



专题：网络数字孪生

## 数字孪生技术赋能6G网络

邢天齐, 任驰, 魏群, 穆佳  
(中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100048)

**摘要:** 6G网络将会带来空前的连接性能, 并通过设计多种新技术融合的网络架构, 满足多样化的应用场景和用户需求。然而, 6G网络的普适性与灵活性, 为网络的性能保障以及运营维护带来诸多挑战。利用数字孪生技术可以生成6G网络的数字孪生体, 并结合人工智能以及其他数据分析技术, 深入分析网络数据并预测网络未来行为, 在虚拟与现实的相互配合下, 保障6G网络的性能并赋能网络运维。基于此, 从数字孪生技术赋能6G网络的角度入手, 分析数字孪生技术与6G网络结合的需求场景、网络架构、关键技术以及机遇与挑战, 探索一条6G网络与数字孪生技术相结合的发展路线。

**关键词:** 数字孪生技术; 6G网络; 人工智能

**中图分类号:** TP393, TN929

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2025184

## Digital twin technology enabled 6G network

XING Tianqi, REN Chi, WEI Qun, MU Jia  
Research Institute of China United Network Communications Co., Ltd., Beijing 100048, China

**Abstract:** 6G network will have the unprecedented connectivity performance and meet diverse use cases and user demands through the network architecture design that integrates multiple innovative technologies. However, the versatility and flexibility of 6G network will bring the significant challenges for the performance guarantees and the operational maintenance. By leveraging digital twin technology, the digital twin networks can be created. Combined with artificial intelligence and other data analytics techniques, the digital twin networks enable in-depth analysis of network data and prediction of future network behaviors. The performance of 6G networks is ensured and network operations and maintenance are empowered through the cooperation between virtuality and reality. Based on this, the integration of digital twin technology into 6G network was explored, analyzing demand scenarios, network architectures, key technologies, opportunities, and challenges, aiming to chart a development roadmap for digital twin technology enabled 6G network.

**Key words:** digital twin technology, 6G network, artificial intelligence

收稿日期: 2025-05-13; 修回日期: 2025-07-28

基金项目: 移动信息网络国家科技重大专项 (No.2024ZD1300400)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of China on Mobile Information Networks (No.2024ZD1300400)

## 0 引言

近年来,数字技术推动新技术革命迅猛发展,其中,数字技术包括数字孪生、人工智能(artificial intelligence, AI)、大数据、云计算等技术。在此背景下,6G网络开始被业界提及并受到广泛关注。6G网络不仅会带来空前的连接性能,还将通过设计融合多种新技术的网络架构,满足多样化的应用场景和用户需求。在这一进程中,数字孪生技术赋能6G网络逐渐被广泛热议。业界在不断探索是否可以利用数字孪生技术,为具备超高性能的6G网络生成高精度孪生体,在虚拟与现实的相互配合下,进一步保障6G网络的整体性能。本文从数字孪生技术赋能6G网络的角度入手,分析数字孪生技术与6G网络结合的需求场景、网络架构、关键技术以及量化效益。

## 1 高价值需求与场景

6G网络目前处于前沿研究阶段,尤其是在6G核心网侧。相较于5G网络,6G网络在研究之初需要考虑满足泛在连接、以用户需求为中心、简化网络运营以及网络韧性等实际布网需求。利用数字孪生技术可以生成6G网络的数字孪生体,并构建整个数字孪生网络,在此基础上,结合AI及其他数据分析技术,可以深入分析网络数据并预测网络未来行为,从而提高网络韧性,实现灵活构建6G分布式网络部署,针对性提升用户业务体验,并指导网络规划、建设、维护、运营与优化。

### 1.1 核心网容灾与安全管理

在数字孪生网络中,可以模拟各种网络攻击(如分布式拒绝服务攻击(distributed denial of service attack, DDoS)、勒索软件攻击),评估网络的响应能力和安全措施的有效性,加强网络对恶意流量的识别和防护。将数字孪生技术与AI算法

相结合,还可以预测突发的灾害、潜在的硬件故障或软件漏洞,以及配置错误或设备老化等引起的问题。数字孪生网络可以实时模拟出故障后的最佳修复步骤,自动部署替代方案,增强网络的自我修复能力。

利用数字孪生技术创建一个完全虚拟的网络环境,同步网络状态与数据,用于新策略或新技术的测试。该环境可以模拟真实世界的各种复杂情况,包括高密度攻击场景,以验证网络的安全性和响应能力<sup>[1]</sup>。

