



工业4.0与数字孪生

制造业如虎添翼

德勤咨询有限公司的供应链与制造运营业务组助力企业了解并把握机遇，运用工业4.0技术，建立数字化供应网络，进而实现企业战略目标。我们拥有增材制造、物联网和数据分析方面的精深洞见，能够协助企业重新评估人才、流程和技术，以适应先进制造实践日新月异的变化发展。

目录

前言		2
数字孪生：定义与价值		3
创建数字孪生		6
提升商业价值		9
如何着手部署		11
结语		13
尾注		14

前言

生产流程数字化趋势日益明显，已是大势所趋。受此趋势影响，大量企业努力寻求有效策略，以期从运营和战略层面推动实际价值的创造。

数字化解决方案的确能够为企业带来巨大价值，达到互联智能技术出现前无法企及的水平。数字孪生是近期的热门概念：物理实体或流程的准实时数字化镜像，有助于企业实现绩效提升。

直至今日，由于数字技术能力有限，且计算、存储和宽带成本过于高昂，数字孪生及其海量数据处理对于多数企业来说仍是一个难以掌控的领域。但近年来，这些不利因素已大大减少。¹成本的大幅降低和能力的显著提升引发了巨大变化。企业领导人得以综合信息技术和运营技术，创建和利用数字孪生。²

数字孪生为何如此重要？企业为何应当考虑采用该技术？利用数字孪生，企业能够自设计和开发阶段起，以数字化的形式完整记录整个产品生命周期。企业因此不仅可以了解产品设计，还能了解产品的生产系统和实际应用情况。创建数字孪生有助于企业加快新品上市速度，优化运营，改善不足，开发新的经营模式，进而提高收益。

数字孪生能够让企业更加快捷地检测和解决实际问题，提高预测精准度，设计和生产出更加优质的产品，并最终更好地服务客户。有了这种智能架构设计，企业能够以更快的速度不断创造价值和收益。

一家企业很难在创建数字孪生过程中同时覆盖以上所有领域。创建数字孪生的关键在于先从某一领域入手，在该领域创造价值后再继续推广到其他领域。但在此之前，企业首先应当了解数字孪生的定义和创建方式，以免在创建数字孪生的过程中不知所措。我们将在下文对数字孪生进行探讨，包括其定义、创建方式、如何驱动价值创造、典型的实际应用以及企业如何为数字孪生规划做好相关准备。

数字孪生

定义与价值

数字孪生在业界和学术界有多种不同的定义。但业界和学术界均未对数字孪生的流程层面给予足够重视。部分定义认为，数字孪生是一件成品的综合模型，可反映产品的所有生产缺陷；同时该模型还将随着产品的使用持续更新，反映产品的消耗磨损情况。³其他一些广泛采用的定义认为，数字孪生是基于传感器所建立的某一物理实体的数字化模型，可模拟现实世界中的具体事物。⁴

从根本上讲，数字孪生是以数字化的形式对某一物理实体过去和目前的行为或流程进行动态呈现，有助于提升企业绩效。数字孪生以针对众多层面持续、实时开展的大量物理世界数据检测为基础。该等检测可通过数字化的形式对某一物理实体或流程进行动态呈现，从而有效反映系统运行情况。企业可根据所获得的信息采取实际行动，例如调整产品设计或生产流程。

数字孪生不同于传统的计算机辅助设计（CAD），也并非另一种以传感器为基础的物联网解决方案。⁵数字孪生的功能远高于这两者。计算机辅助设计完全局限于计算机模拟的环境中，在复杂环境建模方面取得了一定成效；⁶物联网系统的功能比数字孪生简单，可用于位置检测和整个组件的诊断，但无法对不同组件间的相互作用和整个生命周期过程进行检测。⁷

数字孪生的真正功能在于能够在物理世界和数字世界之间全面建立准实时联系，这也是该技术的价值所在。基于产品或流程现实情况与虚拟情况之间的交互，数字孪生能够创造更加丰富的模型，从而对不可预测的情况进行更加真实和全面的检测。随着计算能力的提升和成本的降低，如今我们可采用大量的处理架构和先进的算法分析该等交互式检测结果，进而获得实时预测反馈，并开展离线分析。数字孪生的上述功能将引发设计和流程的根本性变革，这是目前的方法几乎无法实现的。

数字孪生应用于生产流程

数字孪生主要用于复杂资产或流程建模。复杂资产或流程会与周围的环境发生不同形式的交互作用，因此很难在整个产品生命周期内开展结果预测。⁸数字孪生的创建可结合各种不同的实际情况，以实现不同目的。例如，数字孪生有时会用于模拟喷气式发动机和大型矿用卡车等复杂部署资产，以监测和评估资产使用过程中的磨损和压力承受情况。该类数字孪生应用所产生的重要信息将影响未来的资产设计。风电场可通过数字孪生了解运营效率低下的原因。除此之外还存在大量其他与部署资产相关的数字孪生应用情况。⁹

