有建设性和破坏性干涉效应，或增强或消除，三位一体则智能强，三位多体则智能弱。如何调谐共振则是人机融合智能的关键。当代人工智能由最初的完全人工编译的机器自动化发展到了人工预编译的机器学习，接下来的发展可能是通过人机融合智能的方法来实现机器认知，最终实现机器

觉醒。

二、人机融合智能面临的困难

“智能”这个概念就暗含着个体、有限对整体、对无限的关系。针对智能时代的到来，有人提出，“需要从完全不同的角度来考虑和认识自古以来就存在的行为时空原则”，如传统的人、物、环境关系等。当人们进行一段智能活动时，一般都会根据外部环境的变化进行关键点或关键处修正或调整，通过局部与全局的短、中、长期优化预期，实时分配权重于各种数据信息知识处理，更多的是程序化+非程序化混合流程。而机器智能则很难实现这种随机的混合应变能力，确定性的程序化印记比较突出，像“阿尔法狗”（AlphaGo）/元/star 这样比较优秀的智能系统，主要赢在边界明确的计算速度和精度上，对于相对开放环境下的博弈或对抗则在封闭环境下表现得那么好，甚至会很不好。真正的智能不仅仅是适应性，更重要的是不适应性，进而创造出一种新的可能性，智能很可能不是简单地顺应、适应，更重要的是不顺应、不适应，进而创造出一系列新的可能性：自由、同化、丰富、改变、独立。图灵机的缺点是只有刺激一反应而没有选择，只有顺应而没有同化机制。

世界是由联系构成的还是由属性构成的？这是一个值得思考的问题。应该是由两者共同构成的吧！《道德经》第四十章中说“反者道之动；弱者道之用。天下万物生于有，有生于无”，这一句话正是这种思想的集中体现，这里说到“反者”相对于“正者”，也有“往返”的意思；而“弱者”是相对于“强者”，有了反者才有正者，这叫作阴阳。反者道之动，在这里用一句非常讲究的话来说明“道”，就是“一阴一阳之谓道”。弱者，强者都是阴阳。有了阴阳道才能动，才有相互作用。

信息化本质是计算事实，智能化则是认知价值。从数据到信息到知识（结构）是认知计算，从知识到信息到数据（解构）是计算认知。若把智能看成语言，那么人工智能像是语法，人类智能更像是语义、语用。语法基于规则、统计和概率，而语义语用则是基于一种人们之间使用有意义元素组成的约定，潜意识里的约定俗成比语法更为跨界、灵活，而且人们目前对它的规律还未形成有效的规则认知，于是它便成了复杂性事物。符号化是规范性语法的表征，情境化是自然性语义的依据。个境与群境有还原成分，也有新异元素，理解智能的难点之一就是内外一多共存的交织干扰和影响。把任何时间、地点、信息送给任何人转变为在恰

当的时间、地点、方式信息送到恰当的人手里就是智能的表现形式之一。在全局，人是机的升维，机是人的降维；在局部，则反之。因为全局涉及的是异构事物、非家族相似性；而则局部相反。对人类智能系统而言，围棋的作用还仅仅是局部的局部。

人工智能的最底层技术是二极管的0、1二元逻辑，人类智能的最底层技术是人的多元意向（非逻辑）。人类智能则是艺术，人工智能主要是技术。人工智能就是一个工具，很多人却把它当成了万能的钥匙，更有人把它想象成了无所不能的孙悟空和圣诞老人，而忽略了人的智慧的作用。人类智能是一种涉及感性（尤其是勇敢）更多的智能，在紧急态势迅速变化时，一个人由情感而非思维支配，因而理智需要唤起勇气素质，继而在行动中支撑和维持必要的理智，在人类智能中，我们往往可以看到有序/无序之间的创造性张力，如在很多情境下，你所看到的同一事物（如苹果或1小时）往往不同，主动看、被动看、半主动看都不一样。人工智能常常容易形成的偏见，从规则的知识图谱中提取出先验和常识，并将之作为约束条件引入生成模型，可能会让智能程序的运行大打折扣，所以，如何把人的模糊感知、识别与机器的精确感知、识别结合将是一个非常值得思考的问题。