### 1.2 优化网络部署与运维

数字孪生技术可以与先进的数据可视化工具相结合,为网络运营团队提供直观、互动的方式来实现监控、管理和优化网络操作。在数字孪生网络的输出端集成可视化平台,这种集成的可视化视图不仅提高了问题检测的速度,也简化了故障诊断过程。运维团队可以通过地图、图表和仪表盘展示的可视化网络数据,迅速识别问题区域,进行精准定位,从而缩短响应时间并降低网络中断的影响。

利用数字孪生技术,可以在虚拟环境中模拟实际网络架构,使运维工程师能够在不影响现有网络服务的前提下测试不同的网络配置。这种方法可以大幅减少实际部署中可能出现的错误并降低成本,因为所有的测试都在虚拟环境中进行,不会对实体网络造成任何影响。利用孪生体,可以仿真特定配置在特定条件下的表现,包括网络负载、故障响应和扩展能力等,基于数字孪生网络反馈的性能效果,可调整相关场景配置,从而降低网络的长期运营成本。在6G网络环境中,需求和负载可能会迅速变化。利用数字孪生技术搭建的孪生体或数字孪生网络可以实时监测网络的状态和资源利用率,根据实际的流量和服务需求动态地调整资源分配。在用户需求激增的时间段,系统可以自动增加带宽或网络资源,确保服务质量不受影响。当需求下降时,系统同样能够



减少资源分配，从而优化能源消耗和运营成本，实现高效的能源管理和成本节约。

在数字孪生网络中引入AI驱动的决策支持系统能够对网络运行数据进行深入分析，识别潜在的故障模式和性能瓶颈。数字孪生技术与AI技术相结合，可以实现网络维护任务自动化处理，如配置更新、安全补丁升级和性能优化等。通过减少这些任务中的人工干预，网络运维团队可以将精力集中在更有战略性的项目上，提高整体的工作效率和网络的运行质量。

### 1.3 赋能分布式网络

考虑6G网络超大流量、极低时延的要求以及安全性需求，6G网络核心网下沉的驱动力明显。6G网络组网架构考虑引入中心网络和子网的概念。其中，6G核心网中心网络（简称“中心网络”）满足广域覆盖及普适业务，并负责必要的子网间协调；6G核心网子网（简称“子网”）相对定制化，不强制包含核心网的所有网元功能，主要提供流量本地卸载，为特定业务服务。中心网络功能相对完备，子网则遵循至简设计原则。

考虑6G分布式网络需求，引入数字孪生技术对整个网络进行虚拟化构建。首先孪生出中心网络，即利用数字孪生技术，创建中心网络的完整孪生体。这一孪生体可以包括网络的所有基础和核心功能，能够模拟实际网络的运行状态、数据流和服务质量等关键参数。中心网络的数字孪生体通过收集和分析来自全国各地的实时数据，优化了网络管理和应急响应策略。在分布式子网出现问题时，支持将用户的数据流量调度到中心网络，以保证业务的畅通及连续性。

根据具体地区的服务需求和环境条件，在中心网络的数字孪生体上动态生成子网的数字孪生体，构建完整的分布式网络的数字孪生网络。这些子网可以是针对特定服务（如物联网应用、边缘计算等）设计的，不必包含中心网络的所有功

能。在分布式网络的数字孪生网络中可以通过叠加AI技术，预测和分析每个地区的服务需求变化，自动调整该地区的子网配置，确保网络资源的最优分配和使用。例如，数字孪生网络可以根据对数据流量的实时监测和历史数据分析，预测高峰时段。在高峰时段前，数字孪生网络将自动模拟并按需构建虚拟子网，提前测试虚拟子网应对流量高峰的效果，后续可以指导实际子网部署。这样的预先调整不仅可以应对突发的高峰流量，还能保证在用户体验上的无缝连接和服务质量，避免资源不足导致的网络拥塞或服务时延。

6G分布式网络还考虑子网与子网、子网与中心网络的互通与协作，通过引入数字孪生技术，可以有效地模拟分布式子网间以及子网与中心网络之间的互通情况。这种模拟不仅有助于理解网络之间的交互，还能预测和解决潜在的网络冲突和性能瓶颈。例如，6G分布式网络可以模拟在高数据流量场景下子网之间的数据转移，或是紧急情况下中心网络与子网之间的快速协同，不仅增强了网络的灵活性和可靠性，还提高了网络的整体效率和服务质量，确保网络在各种运行条件下都能够提供稳定及高效的服务。