从根本上讲，数字孪生是以数字化的形式对某一物理实体过去和目前的行为或流程进行动态呈现，有助于提升企业绩效。

将数字孪生应用于部署资产能够提供深刻洞见，而将数字孪生应用于生产流程则能够产生功能强大的应用程序。图1呈现了物理世界中某一生产流程的模型，及其在数字世界中的数字化镜像。数字孪生是对工厂环境中实际情况的准实时虚拟复制。实际生产流程中部署了数以千计的传感器，共同收集各个不同层面的数据，包括生产机械的行为特征、半成品（厚度、颜色质地、硬度、转矩、速度等）以及工厂内部的环境状况等。该等数据不断传输至数字孪生应用程序，并由该程序完成数据聚合。

数据孪生应用程序持续分析所输入的数据流。一段时间过后，该等数据分析可通过与一系列正常运行情况的对比，识别实际生产流程在哪些层面存在异常情况。企业可根据此类对比分析结果展开调查，并对实际生产流程进行一定改革。

这就是图1力图呈现的物理世界与数字世界的交互作用。这一过程体现了数字孪生所具备的巨大潜力：数以千计的传感器持续开展重要检测，并向数字化平台传输数据。数字化平台进而开展准实时分析，通过比较透明的形式优化运营流程。

图1的模型呈现了五大驱动要素——物理世界的传感器和促动器、集成、数据和分析，以及持续更新的数字孪生应用程序。以下是对图1这些构成要素的概括性介绍：

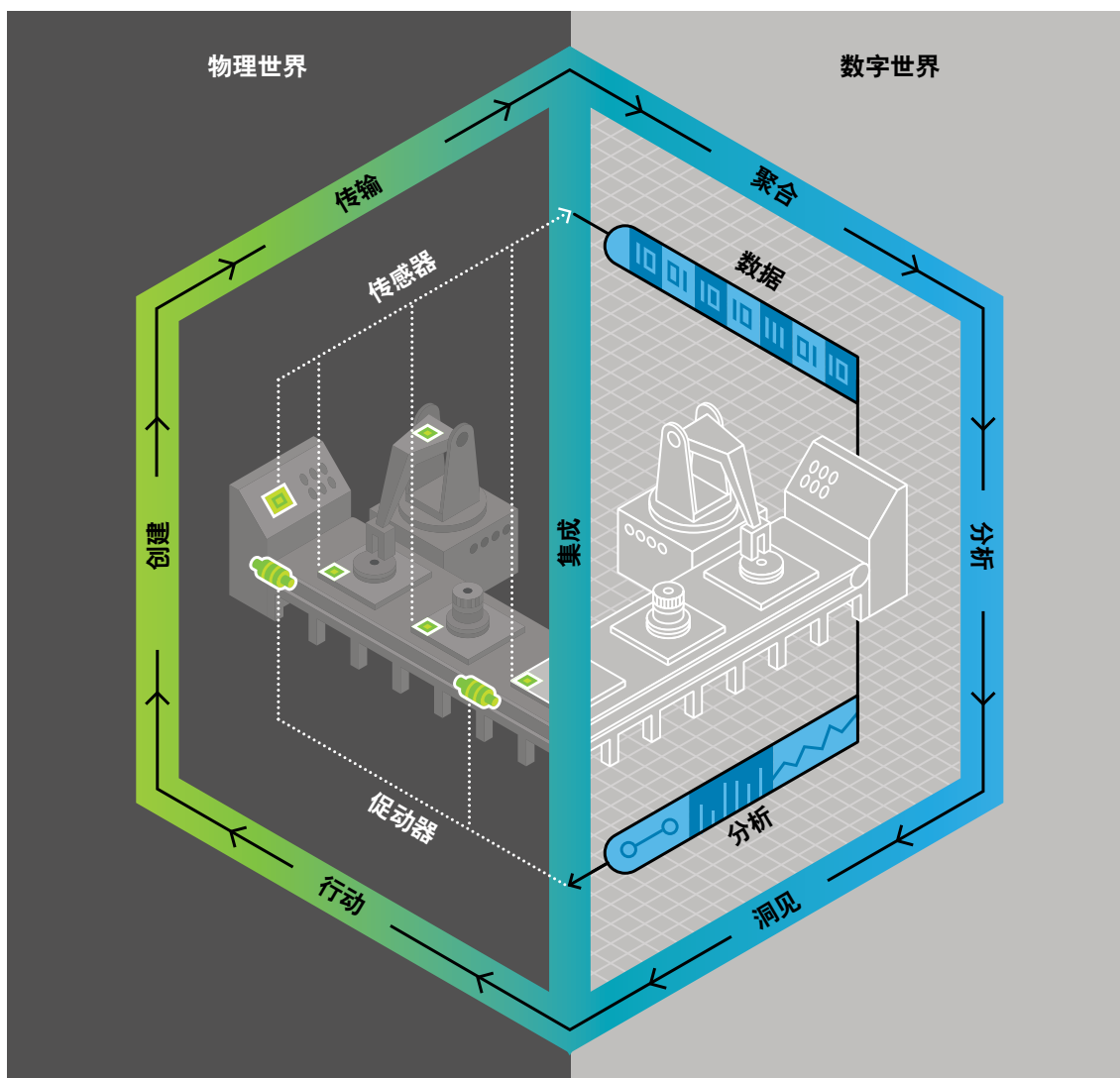
- **传感器**——生产流程中配置的传感器可发出信号，数字孪生可通过信号获取实际流程相关的运营和环境数据。

