1. 数化仿真阶段

在这个阶段，数字孪生要对物理空间进行精准的数字化复现，并通过物联网实现物理空间与数字空间之间的虚实互动。这一阶段，数据的传递并不一定需要完全实时，数据可在较短的周期内进行局部汇集和周期性传递，物理世界对数字世界的数据输入以及数字世界对物理世界的能动改造基本依赖于物联网硬件设备。

这一阶段主要涉及数字孪生的物理层、数据层和模型层（尤其是机理模型的构建），最核心的技术是建模技术及物联网感知技术。通过3D测绘、几何建模、流程建模等建模技术，完成物理对象的数字化，构建出相应的机理模型，并通过物联网感知接入技术使物理对象可被计算机感知、识别。

2.分析诊断阶段

在这个阶段，数据的传递需要达到实时同步的程度。将数据驱动模型融入物理世界的精准仿真数字模型中，对物理空间进行全周期的动态监控，根据实际业务需求，逐步建立业务知识图谱，构建各类可复用的功能模块，对所涉数据进行分析、理解，并对已发生或即将发生的问题做出诊断、预警及调整，实现对物理世界的状态跟踪、分析和问题诊断等功能。

这一阶段的重点在于结合使用机理模型及数据分析型的数据驱动模型，核心技术除了物联网相关技术外，主要会运用到统计计算、大数据分析、知识图谱、计算机视觉等相关技术。

3.学习预测阶段

实现了学习预测功能的数字孪生能通过将感知数据的分析结果与动态行业词典相结合进行自我学习更新，并根据已知的物理对象运行模式，在数字空间中预测、模拟并调试潜在未发觉的及未来可能出现的物理对象的新运行模式。在建立对未来发展的预测之后，数字孪生将预测内容以人类可以理解、感知的方式呈现于数字空间中。

这一阶段的核心是由多个复杂的数据驱动模型构成的、具有主动学习功能的半自主型功能模块，这需要数字孪生做到类人一般灵活地感知并理解物理世界，而后根据理解学习到的已知知识，推理获取未知知识。所涉及的核心技术集中于机器学习、自然语言处理、计算机视觉、人机交互等领域。

4.决策自治阶段

到达这一阶段的数字孪生基本可以称为是一个成熟的数字孪生体系。拥有不同功能及发展方向但遵循共同设计规则的功能模块构成了一个个面向不同层级的业务应用能力，这些能力与一些相对复杂、独立的功能模块在数字空间中实现了交互沟通并共享智能结果。而其中，具有“中枢神经”处理功能的模块则通过对各类智能推理结果的进一步归集、梳理与分析，实现对物理世界复杂状态的预判，并自发地提出决策性建议和预见性改造，并根据实际情况不断调整和完善自身体系。

在这一过程中，数据类型愈发复杂多样且逐渐接近物理世界的核心，同时必然会产生大量跨系统的异地数据交换甚至涉及数字交易。因此，这一阶段的核心技术除了大数据、机器学习等人工智能技术外，必然还包括云计算、区块链及高级别隐私保护等技术领域。

三、数字孪生的未来

现如今，数字孪生与行业和社会发展的未来结合得愈发紧密。美国、德国等发达国家都已将数字孪生作为本国未来工业发展架构的关键组成部分；新加坡、法国、加拿大和我国多地也已建立了许多相对成熟的智慧城市项目。数字孪生作为人们认识世界、改造世界的新工具，正在成为世界上主要国家数字化转型的新抓手，并将成为第四次工业革命的基础组成部分，也将成为信息化社会治理的基础支撑，这是社会信息化发展的必然结果。

通过结合机器学习、大数据、物联网、5G、区块链等新兴技术，数字孪生可以对物理对象进行实时建模、监控、分析、预测、控制调整及一定程度的改造。利用数字孪生构建行业知识，形成对产业整体趋势的分析和预知并得到具有前瞻性的建议，能在很大程度上改善生产活动中诸如产业链协同、城市综合治理等令人头痛的复杂问题，改变未来各行业的运作方式。

以某电力行业数字孪生的一个应用情境为例。某天，发电设备厂商的管理者接到一通电话，告知他系统在经过对发电设备运行数据的监控分析后，推测出安装在某客户发电厂中的一个发电涡轮机出现了一些无法通过环境设备或运行模式进行调整的状况，这一状况可能导致涡轮机的一个关键部件比平常更快地损坏。虽然现在并没有立刻引起问题，但在未来几个月内，会导致发电厂的整体性能下降。因此建议设备厂商立刻派出运维人员，对该设备进行保养维修，并给出了针对该设备某几项运行状态的保养建议。拨出这通电话给管理者的，并不是人类操作员，而是发电厂的数字孪生通过对运行数据的分析、诊断，在模拟预测了设备的非常规运行模式及其可能成因后，所给出的具有预见性的智能化决策建议，并由数字孪生自主或半自主地实施决策。

在未来，以人工智能为核心的数字孪生，可以使整个数字孪生体系像人类一样、甚至以远超于人类的敏锐度去观察、预判并行动。