在数字孪生网络中，还可以不断监控各个子网的性能指标，如带宽使用率、时延、数据丢包等，利用这些数据，可以实时调整网络参数，优化整体性能。通过持续监测和实时调整，网络能够动态部署或调整子网结构，确保灵活响应各种需求变化。在理想情况下，数字孪生网络可以与实际部署紧密配合，实现网络的自治和自适应控制，使网络具备自学习和适应环境变化的能力，不需要人工干预即可达到最优状态。

### 1.4 保障端到端服务质量

利用数字孪生技术，可以在没有风险的环境中模拟真实网络条件下的数据流和用户行为。这包括各种应用场景下的网络使用，如流媒体、在线游戏、大数据传输和远程办公等。通过模拟，

网络可以预测并评估网络配置对服务质量的影响,包括带宽分配、流量管理和优先级设置等。这有助于在部署前确定最优的网络设置,确保服务质量满足预定标准。

数字孪生平台结合AI技术,可以对数据传输的每个阶段进行深入分析,包括信令传递、数据封包、路由选择和最终交付,优化这些流程,可以显著降低时延和丢包率,提高数据吞吐量。相关AI算法还可以识别服务质量下降的趋势和潜在原因,生成网络优化策略。通过实时反馈机制,网络运维团队可以快速响应服务质量事件,实时调整网络配置或部署资源,以解决即时的服务问题,确保服务质量和用户对网络的满意度。

在数字孪生网络上,还可以运行先进的用户行为分析工具,根据历史数据和实时监控信息预测用户需求和期望。这使得网络可以提前准备必要的资源和配置,以满足用户的具体需求,开发个性化服务质量策略,根据用户的具体行为和偏好动态调整服务质量。

### 1.5 绿色节能

在数字孪生网络中,详细模拟和分析各种网络设备(如基站、数据中心、路由器等)在不同网络配置下的能源消耗,可以预测在不同操作条件和负载情况下的能源使用情况,并利用这些数据评估和生成能源效率最优的网络部署配置方案,从而指导网络建设。

数字孪生网络可以基于实时数据和预测模型模拟自动扩展或缩减资源的情况,得到适配当前条件的资源配置策略,进而优化能源消耗。例如,在分布式网络环境中,基于数字孪生网络得出的资源配置策略,能够按需动态调整子网和网络元素的配置和运行状态,在流量低的时段自动关闭不必要的分布式子网或将其切换到低功耗模式,从而减少能源消耗。

利用数字孪生技术还可以评估网络运营对环境的潜在影响,包括碳排放和污染物排放,同时

模拟不同操作策略对环境的影响,选择最可持续的网络运营方法。

## 2 网络架构

数字孪生技术作为一种辅助技术手段,通过对物理网络的高精度孪生,在虚拟空间内对网络进行调整与优化,从而指导物理网络的设计、测试和操作决策。数字孪生技术赋能6G网络的整体架构应当确保所有通过数字孪生网络生成的优化策略在部署到现网之前,都经过严格的多层测试和验证,以避免给现网带来任何负面影响。基于上述考量,数字孪生技术赋能6G网络的整体架构如图1所示。

6G网络需要满足高吞吐量、低时延、安全内生、多网络融合互通等需求,实现人机互联、万物互通的商业模式,以数据驱动产业发展,实现高度数字化、灵活的数据开放。数字孪生技术则需要以海量网络数据为基础,构建6G网络孪生体,还原物理网络场景,进而指导、优化、赋能物理网络。

数字孪生技术赋能6G网络的整体架构可以总结为“三层架构、闭环机制”。首先,利用6G全网数字化以及灵活数据开放的特性,将网络侧数据收集汇聚,再采用数字孪生技术构建与物理网络实体精准映射、动态交互的数字孪生体,实现全网全场景智慧运营,赋能新技术和新业务可持续创新<sup>[2-3]</sup>,提高网络鲁棒性,牵引自智网络演进,助力网络高质量发展。其中,“三层架构”包含网络管理层、孪生网络层、物理网络层,“闭环机制”是指孪生网络层内对数字孪生网络的“构建-仿真-优化”闭环迭代,以及基于三层架构的物理网络层、孪生网络层以及网络管理层之间“数据采集-数字孪生-网络管控-效果反馈”的智能化闭环。整个架构设计与6G网络相结合,助力6G网络向更高层次的数字化、智能化、可持续化方向发展。