将数字孪生应用于部署资产能够提供深刻洞见，而将数字孪生应用于生产流程则能够产生功能强大的应用程序。

- **数据**——传感器提供的实际运营和环境数据将在聚合后与企业数据合并，企业数据包括物料清单¹⁰、企业系统和设计规范等。其他类型的的数据还包括工程图纸、外部数据源连接以及客户投诉记录等。
- **集成**——传感器通过集成技术（包括边缘、通信接口和安全）达成物理世界与数字世界之间的数据传输。
- **分析**——数字孪生利用分析技术开展算法模拟和可视化程序，进而分析数据，提供洞见。
- **数字孪生**——图1的“数字化”层面是指数字孪生本身。该应用程序综合以上所有要素，建立物理实体和流程的准实时数字化模型。数字孪生旨在识别不同层面偏离理想状态的异常情况。无论是数字孪生出现逻辑错误（希望不是），还是分析结果显示应削减成本、提升质量、提高效率，出现偏离情况即意味着需开展运营优化。企业将最终根据分析结果采取实际行动。
- **促动器**——若确定应当采取实际行动，则数字孪生将在人工干预的情况下通过促动器展开实际行动，推进实际流程的开展。¹¹

实际流程（或物理实体）及其数字虚拟镜像明显比简单的模型或结构要复杂得多。当然，图1的模型只是一个数字孪生结构，重点呈现产品生命周期的生产环节。¹²我们的模型旨在呈现物理世界和数字世界之间的映射所具备的集成、全面和交互特征。这一架构可帮助企业了解并着手创建数字孪生。

图1：生产流程数字孪生模型



资料来源：德勤大学出版社

德勤大学出版社 | dupress.deloitte.com

数字孪生与物理-数字-物理循环

图1的数字孪生架构呈现的是从物理世界到数字世界，再从数字世界回到物理世界的过程。这一物理-数字-物理过程或循环构成了德勤工业4.0的研究基础。工业4.0（有时也被称作“第四次工业革命”），从广义上描述了数字制造环境，先进的生产技术与物联网相结合，制造企业在实现互联互通的同时，还能开展传输和分析活动，并利用信息采取更加智能的实际行动。

欲了解更多信息，请见**德勤工业4.0领先理念系列**。

创建数字孪生

但是，如何创建数字孪生呢？总体上，数字孪生的创建包含两个主要关注领域：

1. 设计数字孪生的流程和产品信息要求——从资产的设计到资产在现实世界中的现场使用和维护；
2. 创建使能技术，整合真实资产及其数字孪生，使传感器数据与企业核心系统中的运营和交易信息实现实时流动——正如概念体系架构中所阐述的。

数字孪生流程设计与信息要求

创建数字孪生，首先要进行流程设计。数字孪生建模是什么流程和集成点？应使用标准的流程设计技术来展示业务流程、流程管理人员、业务应用程序、信息以及物理资产之间如何进行交互。创建相关图表，连接生产流程与应用程序、数据需求以及创建数字孪生所需的传感器信息类型。流程设计将通过多种特性获得增强，提升成本、时间或资产效益。这些均构成数字孪生的基础假设，数字孪生的增强效能应于此开始。

数字孪生概念体系架构

数字孪生概念体系架构（图2）可视为图1制造流程数字孪生模型组成部分的扩展视图或内部视图，相同的基本原则也可应用于任何数字孪生设置。该概念性体系架构可分为更易于理解的六大步骤，如下：¹³

1. **创建**：创建步骤包括给物理过程配备大量传感器，以检测获取物理过程及其环境的关键数据。传感器检测的数据大体上可分为两类：（1）生产性资产（包括多种在建项目）的物