1、人机认知不一致性问题

人机智能难于融合的主要原因就在于时空和认知的不一致性。人处理的信息与知识能够变异，其表征的一个事物、事实既是本身同时又是其他事物、事实，一直具有相对性，而机器处理的数据标识缺乏这种相对变化性。更重要的是人对时间、空间的认知是具有意向性的，是具有主观期望的（should），而机器对时间、空间的认知是偏向形式化的，是客观存在的（being）。二者不在同一维度上，所以具有很强的不一致性。人的认知是侧重于心理层面的，是主观的，而机器的认知是偏向于物理层面的，是客观的。在认知方面，人的学习、推理和判断随机应变，时变法亦变，事变法亦变，而机器的学习、推理和判断机制是特定的设计者为特定的时空任务拟定或选取的，和当前时空任务里的使用者意图常常不完全一致，可变性较差。这种不一致性既包括人的主观预期与机器的客观数据反馈的不一致性，也包括人的主观预期与客观事实的不一致性。

许多事物表面上看是非逻辑的问题，如以弱胜强的许多案例，其实从实质上看是逻辑问题，这些以弱胜强里的弱是相对的，在局部却经常以强胜弱，所以非逻辑里包含着许多逻辑关系。同样，

不少逻辑问题里也存在着非逻辑问题，如顺理不成章的一些案例，表面上顺理，实际上这些理是变理，是不完备的道理，是有前提边界条件约束的，当这些诸多前提边界条件约束发生一些微小改变时，自然就成不了章了。由此可见，逻辑与非逻辑共存于事物之中，也是有序与无序的根源，其中的交互与组织就是人机融合智能研究重点，也是人机融合智能的难点。

人机融合的另一关键问题是公理与非公理混合推理的融合，直觉与理性结合的决策。公理是数学发展史中的理论基础，而在科学研究过程中逻辑推导是最为核心的方法。同样，计算机的运行过程依旧是按照严密的算法语言运行的。但是人类的决策不同于这个过程，人类的联想能力还依赖于类比推理。类比推理为非公理推理的一部分，非公理推理决定了在弱态势情况下的强感知问题。这种学习方法依赖于先验知识，通过利用大数据与概率的方法实现，而实现机器的非公理推理是人与机器的区别之一，更是人的情感在机器上实现的重要途径。通过先验知识人类产生直觉，而理性的分析是直觉的对立面。机器总是在理性地处理数据，而如何让机器产生直觉能力是人机融合的平滑性的关键。公理与非公理推理，直觉与理性的结合决策将是解决人机融

合智能输出的重要研究方向。

2、意向性与形式化问题

英国的计算机科学家、人工智能哲学家玛格丽特·博登，她很早就提出了人工智能的核心和瓶颈在于意向性与形式化的有机结合，时至今日仍未有突破，实际上这也是人机融合智能的困难之处。在目前投入应用的人机融合产品中，人与机器分工明确，但并未有机地结合。人类能够在环境信息、资源不完备的情况下对态势的发展做出更好的预测，这是因为人类在后天的学习中可以不断地增强自身的认知能力。机器不具有联想能力，而人类恰恰可以通过联想产生跨领域结合的能力。所以怎样使机器产生联想能力是实现真正智能的关键所在。

意向性是对内在的感知的描述（心理过程、目的、期望），形式化是对外在的感知的描述（物理机理、反馈）。人机融合智能及深度态势感知就是意向性与形式化的综合。形式化更多的是倾向于让人们对事物有一个直观的空间上的认知，而把这种空间上的认知延伸到时间上描述，就是意向性。形式化是态，那么意向性就是势。人机融合就是要形成一个对内在外在、主观客观、认知与行为上的感知的整体描述，形成一个可以描述人的心理过程、目的、期望以及机器的物

理机理、反馈的模型。当前智能领域面临的困难是人的意向性与行为的差异程度，行为可以客观形式化，而意向性是主观隐性化的，一个智能系统想要形成和存在，其内部的构件在本性或运行规律上就必须拥有既相互吸引又相互排斥、既靠拢又闪避、既结合又分离、既统合又脱节的能力。人机融合智能中意向性是联结事实与价值的桥梁，形式化可以某种程度地实现这种意向性。