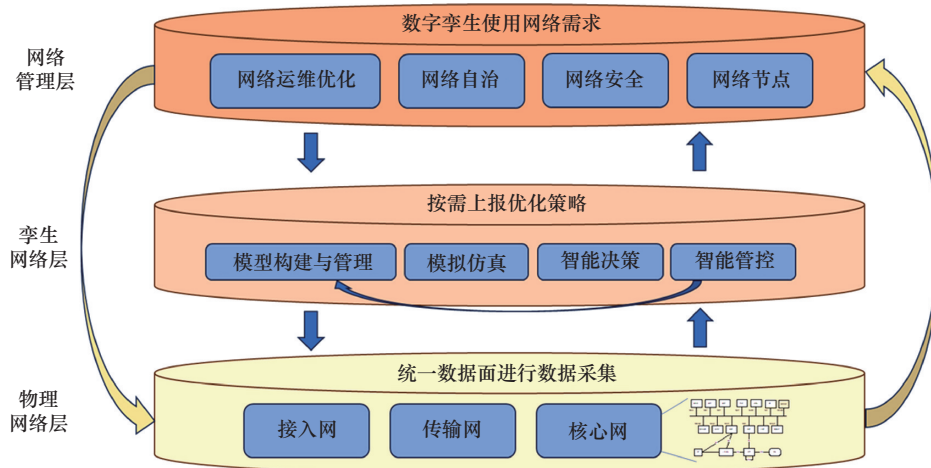


图1 数字孪生技术赋能6G网络的整体架构

## 2.1 网络管理层

网络管理层是数字孪生技术赋能6G网络的关键驱动。基于网络运维优化、网络自治、网络安全等实际的网络管理需求，调用孪生网络层的服务能力，实现“虚实映射、以虚控实、以虚优实、虚实共生”的全网智慧运营管理。通信网络运营商在利用数字孪生技术构建网络孪生体的初期阶段，主要以满足虚实映射类运营需求为主，随着技术能力发展成熟，再逐渐扩充到其他场景范围，最终实现数字孪生体与物理网络实体的全自动化交互。

在初期阶段，运营商可以利用数字孪生技术满足虚实映射类的运营需求。该类场景主要是借助孪生网络层开放的模型构建和网络感知能力，实现对网络资源实体的属性、模型、事件、指令的数字化定义，对网络拓扑组网的逻辑关系表达，以及对网络资源实体及组网拓扑的物理可视化呈现，具体场景包括网络资源可视化、网络设备拓扑可视化等。

在满足虚实映射需求后，可以尝试将AI技术引入数字孪生网络中，从而满足以虚控实类的运营需求。该类需求主要是基于孪生网络层开放的仿真、认知等能力，并结合相关AI能力，对孪生网络运行状况分析判断，通过智能决策能力生成

优化的网络管理策略，指导实际网络管理，具体场景包括网络容灾与安全管理等。

将现实中可能会出现的不同场景环境融入数字孪生网络中，使数字孪生网络不仅可以针对网络内部进行数字化孪生，还可以孪生对网络产生影响的环境信息，进而满足以虚优实类的运营需求。该类需求主要是基于孪生网络层开放的仿真、认知、决策等能力，实现对物理网络的高效仿真，同时根据不同场景、环境下的相关参数设定，进行网络的推演预测，从而实现网络决策优化，具体场景包括优化网络部署与运维、端到端服务质量的保障等。

最后实现虚实共生类需求。基于孪生网络层关键能力，捕获网络运行中的相关“知识”，结合数字孪生网络的相关信息进行分析，让“知识”转换成策略，利用闭环机制验证后，再通过孪生网络层南向接口将策略更新下发至物理网络层，该过程不需要人为干涉，即可实现网络自治。该需求需要保证由孪生网络层生成的相关网络策略的极高可靠性与可行性，是数字孪生技术赋能6G网络发展在中后期阶段需要考虑的能力。

## 2.2 孪生网络层

孪生网络层通过对全网业务、网元、资产等全要素进行数字化建模，构建物理网络实体的数

字孪生体, 打造数字孪生模型构建与管理、模拟仿真、智能决策和智能管控四大关键能力, 通过应用程序接口 (application program interface, API) 服务、软件开发工具包 (software development kit, SDK) 等标准接口方式对外开放, 实现对网络管理层的敏捷响应, 对业务、流程、网络的端到端透视和全息感知<sup>[4]</sup>, 以及对物理网络状态的高效仿真和智能交互, 赋能新技术和新业务实现可持续创新。