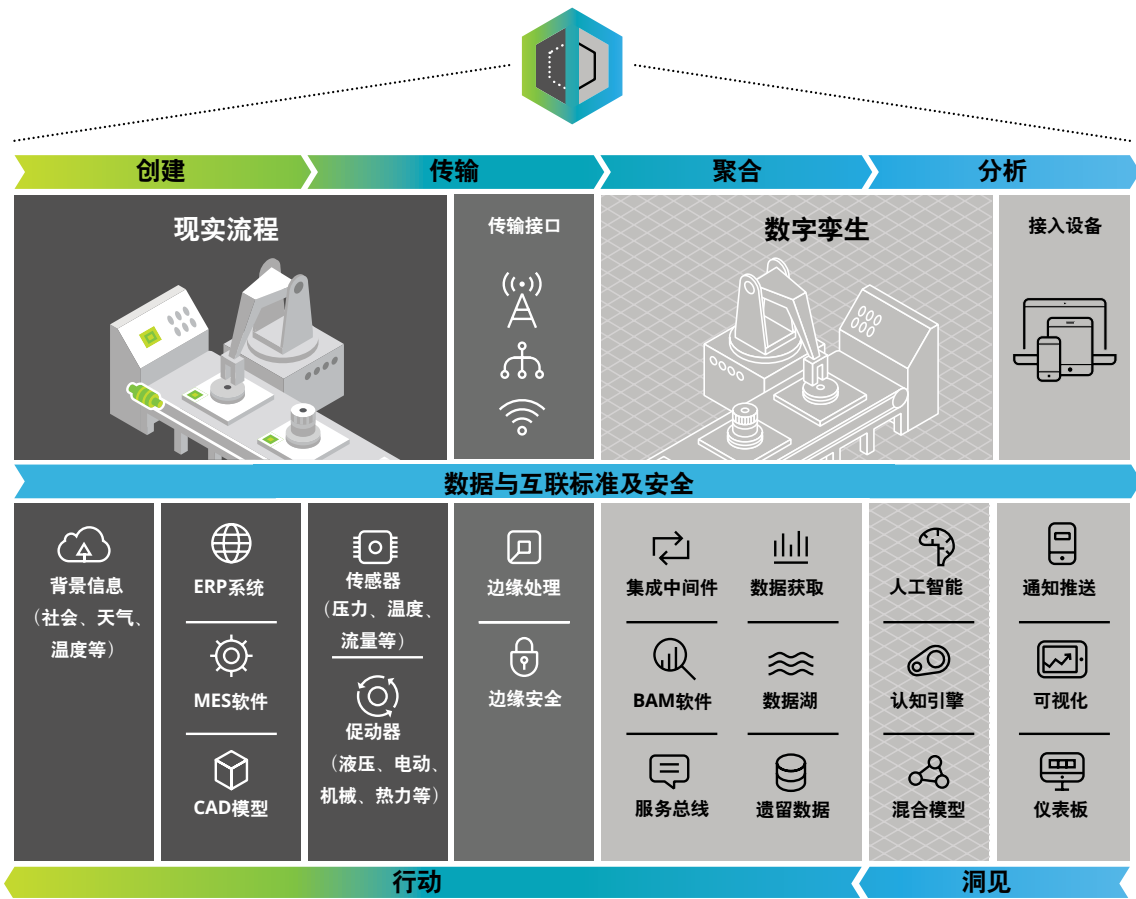
数字孪生的关键在于以相关资产整个生命周期中所需的信息类型为重。将信息以可重复使用的方式进行组织形成体系往往十分重要。为此，需要创建一个标准的数据模型。标准的数据模型具有常用的企业标准数据结构，使不同系统和应用程序之间能够互联并交换企业信息。标准结构可允许融合数字孪生的不同系统之间以事先商定的简单形式进行沟通。由此可减少须存储于系统记录之外的信息量，消除管理大型主数据结构的需要，并允许企业更为灵活地将数字孪生进行多种应用，持续更新该数字孪生，如同其已与企业相互融合，而非增加企业负担。

理性能标准的相关操作数据，如拉伸强度、位移、力矩以及色彩均匀度；（2）影响物理资产运营的环境或外部数据，如周围环境温度、大气压力以及湿度。这些检测数据利用编码器转换为受保护的数字讯息，并传输至数字孪生。

传感器的信号可利用制造执行系统、企业资源规划系统、CAD模型以及供应链系统的流程导向型信息进行增强。这可为数字孪生提供大量持续更新的数据用以分析。

2. **传输**：传输步骤有助于实现流程和数字平台之间进行无缝、实时的双向整合/互联。网络传输是促使数字孪生成为现实的重大变革之一，包含三大组成部分：
 - a. **边缘处理**：边缘接口连接传感器和流程历史数据库，在近源处处理其发出的信号和数据，并将数据传输至平台。这有助于将专有协议转换为更易于理解的数据格式，并减少网络

图2：数字孪生概念体系架构



资料来源：德勤大学出版社

德勤大学出版社 | dupress.deloitte.com

- 传输量。过去这方面领域的许多瓶颈限制了数字孪生的可行性，然而近期技术方面的重大突破消除了这些障碍。
- b. **传输接口**：传输接口将传感器功能获取的信息转移至整合职能。鉴于产生洞见的传感器依数字孪生的设置可放置于几乎任何地点，该领域需要多种方案以供选择：放置在工厂里、家中、采矿场或停车场以及其他各类地点。¹⁴
 - c. **边缘安全**：新型传感器和传输设备带来了新的安全问题，并且仍在不断增长。最常用的安全措施包括采用防火墙、应用程序密钥、加密以及设备证书等。随着互联资产愈加增多，实现数字孪生安全应用的新解决方案需求便愈显迫切。
3. **聚合**：聚合步骤可支持将获得的数据存入数据储存库中，并进行处理以备用于分析。数据聚合及处理均可在现场或云端完成。驱动数据聚合及处理的技术领域在过去数年获得了极大的发展，使设计人员得以创造大规模的延伸架构，具有更高的敏捷度，而成本仅及过去的一小部分。¹⁵
 4. **分析**：在分析步骤，将数据进行分析并作可视化处理。数据科学家和分析人员可利用先进的数据分析平台和技术，开发迭代模型，发掘洞见，提出建议，并引导决策过程。¹⁶
 5. **洞见**：洞见步骤中，分析工具发掘的洞见将通过仪表盘中的可视化图表列示，以一个或以上的维度突出显示数字孪生模型和物理世界类比物性能中不可接受的差异，标明可能需要调查或更