3、休谟之间的伦理问题

人机融合智能的最后一个关键问题是伦理问题。人类价值观的起源是伦理学。人类本身拥有很多伦理道德困境，人工智能的出现也带给了人类对待人工智能伦理问题的思考。与此同时，人机融合只能伦理问题的关键之一是人机融合智能的范畴归属。人机融合智能的伦理问题包括人工智能的伦理以及人机融合后的责任归属，这也是人机融合智能在接下来发展的问题之重。

“休谟问题”说的是从事实推不出价值来，可是，这个世界却是一个事实与价值混合的世界，不知从价值能推出事实吗？汉字就是智能的集中体现，有形有意，如日月人，一目了然；西方的文字常常无形无意，逻辑类推。智能的本质就是把意向性与形式化统一起来，所以汉字从

象形到会意的过程就是人类自然智能的发展简史……汉字的偏旁部首就是一种类的封装，把强相关的字聚在一起。如果说人类造字是语言表征的封装积累，那么，人类造智则是思想意识的拓扑延展。智能不是百科全书，而是包含不少的虚构和想象，不仅是分类，还要合类，不仅合并同类项，而且要合并异类项，因而，智能产品系统的顶层设计非常重要。人工智能一般是逻辑（家族相似性）关系，人类智慧常常是非逻辑（非家族相似性）的。未来的智能是在特定环境下人的智能与机器智能的融合，即人机融合智能。人机融合智能不是人工智能，更不是机器学习算法。同样，人工智能、机器学习算法也不是人机融合智能，人机融合智能是人机环境的相互融合，是《易经》中的知几（看到苗头）、趣时（抓住时机）、变通（随机应）。人机融合智能是随动，不是既定，其中的“知己知彼”中的“知”不是简单的态势“感知”，更是态势“认知”。认知是从势到态的过程，感知是从态到势的过程。认知侧重认，信息输入处理输出流动过程；感知侧重感，数据信息的输入过滤过程，认知涉及先验和经验等过去的感知，所以态势认知包括了以前的态势感知。人工智能是一把双刃剑，计算越精细准确，危险越大，因为坏人可以隐真示假，进行欺骗，所以

人机有机融合的智能更重要。客观而言，当前的人工智能基本上就是自动化+统计概率，简单地说，归纳演绎的缺点就是用不完备性解释完备性。

毕加索曾透露：“绘画不是一个美学过程，而是……一种魔法，一种获取权力的方式，它凌驾于我们的恐惧与欲望之上。”看懂了毕加索的作品，就能理解毕加索想要表达的“魔法”，并且把它化用到生活中的其他领域，尤其是智能领域和人机融合智能领域。

需要注意的是，休谟问题至今尚未真正得到解决。正因为“价值”是相对的，因人而异的，所以这一问题也永远不可能真正得到解决，这一点已经在上一节中做出了论述。唯物主义者虽然想把唯物主义贯彻到精神领域，但这是永远也不可能做到的。因为精神和物质，在本质上是完全不同的东西，一个是主观，一个是客观。就如同怀疑论者经常使用的“桶中脑实验”（英国哲学家普南提出，有的版本也翻译为“缸中脑”）描述的那样，我们对于这个世界的认识，其实完全只是一种主观的判断，这种判断和真实的“客观世界”是否一致，我们永远也不可能知道。虽然某些唯物主义者总喜欢用“无数次的实践”来证明主观与客观理论上最终能达到这种一致性，但实际上，“无数次的实践”是不可能做到的。所以说这只是一空想罢了。

三、人机融合智能的难点：深度态势感知研究

态势感知的定义不在此赘述。态势感知(situation awareness)一词最早于第一次世界大战中提出，之后在心理学领域中作为“情境意识”被广泛应用，直到1988年 Endsley 对态势感知的重新定义，以及其在1995年提出的著名的态势感知三级模型，标志着将态势感知迁移到了工程学领域中，再到2003年 Wickens 提出的基于注意力的态势感知模型(A-SA模型, Attention-Situation Awareness Model)以及 Hooey 于2010年将态势元素(Situation Element)引入态势感知研究中，标志着态势感知研究由主观数据驱动到客观数据驱动，由定性分析到定量分析的过渡。近年来，随着人工智能相关技术的迅猛发展，网络态势感知(Cyber Situation Awareness)成为了网络安全领域的研究热点。态势感知似乎成为了一种研究方法(method)，而不是一个可以指导人们认识世界、改造世界的方法论(Methodology)。当前的态势感知理论技术仍然存在很多不足，主要是未将人的心理活动过程与机器的外在表现形式以及环境中的态势要素有机地结合。