孪生网络层的核心组成部分是模型的构建与管理, 基于感知的网络数据, 将网络从物理实体向虚拟空间映射, 构建与物理实体一致的数字孪生体<sup>[5]</sup>。首先进行模型的构建, 数字孪生模型构建主要是对多源异构数据进行分类与归并, 针对不同的网络域建立对应网络层级的数字孪生模型, 涵盖基础属性信息和场景功能信息, 并具备指令接收与事件反馈的能力。数字孪生模型通过实例或者实例的组合向上层提供服务, 最大化网络业务的敏捷性和可编程性<sup>[4]</sup>。模型管理以及拓扑管理主要通过分析网络和业务信息数据, 不断迭代优化孪生体, 并将出现的问题进行反馈构成闭环, 使其与实际值的偏离值在允许误差范围之内, 从而构建出与物理实体一致的数字孪生体<sup>[6]</sup>。模型管理涉及网络各个部分、各个阶段, 通过构建数字孪生网络对网络物理对象全生命周期的数据信息进行采集、传递和回溯, 提供访问、整合不同数据的能力, 支撑当前状态实时评估和未来决策的能力。

数字孪生网络构建完成后, 可以在其中进行模拟仿真。数字孪生技术的模拟仿真能力是指在数字孪生网络构建完成后, 通过模拟仿真验证和确认数字孪生网络的正确性和有效性。在通信领域, 模拟仿真技术包括场景级仿真、链路级仿真和器件级仿真等。场景级仿真用于模型、场景方案的性能评价, 当前在数字孪生技术赋能网络的应用中以场景级仿真为主; 链路级仿真用于评价

点对点通信的质量关系, 随着4G、5G无线仿真技术的发展, 链路级仿真需求正在快速增长; 器件级仿真用于对影响半导体器件的外部电学、热学和光学特性模拟, 在数字孪生技术赋能网络中使用较少<sup>[4]</sup>。

在完成模拟仿真等一系列研究验证工作后, 利用数字孪生网络反馈的信息生成优化后的网络策略, 这需要用到智能决策能力, 即利用AI和知识图谱等技术对仿真流程和数字孪生网络进行分析, 判断和识别出问题的类型及所在, 并构建价值函数, 实现最优方案寻解和决策推荐<sup>[7]</sup>。作为智能化的枢纽, 该功能可以通过强化学习等技术提取数据特征、训练模型, 形成高效的运营策略。这一功能的职能在于规划和策略制定, 将数字孪生网络的深度分析转化为决策时的具体行动指南。

最后实现智能管控, 即对智能决策后的方案进行调度执行, 此处的调度执行主要是指将生成的与网络相关策略在数字孪生网络中进行闭环执行, 并在孪生网络层内部进行多轮迭代, 最终向网络管理层输出最优的相关网络策略, 或者基于网络管理层需求将充分验证后的策略作用在物理网络中。

### 2.3 物理网络层

物理网络层是数字孪生技术赋能6G网络的基础数据来源及数字化对象。物理网络层由构成端到端网络的所有物理实体以及云化虚拟网络构成, 包括接入网、传输网以及核心网等。考虑孪生网络层需要精确构建与物理实体一致的数字孪生体, 因此, 物理网络层需要引入统一的数据采集能力, 对网络中的各个节点设备和网元实时进行数据采集, 并以统一的接口协议将网络侧的动态数据上报给孪生网络层。为降低对网络性能的影响, 采集可以是周期性的而非不间断的。该功能确保了网络侧数据的精确实时上传, 为孪生网络层的建模、仿真和智能决策管控提供了物理基础。



## 2.4 闭环机制

从数字孪生技术赋能6G网络的整体架构可以看出，网络管理层、孪生网络层以及物理网络层之间可以进行南北向交互，并构成一个闭环机制。网络管理层可以基于实际需求向孪生网络层传达对应指令，孪生网络层基于特定指令向物理网络层采集相关网络数据，根据数据进行孪生体的建模、模拟仿真、智能决策以及智能管控，生成网络管理层所需的相关策略，网络管理层在评估策略的可行性后，部署到物理网络层，物理网络层执行后将执行效果反馈给孪生网络层，孪生网络层可以基于实际现网部署效果对孪生体的建模等各个环节进行优化，并且该执行效果也会反馈给网络管理层，使网络运维人员可以直观感知网络当前的运行状态。