换的区域。

6. **行动:** 行动步骤是指之前几个步骤形成的可执行洞见反馈至物理资产和数字流程,实现数字孪生的作用。洞见经过解码后,进入资产流程上负责移动或控制机制的促动器,或在管控供应链和订单行为的后端系统中更新——这些均可进行人工干预。¹⁷这个互动完成了物理世界与数字孪生之间的闭环连接的最后一环。

数字孪生应用程序通常以企业的主系统语言编写,通过以上步骤复制物理资产和流程。此外,在整个过程中,可应用标准和安全措施进行数据管理和可互操作的连接。

大数据引擎的计算能力、分析技术的广泛适用性、聚合领域大量且灵活的储存可能性以及标准数据的整合,使数字孪生能够创建比以往更为丰富、互动程度更高的环境。而这些发展将可能推动更加复杂和真实的模型开发,并具有降低软硬件成本的潜力。

需要注意的是,上述概念体系架构的设计应具备分析、处理、传感器数量和信息等方面的灵活性和可扩展性。这样,该架构便能在持续甚至指数级变化的市场环境中快速发展。

数字孪生与数字主线

任何有关数字孪生的讨论,亦应论及与其紧密相关的概念“数字主线”才具有意义。在最高阶段,数字主线是一个连续、无缝的数据链,连接着产品生命周期中从设计到建造到实际使用的各个阶段。它实质上提供了产品数据进行传输的通道。这些数据的存储、访问、复制和分析,是创造复制生产的能力的关键,并促进高效的供应链传输。

在探讨数字孪生时,人们可能会将其视为一个“活”的现象——一个非静止产品或流程的复刻,目的是优化业务绩效。数字主线为数字孪生提供进行分析所需的信息类型,在很大程度上使数字孪生达成了这一目的。从这个意义而言,数字孪生通过数字主线提供的信息获得了部分“生命”,而反过来,数字孪生的洞见可促成产品设计或生产流程的变化,从而更改数字主线以利于未来所述物体的迭代。¹⁸

欲了解有关数字主线的更多信息,请见《[3D技术机遇与数字主线:增材制造连接一切](#)》。

欲进一步了解数字化供应网络,请见《[数字化供应网络的崛起:工业4.0促进供应链的数字化转型](#)》。

提升商业价值

对每家开启数字化进程的企业而言，充分证明投资数字孪生可产生收益并创造价值，变得日益迫在眉睫。这一全新方法如何推动企业转变运营与业务模式，并创造量化的商业价值？过去，创建数字孪生的成本高昂，且收效甚微。随着存储与计算成本日益走低，数字孪生的应用案例与潜在收益大幅上涨，并转而提升商业价值。¹⁹

在探析数字孪生的商业价值时，企业须重点考虑战略绩效与市场动态相关问题，包括持续提升产品绩效、加快设计周期、发掘新的潜在收入来源，以及优化保修成本管理。可根据这些战略问题，

随着存储与计算成本日益走低，数字孪生的应用案例与潜在收益大幅上涨，并转而提升商业价值。

表1：数字孪生的商业价值

商业价值类型	潜在的商业价值
质量	<ul style="list-style-type: none"> 提升整体质量 预测并快速发现质量缺陷趋势 控制质量漏洞，能够判断何时会出现质量问题
保修成本与服务	<ul style="list-style-type: none"> 了解当前设备配置，优化服务效率 积极准确地判断保修与索赔问题，以降低总体保修成本，并改善客户体验
运营成本	<ul style="list-style-type: none"> 改善产品设计，有效实施工程变更 提升生产设备性能 减少操作与流程变化
记录保存与编序	<ul style="list-style-type: none"> 创建数字档案，记录零部件与原材料编号，从而更有效地管理召回产品与质保申请，并进行强制追踪
新产品引进成本与交付周期	<ul style="list-style-type: none"> 缩短新产品上市时间 降低新产品总体生产成本 有效识别交付周期较长的部件及其对供应链的影响
收入增长机会	<ul style="list-style-type: none"> 识别有待升级的产品 提升效率，降低成本，优化产品

资料来源：德勤分析

开发相应的应用程序，借助数据孪生创造广泛的商业价值。表1列示了各种类型的商业价值。

除了上述商业价值领域以外，数字孪生还可协助制造企业构建关键绩效指标。综合而言，数字孪

生可用于诸多应用程序，以提升商业价值，并从根本上推动企业开展业务转型。所产生的价值可运用切实结果予以检测，而这些结果则可追溯至企业关键指标。



应用案例：创建全生命周期数字孪生

目前为止，数字孪生的讨论重点大多围绕产品生命周期中的生产流程。生产流程仅仅是数字孪生的一个应用领域。事实上，数字孪生还有另一简单可行的广泛应用领域，即基于产品应用于产品全生命周期，涵盖概念开发到实际使用。例如，一家工业制造企业正面临诸多质量问题，导致维修与保修成本高企。这些问题损害了客户信任与品牌形象，因此该制造企业试图找出问题的根源所在。与此同时，在解决问题的过程中，该制造企业的供应网络受到额外影响，并进一步增加了成本。