鉴于此，本文尝试提出了深度态势感知这个概念，具体说明如下：深度态势感知的含义是“对态势感知的感知，是一种人机智慧，既包括了人的智慧，也融合了机器的智能(人工智能)”，是能指+所指，既涉及事物的属性(能指、感觉)又关联它们之间的关系(所指、知觉)，既能够理解弦外之音，也能够明白言外之意。它是在 Endsley 以主体态势感知(包括信息输入、处理、输出环节)的基础上，对包括人、机(物)、环境(自然、社会)及其相互关系的整体系统趋势分析，具有“软/硬”两种调节反馈机制；既包括自组织、自适应，也包括他组织、互适应；既包括局部的定量计算预测，也包括全局的定性计算评估，是一种具有自主、自动弥聚效应的信息修正、补偿的期望—选择—预测—控制体系。

在维纳出版的著作《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》中，维纳将控制论看作是对机器、生命以及社会的规律进行研究的科学，是研究个体(可能是生物，也可能是机器)在动态环境中怎样保持稳态的过程的科学，控制论的思想和方法对社会科学与自然科学领域的研究产生了深远的影响。在《控制论》一书中，维纳提出“控制的核心是反馈，反馈是人们的目的性行为”。然而，控制论在揭

示机器的自然存在时不仅完全屏蔽了社会巨型机——它本身不过是其中的一个时段和一个成分，而且还完全屏蔽了组织生成性这个关键问题，而生成性则是除人造机之外一切物理、生物和社会机器所固有的禀性。

事实上，把生命体特有的“目的性行为”概念用“反馈”这种概念代替，把按照反馈原理设计成的机器的工作行为看成为目的性行为，并未突破生命体（人）与非生命体（机器）之间的概念隔阂。原因很简单，人的“目的性行为”分为简单显性和复杂隐性两种，简单显性的“目的性行为”可以与非生命体机器的“反馈”近似等价（刺激—反应），但复杂隐性的“目的性行为”——意向性却远远不能用“反馈”近似替代，因为这种意向性可以延时、增减、弥聚，用“反思”定义比较准确，但“反思”概念却很难用非生命体的机器赋予（刺激—选择—反应）。“反思”的目的性可用主观的价值性表征，这将成为人机融合的又一关键之处。价值将由吸引子和动机共同构成。反思是一种非生产性的反馈，或者说是一种有组织性的反馈。自主是有组织的适应性，或被组织的适应性。据此我们将 Endsley 态势感知三级模型和维纳的“反馈”思想结合，提出了一个基于“反馈”的深度态势感知模型，如图 1 所示。

深度态势感知理论模型在不同情境下处理信息的方式会有所区别，并且以往关于态势感知的研究都充分说明了态势感知具有实时性，即态势感知会随时间而不停地更新、迭代。所以我们尝试着对态势感知进行细化，并提出了一个基于循环神经网络（RNN）的深度态势感知理论框架，

如图 2 所示。

我们将态势感知中的“态”定义为人机环境系统中的各类表征个体状态的主客观数据，即 state；“势”定义为事件的发展趋势，即 trend；“感”定义为对系统中“态”的觉察，即 sense；“知”定义为对“势”的理解。该理论框架就是为了辅