数字孪生技术赋能6G网络不仅可以实现跨层级的闭环机制，而且在孪生网络层还存在内部的闭环机制，即为了确保孪生网络层可以生成可靠、可执行的相关网络策略，孪生网络层内部会进行多轮的迭代流程。首先，孪生网络层在接收到物理网络层的数据后，会进行孪生体的建模、模拟仿真、智能决策以及智能管控，生成相关网络策略，该策略会在孪生体中执行并将执行结果反馈给智能管控模块，智能管控模块将执行结果与通过AI算法得出的预期执行效果进行对比，如果孪生体执行效果不及预期，则智能管控模块需要判断并优化孪生网络层中的各个模块，重新执行孪生体的建模、模拟仿真、智能决策以及智能管控，生成优化后的网络策略。经过几轮迭代后，将最优的网络策略（与AI算法得出的预期执行效果相当）反馈给网络管理层，以确保通过孪生网络层生成的网络策略的可执行性与可靠性。

整个架构的设计充分体现了数字孪生技术赋能6G网络的智能化、自动化和可持续化，为未来6G网络的高效发展与运维提供了强有力的支撑。

## 3 关键使能技术

在构建6G数字孪生网络的闭环架构中，关键使能技术至关重要。首先，数据是构建数字孪生网络的基石，因此，在6G网络中采用统一的数据平面进行统一高效的数据采集、存储以及管理，是十分关键的；其次，需要采用数字孪生相关技术完成6G网络孪生体的精确构建与动态调整；最后，利用深度学习、强化学习等AI技术在孪生体上对数据进行全方位分析预测，自动生成网络优化等相关策略，并作用在网络孪生体上，不断迭代优化网络策略，形成闭环架构。在数字孪生和AI技术的赋能下，未来的6G网络可以逐步向全方位感知、自我学习和自我调节的智能网络体系方向发展。

### 3.1 统一数据面

数字孪生技术能够为未来6G网络带来诸多益处，但前提条件是利用数字孪生技术生成的数字孪生网络要无限接近于实际网络，这就需要在6G网络的设计之初，考虑让物理网络层能够实时或准实时地上报网络中的真实数据，以辅助孪生网络层构建精确的网络孪生体，从而为6G网络赋能。

目前，在5G通信网络中，涉及数据采集、数据处理以及数据开放的不同网络特性都有自己独立的一套数据处理方法和流程，如5G的AI和机器学习特性，其核心是设计了一套基于网络数据分析功能（network data analytics function, NWDAF）的数据处理流程，该流程是先将采集到的数据汇聚到中心节点，再进行预处理、存储、分析等操作，最后将分析结果返回，并且引入了多个数据处理以及存储的网络功能<sup>[8-9]</sup>；5G的高精定位特性，则是采用另一套数据采集流程实现用户的高精度定位功能。

由于5G网络没有设计统一的数据服务架构、接口以及流程，基于5G网络的每个特性只能设

计独立的数据采集、数据存储以及数据开放的架构，这致使网络数据的管理与调度冗余且复杂，如果涉及大规模不同类型数据的实时或准实时采集、存储以及管理，在 5G 网络中很难实现。6G 网络，则因结合数字孪生技术等关键使能技术，使网络或网络感知的动态数据的价值越来越重要。经过调研汇总，不同技术、设备或平台对于网络数据的需求有相似之处，因此，在 6G 网络中考虑设计统一的数据服务架构，使不同的新兴技术更好地为 6G 网络赋能<sup>[10]</sup>。基于上述考虑，6G 网络数据面的统一架构如图 2 所示。

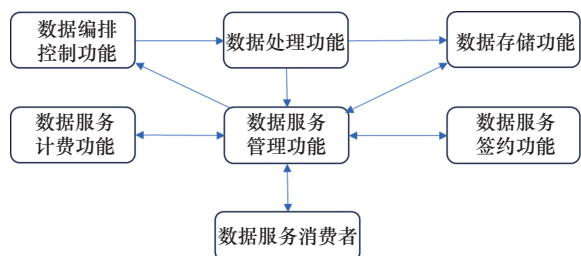


图 2 6G 网络数据面的统一架构

数据服务管理功能负责接收数据服务消费者（如终端设备、网络功能、网络平台、第三方应用等）对网络或网络感知的动态数据的获取需求，如请求或订阅某种数据服务。以数字孪生技术赋能 6G 网络为例，孪生网络层可以向物理网络层中的数据服务管理功能请求或订阅相关网络数据，并要求实时采集或周期采集等。在接收数据服务请求后，该功能向数据服务签约功能获取对应的数据服务签约，结合签约信息（如数据服务类型）进行针对该数据服务消费者的数据服务鉴权，并从数据服务签约功能中获得允许使用某种数据服务的指示等。在网络侧进行数据采集和数据处理后，该功能负责将对应的数据根据要求开放给数据服务消费者。