为了有效应对以上问题，工程与供应机构积极部署数字孪生，试图解决质量问题，并持续提升保修维修相关售后服务。首先，他们决定将“设计类”物料清单与“制造类”物料清单中的所有类似信息进行整合。两者的区别之处在于，设计类物料清单包括开发及测试因素，而制造类物料清单则包含产品生产设备综合因素，如采购部件详情与装配详情。工程师可基于这些结果进行分析，并就影响质量的生产变量提出洞见。因此，团队能够提供创新见解，以改善装配流程，将返工率降低15%至20%。

虽然上述努力只是数字孪生的冰山一角，但其生成的信息正促使售后部门加大部署该应用案例，借助数字孪生流程，更加高效地在实际生产中使用产品信息，即“维修类”物料清单，从而进一步深入了解流程变量如何改变并提升性能。结合设计类、制造类以及维修类物料清单的所有信息，可打造一个有始有终的完整数字化进程，从而催生全新商业机会，包括资产可用性管理、备件库存优化、预见性维护以及服务。

如何着手部署

数字孪生现已得到广泛应用，那么企业应如何着手部署呢？打造数字孪生流程时，一项重大挑战在于确定数字孪生模型的最优方案。过于简单的模型无法实现数字孪生的预期价值，如果过于追求速度与广泛的覆盖面，则必将迷失在海量传感器、传感信号以及构建模型必需的各种技术之中。因此，过于简单或过于复杂的模型都将让企业裹足不前。图3提供了一个复杂程度适中的模型示例。

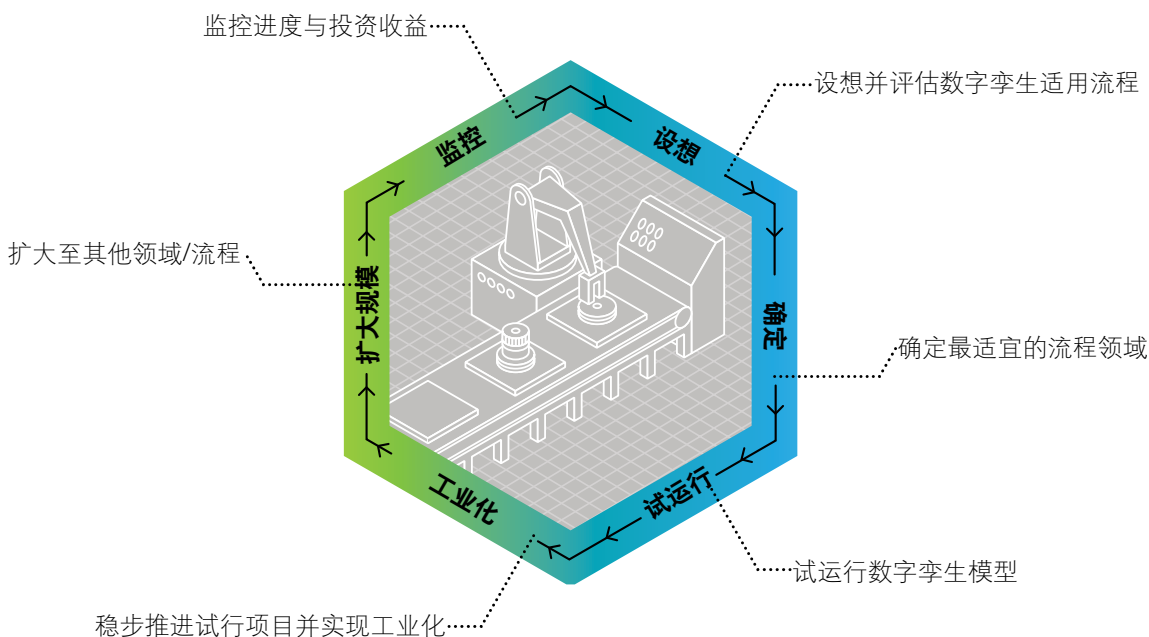
设想可能性。第一步，设想并选出数字孪生可产生收益的系列方案。虽然不同企业或不同环境下，适用方案会有所不同，但通常都具备以下两大重要特点：

1. 所设想的产品或生产流程对企业弥足珍贵，因此须投资创建数字孪生。
2. 存在一些尚不明朗的未知流程或产品问题，有望为客户或企业创造价值。

方案选定后，对每个方案进行评估，以确定可运用数字孪生快速获得收效的流程。建议集中召开构思会议，由运营、业务及技术领导层成员共同推进评估过程。

确定流程。接下来，确定潜在价值最高且成功率最大的数字孪生试用模型。综合考虑运营、商业、组织变革管理因素，以打造最佳试运行方案。与此同时，重点关注有望扩大设备、选址或技术规模的领域。企业还可能面临的挑战是，执著于