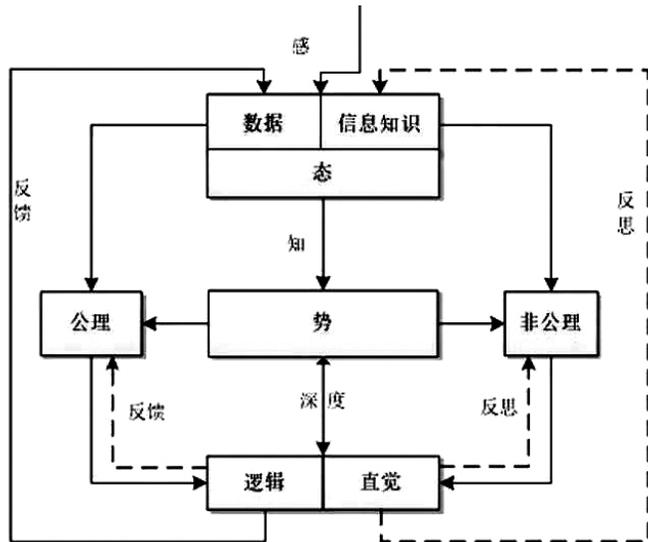


图 1 基于“反馈”的深度态势感知模型

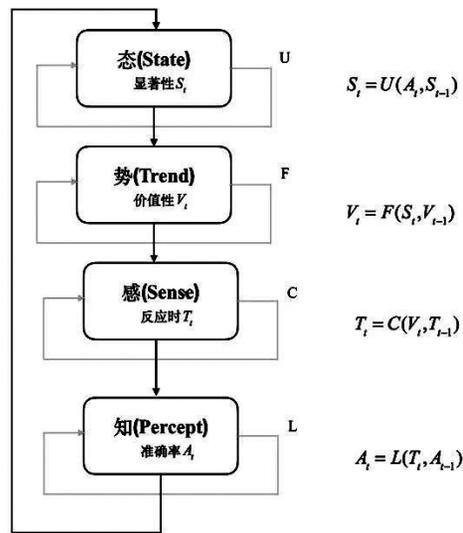


图 2 基于 RNN 的深度态势感知理论框架

助人们更好地“感态”、“知势”。而为了获取数据必然要引入客观数据，根据之前的研究，我们可以将态形式化为显著性，势形式化为价值性，感为反应时，知为准确率。感态着重于时效性，而知势更倾向于有效性。

“我思故我在”，这是笛卡尔二元认知论的起点，也是终点，即唯一确定的事，就是“我”的体验。根据认知科学的解释，由于在大多数情况下人的认知能力是有限的，所以最优化是无法实现的。参与人还必须了解他的目标方程，这就要求另一个庞大的认知性先决条件，如同参与人发现他们所处的环境一样，系统地描述这一目标方程是极其复杂的。知己知彼不可分，不知彼就不能知己，任何事物本身不能解释自己，只有从其它参照物处才能感知、理解、发现、说明、定义自己（我是谁，我从哪里来，我要去哪），进而可以认为：自我是不存在的，没有环境和参照物，自己解释不了自己，如同“我”的概念定义不能为“我就是我”一样。再进一步，自我意识也可能是不存在的，它也是交互的产物，只不过可以穿越时空逻辑关系罢了。实际上，所有的自主系统都是不由自主，只不过显隐程度不同而已。之后笛卡尔将自己的哲学观点形式化为著名的二元直角坐标系。

鉴于笛卡尔的观点，深度态

势感知虚实参照系可分为人机不同的态（事物）参照系、势（事实）参照系、感（显著）参照系、知（价值）参照系，当这些虚实参照系大部分一致，亦或没有本质的矛盾时，才有可能产生正确的觉察和决策行为。

只有在把一物与它物区分开来，才会对该物有了认知。只有把一个人的知识或信仰状态与他人的区分开来，才会对一个人有所了解。哲学上最难，也是最重要的任务之一，就是明确世界的两类特征，即那些独立于任何观察者而存在的内在特征和那些相对于观察者或使用者的外在于特征。例如一个物体有质量（无论对谁而言）与这个物体是浴缸（也可是水缸、饰缸、粮缸）。所以对深度态势感知系统研究的下一步工作，就是将其具体应用到某一或某些情境中，检验其有效性和可靠性。

四、结束语

也许很多人看过《黑客帝国》这部有关人工智能的科幻电影，其英文名称为“Matrix”，即“矩阵”。的确，现在的人工智能相关技术（大数据、机器学习、深度学习等）是以矩阵论、概率论等数学理论为基础发展而来的，并且为人们生产生活提供了便利，甚至一定程度上带动了社会变革。人工智能所取得的成就得益于自17世纪以来