数据服务签约功能负责存储数据服务消费者的数据服务签约信息，如允许使用某种数据服务的指示等。

数据服务计费功能可以根据数据服务消费者请求的服务类型、相关数据服务签约信息等进行数据服务计费，如果该数据服务用于网络内部，则不进行计费。

数据编排控制功能根据数据服务管理功能发送的数据服务类型、允许使用某种数据服务的指示等信息，结合本地策略以及网络当前状态，确定调用哪些网络设备配合网络数据的收集以及预处理，并将对应的数据采集请求下发给各个网络设备。该功能收集所有网络设备反馈的数据后，将数据发送至数据处理功能。

数据处理功能负责将数据编排控制功能发送的所有数据进行统一处理，首先将不同结构类型的数据转化为统一类型，之后为满足某些数据服务的需求，可以进行统一的数据处理与分析。该功能负责将处理后的数据直接发送给数据服务管理功能或者发送给数据存储功能。如果某些数据服务不需要网络集中处理数据，则不需要数据处理功能。例如，数字孪生网络需要采集实时或准实时网络数据，且不需要网络侧进行复杂处理，则可以将数据编排控制功能采集的数据直接发送给数据服务管理功能。

数据存储功能负责接收并存储数据处理功能发送的所有数据。数据存储可按照数据服务消费者粒度、数据服务类型粒度、采集数据涉及的网络设备粒度等进行，方便后续相同数据采集需求的识别，避免进行重复的数据采集。该功能可以接收数据服务管理功能的数据服务请求，并直接反馈对应的网络数据。

孪生网络层可以作为数据服务消费者向上述统一的数据面发送数据获取请求，进行网络数据的大规模、实时高效获取，为后续建立精准动态的数字孪生网络打下坚实基础。

### 3.2 数字孪生技术

作为连接物理世界和虚拟世界的媒介，数字孪生技术的本质是虚拟世界对物理世界的映射，



映射的对象包含外在特征和内部逻辑<sup>[11]</sup>。数字孪生技术赋能6G网络，其核心在于创建一个可精确反映物理网络状态、结构和行为的动态虚拟孪生体。

在孪生网络层中，需要不断地获取来自网络各类实时数据，从流量模式到用户行为，从服务质量到硬件状态，确保与物理网络保持同步。之后，孪生网络层可以基于所有数据，利用相关建模技术进行数字孪生网络的构建。

数字孪生建模技术以物理建模为基础，结合数据驱动、物联网感知、地理信息融合及多维度仿真，形成虚实映射的完整体系。数字孪生技术赋能6G网络主要是针对不同的网络域建立对应网络层级的数字孪生模型，涵盖基础属性信息和场景功能信息，并具备指令接受与事件反馈的能力。数字孪生模型通过实例或者实例的组合，构建数字孪生网络并向上层提供服务，从而最大化网络业务的敏捷性和可编程性<sup>[4]</sup>。数字孪生网络的模型构建包括基础模型构建和业务模型构建两部分。基础模型是针对单个物理网络实体的模型定义，从多个维度建立数字孪生模型，与物理网络实体的类型强相关。根据刻画维度的不同，基础模型可分为实体数据模型、几何模型、属性定义模型、可视化规则模型、运行规则模型五大类<sup>[4]</sup>。

(1) 实体数据模型：定义单个网络实体的本质特性清单，如编码、名称、出厂厂商等，同时描述实体表现出的形态，如开/关、正常/告警等；管理对象多为描述性的信息。

(2) 几何模型：指单体模型的物理几何定义，实现孪生体符号、形状、结构、纹理的可视化表达，如定义实体对应的3D模型，可以直观地描述实体的特征或者相关形状。

(3) 属性定义模型：指单体模型的属性定义，包括物理属性和功能属性。物理属性是几何模型的数字化描述，功能属性可以客观呈现数字

孪生体实际支持的功能。

(4) 可视化规则模型：定义实体根据属性和状态进行可视化形态变化的规则，不同的属性和状态能够使孪生体呈现不同的可视化内容，如根据状态改变实体模型颜色等。

(5) 运行规则模型：指单体模型的运行规则定义，如性能、告警规则等。运行规则指在数字孪生场景中，在特定属性、接口变更/调用等不同触发条件下，指定需要加载的响应动作，通过该响应动作决定孪生体的可视化形态。

业务模型是针对特定的孪生应用场景对基础模型进行组装融合，利用采集的网络数据，从不同的维度构建或扩展的数字孪生模型<sup>[4]</sup>。业务模型用来刻画孪生体的内在运行逻辑，支持对孪生体进行反馈和控制，不同维度的模型通过搭配和组合可以创建面向不同孪生应用场景的业务模型。业务模型按网络类型划分，可分为服务于单网络域（如接入网、传输网、核心网等）的模型和服务于多网络域的模型<sup>[4]</sup>。