图3：数字孪生初步部署概览



资料来源：德勤大学出版社

德勤大学出版社 | dupress.deloitte.com

为某个复杂设备或生产流程深度创建数字孪生，而实际上，广泛部署企业层面的数字孪生方可为企业带来最大价值与支持，即应当力求广度，而非深度。

试运行项目。通过敏捷迭代周期，迅速投入试运行，以加速学习进程，有效管理风险，并实现投资收益最大化。试运行项目可以为业务部门或产品的一个子集，但需能证明其对企业的价值。推进试行项目的过程中，实施团队应随时随刻强调适应性及开放式思维，打造一个未可知的开放式生态系统，该系统可顺时应势，整合新数据（结构化及非结构化），并接纳新的技术与合作伙伴。虽然无须知道数据的各种来源（如新的传感器以及外部数据源），但需制定相应解决方案，协助扩展端到端解决方案（涵盖初期开发至售后服务）。一旦在初期实现了价值，即应考虑借助良好的发展势头，实现更大的收益。与此同时，应向企业高层汇报所实现的价值。

实现流程工业化。试运行有所斩获后，可立即运用现有工具、技术与脚本，将数字孪生开发与部署流程工业化。协调试运行团队预期，并管理其他试图采用相同模型的项目。就数字孪生流程提出洞见，并汇报至企业高层。这一过程包括对企业各种零散的实施过程进行整合，实施数据湖，

提升绩效与生产率，改善治理与数据标准，以及推进组织结构变革，从而为数字孪生提供支持。

扩大数字孪生规模。成功实现工业化后，应重点把握机会扩大数字孪生规模。目标应当锁定相近流程以及与试运行项目相关的流程。借鉴试运行经验，并采用试运行期间使用的工具、技术以及脚本，快速扩大规模。在此期间，继续向企业高层以及利益相关者汇报运用数字孪生所实现的价值。

监控与检测。对解决方案进行监控，以客观检测数字孪生所创造的价值。确定循环周期内是否可产生切实收益，提升生产率、质量、利用率，降低偶发事件以及成本。反复调试数字孪生流程，观察结果，以确定最佳配置方案。

更为重要的是，与传统项目不同，数字孪生并不会在有所收效后戛然而止。要长期在市场占据独特优势，企业应不断在新的业务领域再次进行尝试。

总而言之，能否在数字孪生创建之初收获成功，取决于是否有能力制定并推进数字孪生计划，同时确保其持续协助企业提升价值。为了实现这一目标，企业须将数字化技术与数字孪生渗透至整个组织结构，涵盖研发与销售，并运用数字孪生改变企业的业务模式及决策过程，从而源源不断地为企业开创新的收入来源。

结语

数字孪生能够为企业带来实际价值，创造新的收入来源，并帮助企业解决重要战略问题。随着新技术能力的发展、灵活性的提升，以及成本的降低，企业能够以更少的资金投入在更短的时间内创建数字孪生并产生价值。数字孪生在整个产品生命周期内有多种应用形式，能够实时解决过去无法解决的问题，创造

几年前几乎不可想象的价值。真正的问题或许并不在于是否应该着手部署数字孪生，而在于从何时开始部署，以在最短时间内获得最大价值，以及如何在竞争中脱颖而出。首先应该怎么做？如何着手部署？要搞清楚这一点非常困难，但千里之行始于足下，关键是要迈出第一步。

德勤综合研究中心（Center for Integrated Research）针对不同行业和部门存在的重要商业问题提出新的观点，涉及新兴技术高速发展和人类行为共性等领域。我们提出深刻、严谨、合理的洞见，从全新视角分析变革问题，并通过科研文章、短片、现场研讨会和在线课程等多种形式传播新的理念。

尾注

1. "The cheap, convenient cloud," *Economist*, April 18, 2015, <http://www.economist.com/news/business/21648685-cloud-computing-prices-keep-falling-whole-it-business-will-change-cheap-convenient>.
2. Adam Mussomeli, Doug Gish, and Stephen Laaper, *The rise of the digital supply network*, Deloitte University Press, December 1, 2016, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/digital-transformation-in-supply-chain.html>.
3. Jack Reid and Donna Rhodes, *Digital system models: An investigation of the non-technical challenges and research needs*, Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology, 2016.
4. Michael Grieves, *Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication*, 2014, p. 1, http://innovate.fit.edu/plm/documents/doc_mgr/912/1411.0_Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.pdf.
5. For an overview of the IoT and the technologies that are a part of it, see Jonathan Holdowsky et al., *Inside the Internet of Things (IoT): A primer on the technologies building the IoT*, Deloitte University Press, August 21, 2015, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/internet-of-things/iot-primer-iot-technologies-applications.html>.
6. Timothy West and Art Pyster, "Untangling the digital thread: The challenge and promise of model-based engineering in defense acquisition," *Insight* 18, no. 2 (2015): pp. 45-55, DOI:10.1002/inst.12022.
7. Holdowsky et al., *Inside the Internet of Things (IoT)*.
8. Grieves, *Digital twin*.
9. Ibid.
10. A bill of materials refers to all the inputs that go into the manufacture of a product—from assemblies to components to raw materials.
11. In practice, human discretion would play a role in the decision to proceed with that change in physical process, especially in particularly complex process changes.
12. An expanded version of the digital twin configuration in figure 1 could have included the deployed finished product, for example. Real-time information about how a product actually performs in the field could prove useful to future manufacturing processes. A different version of the digital twin configuration in figure 1 might have reflected only a portion of the manufacturing process.
13. Andy Daecher and Robert Schmid, "Internet of Things: From sensing to doing," *Tech Trends 2016*, Deloitte University Press, February 24, 2016, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/tech-trends/2016/internet-of-things-iot-applications-sensing-to-doing.html>.
14. Examples of such communication protocols include Wi-Fi, landline, and SIM in areas where infrastructure is already available. New protocols include near-field communication for secure, short distances; NBloT or LoRA for long-distance transmission of information; ZigBee, Bluetooth, and BLE for low-energy transmission; and MQTT for when data bandwidth is low or other physical constraints exist.