400年间人们对数学的不懈追求，但现今人工智能所忽视的，也可能是帮助人们突破当今人工智能瓶颈的，恰恰是几千年来人们对世界的认知以及对自我反思的研究。所以如何将自然科学与社会科学有机地结合，是下一代人工智能技术的研究重点。

人造的机器有存在但没有自我。自我诞生于对自身存在的经常性的交互、组织和产生。产生不出主动性的交互和组织，就不是自主，就没有自我，没有自我，就不可能出现感己与感彼、知己与知彼，感性就联系不上理性，客观就不能形成主观，事实就不能衍生出价值。智能，尽管是一种复杂系统问题，涉及面极广，本质上仍就是主观与客观、感性与理性、意向性与形式化的对立统一（人机环境）系统而已。其核心价值依旧离不开基础理论的突破，而不是数据、算法、算力和实验。人机融合，不仅仅是造出更高级的机器、设计出更好的算法、获得多么大的数据，而是人自身知性的改造，即思维逻辑的改造、重塑与变革。

在浩瀚的宇宙中，人类渺小得不过沧海一粟，就像巨大矩阵中的一个元素。人工智能未来的极限在哪里，人机融合智能是否能让机器突破自我认知这一瓶颈，一切都无从知晓。“It's too early to tell”，下结论为时尚早。MT

中国机械工程学会科技经济融合系列活动 在天津（滨海）举行

8月17-20日，由中国机械工程学会牵头，联合12家全国学会组成的科技服务团组在天津（滨海）举行科技经济融合系列活动。中国科协党组成员、书记处书记束为，天津市委常委、滨海新区区委书记连茂君，中国机械工程学会副理事长、中国工程院院士陈学东，中国机械工程学

会副理事长兼秘书长陆大明、天津市科协党组书记、常务副主席陆为民，由相关全国学会组建的“科创中国”天津（滨海）科技服务团专家学者、“科创中国”试点城市建设北京天津工作组成员及天津滨海新区发改委、科技局、工信局、科协等相关部门代表出席和参与本次系列活动。

本次科技经济融合系列活动由服务团专家分组进驻企业调研对接、天津市滨海新区“科创中国”试点城市建设启动会、科技经济融合专家座谈会等组成。

活动启动仪式上，束为代表中国科协致辞，向活动的开展表示热烈的祝贺，并向中国机械工程学会副理事长陈学东院士授予“科创中国”天津（滨海）科技服务团团旗，连茂君宣布天津市滨海新区“科创中国”试点城市建设启动。

经过会前精心准备和多次对接，在签约环节7个合作项目达成签约：中国科协科技传播中心与中国电子信息产业集团；中国机械工程学会与天津滨海高新区；中国机械工程学会与天津金桥巴顿焊接研究院；中国汽车工程学会与经开区汽车产业促进局；中国造船工程学会、中国可再生能源学会与天津力神公司；中国金属学会与新天钢集团；天



座谈会现场



中国科协党组成员、书记处书记束为致辞



束为书记向陈学东院士授予“科创中国”天津（滨海）科技服务团团旗

天津市科协、天津市高企协、滨海新区民营企业科协、滨海企业家俱乐部等分别签署合作协议。协议的签订将为后续全面落实服务天津市“科创中国”试点城市建设奠定坚实基础。

中国机械工程学会副理事长陈学东院士做了《我国智能制造发展现状与相关建议》的专题报告，报告指出，到2035年新一代智能制造将演进到智能化、网络化、数字化的阶段，这是智能制造的真正含义。我国智能制造

的发展路线是“并行推进、融合发展”，为此已经推出了智能制造十大优先行动，科技部也已对智能制造布局了重点项目。天津市是我国高端装备制造重要的工业基地，产业集中度高，拥有一大批基础较好的重点项目可以率先实施智能制造转型升级，未来15年是我国制造业实现由大到强的关键时期，为推动智能制造产业快速发展，陈院士提出以下建议：一是要加强智能制造相关基础设施建设；二是注重智能制造

相关产业基础，制定中长期发展专项规划；三是注重智能服务技术研究，涵盖产品全生命周期过程；四是注重对智能制造中小企业的支持，此外还要注重试验平台建设、标准体系建设、队伍建设等。

束为书记在讲话中指出，中国科协推出“科创中国”品牌，期望通过供需匹配，让科学家找到企业家，让企业家找到科学家，打造数字化技术服务和交易平台、构建试点城市网络、建设



项目签约



中国机械工程学会副理事长陈学东院士做报告



中国机械工程学会副理事长兼秘书长陆大明发言



专家在企业调研对接

新型创新组织、培育融通的创新生态，推动科技经济深度融合，服务地方经济发展。滨海新区是“科创中国”首批试点城市。中国科协将进一步发挥科协组织优势，聚焦新区重点发展领域，树立“科创中国”服务品牌，导入“科创中国”创新资源，深入开展科技志愿服务，发挥科技创新高端智库作用，全力支持滨海新区打造“科创中国”试点城市，形成科技经济融合高质量发展的样板间。

连茂君在座谈中提出，滨海新区将以“科创中国”试点城市建设为契机，坚守促进科技和经济有机协同、深度融合宗旨，完善科技经济融合发展机制，建立长效推进机制，努力实现新时代高质量发展。

此外，中国机械工程学会副理事长兼秘书长陆大明代表牵头学会在会上重点发言，表示学会将继续整合优质资源，为天津市滨海新区装备制造业高质量发展贡献力量。中国科协科技传播中

心陈锐介绍了“科创中国”工作背景及挂点工作组有关情况，全国学会负责人围绕科技服务团赋能滨海新区科技企业分别发言。

从8月17日开始，中国机械工程学会陆续组织全国各地专家20余人，分组进驻天津滨海新区重点企业开展对接服务，涵盖机械设计、焊接技术、绿色制造与环境保护、增材制造等多个技术领域。后续根据天津市滨海新区的需求，还将开展多次对接服务。MT

发挥组织优势 细化工作举措 努力完成全年目标任务 ——中国机械工程学会 2020 年第二次总干事秘书长会议在天津召开

2020 年 8 月 18-20 日，中国机械工程学会在天津召开 2020 年第二次总干事秘书长会议。中国机械工程学会副理事长兼秘书长陆大明出席会议。天津市科协党组书记、常务副主席陆为民到会并致辞。中国机械工程学会副秘书长陈超志、邢梅、左晓卫，中国机械工程学会 37 个专业分会的总干事、22 个省区市机械工程学会的秘书长，《机械工程学

报》和《中国机械工程》主编，以及工作总部相关工作人员共计 100 余位代表参加了本次会议。

陆为民书记在致辞中表示，本次会议，全国各地学会同仁汇聚津门，学习贯彻习近平总书记关于科技工作和群团工作的重要指示精神，共商学会改革创新大计，必将对学会事业发展与机械工程学科建设产生积极的推动作用，今后双方将按照中国科协“一

体两翼”布局，加强交流合作，把全国学会的人才智力优势与地方生产科研一线的实际需求紧密结合，为科技事业和科技团体繁荣发展注入不竭的动力。希望在天津市科协和中国机械工程学会牵头 12 家全国学会组建的“科创中国”天津（滨海）科技服务团的共同努力下，“科创中国”能够在天津落地生根，为天津引育新动能、构建新优势、实现高



会议合影



天津市科协党组书记、常务副主席陆为民致辞



《习近平谈治国理政》（第三卷）专题党课



陆大明秘书长做主题报告

质量发展做出积极贡献。

按照学会理事会党委本年度党建工作的统一部署，本次会议专门安排了《习近平谈治国理政》（第三卷）专题党课学习。陆大明秘书长在讲课中，首先传达了党中央以及主管部门关于认真学习《习近平谈治国理政》（第三卷）的通知精神，要求学会系统广大党员干部一定要把学习作为重大政治任务，按照党中央明确提出的“一个坚持“、”三个紧密结合“等学习要求，采取自学和集中学习相结合的方式读原著、学原文、悟原理；接着介绍了全书的收录范围、主要内容和重要意义；最后，结合学会实际情况，