15. For more information on how the technology areas that power data aggregation and processing have evolved in terms of capability, functionality, and economic efficiency, see Holdowsky et al., *Inside the Internet of Things (IoT)*.
16. Data can be analyzed either as a batch or in real time or as a combination (lambda architecture). Batch analytics is an efficient way of processing large volumes of data collected over a period of time. An example of batch analytics for a digital twin could be to provide a visualization of maximum and minimum temperatures for a physical asset, recorded over the day. In comparison, real-time analytics involves generating insights about a physical asset through continuous processing of incoming data pertaining to the asset. Real-time analytics might be used to alert a central command center about physical damages incurred to an asset.

It is also worth noting that machine learning techniques may play an important role in fulfilling the analyze step as a means for processing systems to evaluate data and highlight departures from “normal” operations autonomously.
17. It should be mentioned, again, that any action to change a manufacturing process based on digital twin insights may occur with the involvement of human discretion, particularly where the proposed change is complex.
18. See Mark Cotteleer, Stuart Trouton, and Ed Dobner, *3D opportunity and the digital thread: Additive manufacturing ties it all together*, Deloitte University Press, March 3, 2016, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/3d-opportunity/3d-printing-digital-thread-in-manufacturing.html>.
19. “The cheap, convenient cloud.”

德勤中国联系人

董伟龙

工业产品与服务行业领导人
电子邮件: rictung@deloitte.com.cn

周令坤

管理咨询合伙人
电子邮件: andyzhou@deloitte.com.cn

刘浩

管理咨询总监
电子邮件: haoliu@deloitte.com.cn

薛梓源

科技风险咨询服务领导合伙人
电子邮件: tonxue@deloitte.com.cn

管延放

管理咨询合伙人
电子邮件: alvinguan@deloitte.com.cn

陈隽伟

管理咨询总监
电子邮件: kevinjwchen@deloitte.com.cn

Deloitte. University Press

关于德勤大学出版社

德勤大学出版社出版了为企业、公共部门和非政府组织的见解原创文章，报告和期刊。我们的目标是从我们整个的专业服务机构在研究和经验可供借鉴，而且在学术界和商界共同作者，来推进对感兴趣的高管和政府领导人的议题广泛交谈。德勤大学出版社是德勤咨询的印记。

关于德勤全球

Deloitte（“德勤”）泛指一家或多家德勤有限公司（即根据英国法律组成的私人担保有限公司，以下称“德勤有限公司”），以及其成员所网络和它们的关联机构。德勤有限公司与其每一家成员所均为具有独立法律地位的法律实体。德勤有限公司（又称“德勤全球”）并不向客户提供服务。请参阅www.deloitte.com/cn/about 以了解更多有关德勤有限公司及其成员所的详情。

德勤为各行各业的上市及非上市客户提供审计及鉴证、管理咨询、财务咨询、风险咨询、税务及相关服务。德勤透过遍及全球逾150个国家与地区的成员所网络为财富全球500强企业中的80%左右的企业提供专业服务。凭借其世界一流和高质量的专业服务，协助客户应对极为复杂的商业挑战。如欲进一步了解全球大约263,900名德勤专业人员如何致力成就不凡，欢迎浏览我们的Facebook、LinkedIn 或Twitter专页。

关于德勤中国

德勤于1917年在上海设立办事处，德勤品牌由此进入中国。如今，德勤中国的事务所网络在德勤全球网络的支持下，为中国本地和在华的跨国及高增长企业客户提供全面的审计及鉴证、管理咨询、财务咨询、风险咨询和税务服务。德勤在中国市场拥有丰富的经验，同时致力于中国会计准则、税务制度及培养本地专业会计师等方面的发展作出重要贡献。敬请访问 www2.deloitte.com/cn/zh/social-media，通过德勤中国的社交媒体平台，了解德勤在中国市场成就不凡的更多信息。

本通信中所含内容乃一般性信息，任何德勤有限公司、其成员所或它们的关联机构（统称为“德勤网络”）并不因此构成提供任何专业建议或服务。在作出任何可能影响您的财务或业务的决策或采取任何相关行动前，您应咨询合资格的专业顾问。任何德勤网络内的机构均不对任何方因使用本通信而导致的任何损失承担责任。

©2018。欲了解更多信息，请联系德勤中国。
CQ-002CN-18



这是环保纸印刷品