带领大家就“增强忧患意识，防范化解风险挑战”这一专题内容做了详细学习，强调学会所有工作人员要深刻认识和准确把握外部环境的深刻变化和我国改革发展稳定面临的新情况、新问题、新挑战，坚持底线思维，增强忧患意识，提高防控能力，着力防范化解重大风险。面对新时代、新形势、新任务，不能以老一套工作模式来应对，要全面深入去研究问题，看清问题实质，理清工作思路，有效解决矛盾，要加强学习，加强实践，勇于创新，在守土中履责、在守土中负责，在守土中尽责。

会议主题报告阶段，陆大明

秘书长做了题为“发挥组织优势 细化工作举措 努力完成全年目标任务”的工作报告，详细解读了学会今年6月份发布的《中国机械工程学会分支机构合法合规性管理负面清单（2020年版）》，简要汇报了上半年学会各项工作进展情况，着重强调了下半年“会员发展指标的落地”、“分支机构的科学管理”、“一体两翼布局的构建”等三个方面的工作举措。

会议分组讨论阶段，铸造分会苏仕方总干事、焊接分会何实总干事主持了专业分会组的讨论会，参会的各分会代表围绕会员发展和服务、分支机构科学管理、



专业分会组讨论



省区市学会组讨论



2019 年度优秀专业分会



2019 年度先进专业分会



2019 年度优秀省区市学会



2019 年度先进省区市学会



2019 年度最具影响力学术活动



2019 年会员日优秀组织单位



参观华海清科股份有限公司

信息化和宣传工作、评比达标表彰工作开展等问题发表了意见和建议。山东机械工程学会理事长林江海、福建机械工程学会秘书长黄辉主持了省区市学会组的讨论会，参会的各省区市学会代表介绍了各地方学会的工作经验，对会员发展和共享、全国学会和地方学会间密切合作问题提出了各自的看法。

会议总结阶段，何实总干事、黄辉秘书长分别就各组讨论情况做了汇报，肯定了本次会议对学会工作的意义，总结了分会和省区市学会提出的共性问题和建议，表达了坚决完成学会下半年工作任务的决心，提出了下一步的工作想法。

陆大明秘书长在总结发言中指出，本次会议交流充分、讨论深入、效果良好，对学会目前工作中遇到的问题、疑惑、困难等形成了基本共识。会议提出的“共

建新时代学会的新文化”的理念，是为了让大家共同营造中国机械工程学会在新时代崭新的文化。在风险识别、风险防控方面，希望专业分会和省区市学会能够深入领会会议有关精神，不要再用原有的眼光和思维去应对现在的问题，要警惕学会工作可能遇到的“黑天鹅”、“灰犀牛”事件，要对照民政部等主管部门的要求把相关管理跟上去。在“一体两翼”建设方面，要进一步加强沟通、加强协作，改进工作模式，一是发挥工作总部在沟通协调中的作用，通过设立具体项目把大家联系起来，二是建议每年在年中和年底或年初召开两次总干事秘书长会议，以利于及时对工作中遇到的问题做出调整，进而保证学会工作有序进行。在具体工作方面，希望各专业分会和省区市学会下半年要尽最大努力完成会员发展年度目标。会上提出的

会员入会手续、信息化、财务管理等方面的具体问题，工作总部会后要尽快研究解决。工作总部、专业分会和省区市学会要真正把中国科协提倡的“科普中国”、“科创中国”的战略性任务落到实处，为机械行业发展贡献学会的力量。

会议期间举行了中国机械工程学会2019年度相关工作的表彰仪式，分别向获得优秀/先进专业分会、优秀/先进省区市学会，2019年度最具影响力学术活动，2019年中国机械工程学会会员日优秀组织单位颁发了奖牌和证书。

会议研讨结束后，应天津华海清科股份有限公司的邀请，部分代表参观了该公司CMP设备调试车间和展厅，与公司董事长兼首席科学家路新春教授就芯片生产相关情况进行了交流。MT

BEW2021



第25届北京·埃森焊接与切割展览会

THE 25th BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING FAIR



2021年6月16-19日
上海新国际博览中心

Shanghai New International Expo Center
June 16-19, 2021



微信二维码



www.beijing-essen-welding.com

www.埃森焊接展.com