数字孪生网络模型不局限于模拟网络的基础运行指标，还将用户体验和行为的相关模型考虑进来，生成端到端的数字孪生网络。数字孪生网络模型需要对实体网络的变化做出快速响应，这个过程涉及数据的高效采集和精准处理，也包括了复杂系统状态的监控、对未来网络行为的精确预测以及深入的性能分析。

此外，在构建数字孪生网络时，网络的安全性和隐私保护也尤为重要。物理网络需要将大量原生数据上报给孪生网络层，在此过程中需要在数据共享和处理中确保高标准的加密和权限管理，同时也要考虑跨平台和多系统间的数据一致性和互操作性。

### 3.3 AI技术

AI技术在数字孪生网络中扮演着核心角色，多个AI领域的技术被应用于孪生网络层的智能决策及智能管控模块。

深度学习算法可以通过大量复杂的网络数据洞察用户需求和网络负载的细微变化,具备在问题显现之前预测可能的系统故障或安全漏洞的能力,为网络维护提供先知先觉的判断。

强化学习在自我优化的网络策略方面展现出独特优势,它通过与网络环境的实时互动,学习如何调整流量分配、实现节能运作以及自动故障排除,以期达到最优的运营效果。强化学习还可以提升孪生网络层的智能决策能力。

多种机器学习技术在提升网络服务质量方面发挥关键作用,通过对网络性能的不断监测和分析,不断地从网络性能数据中进行学习,自动推荐调整策略,以确保服务的稳定连续并提高用户的业务体验。在网络安全方面,机器学习技术也发挥着不可或缺的作用,机器学习算法从实时的反馈循环中快速学习,能够预测并防止网络故障,自主发现并生成阻断安全威胁的网络策略,从而保障网络和数据完整性与安全性。

上述AI技术可以作用在孪生网络层中,生成丰富的网络优化等相关策略,并将这些策略部署在数字孪生网络中进行再验证,将验证结果作为输入,输入AI算法中,这样可以不断迭代,最终得到最优策略,并指导物理网络进行实际运维操作。

数字孪生技术和AI技术的结合极大地提升了数字孪生网络自管理和适应外部变化的能力,使得数字孪生网络能够灵活响应用户需求和环境变化,从而确保了网络服务的连续性和高品质体验。

拥有数字孪生技术赋能的6G网络已经从静态的通信框架转变为充满活力、可动态调整的生态系统,它不仅可以优化用户体验,还推动了技术创新和服务模式的重大发展。

## 4 机遇与挑战

### 4.1 优势评估

6G网络的统一数据服务能力、数字孪生技

术的网络模拟仿真能力以及AI技术的数据分析预测能力共同使能数字孪生技术赋能6G网络,为6G网络的各个方面带来诸多益处,具体如下。

(1) 缩短故障恢复时间,提高网络鲁棒性:数字孪生技术可以实现对6G网络的实时监控和预测,能够及时发现和识别潜在的故障,从而缩短故障恢复的时间;通过自动化生成并部署容灾决策,可以降低故障对网络服务的影响,有助于提高用户的满意度和信任度。

(2) 减少运维成本,提高运维效率:数字孪生技术与AI技术结合,可以实现网络运行状态的智能化监控和管理,动态生成网络运维策略,减少人工干预的需求,降低运维成本,提高运维效率。

(3) 提升网络效率和性能:AI技术可以帮助优化6G网络的运行状态和资源利用率,提高网络的效率和性能;通过实时分析和预测,可以优化网络资源的分配和调度,提升网络的整体运行效率。

(4) 提升网络灵活性:结合数字孪生技术、网络功能虚拟化和AI技术,可以实现网络资源的灵活配置和智能化管理,提升网络的灵活性和适应性。

(5) 节能减排:通过孪生网络层生成动态开启和关闭具备特殊功能的网元的策略,并将该策略作用到实际网络中,能够有效降低6G网络的能源消耗,减少碳排放,实现节能减排的目标,对环境产生积极作用。

(6) 提高网络可持续性:优化能源管理策略,可提升6G网络的能源利用效率,延长设备的使用寿命,提高网络的可持续性。

### 4.2 潜在挑战

通信网络运营商需要评估在6G网络中引入数字孪生技术可能带来的技术挑战与部署风险,具体如下。



(1) 技术投入成本高：实施数字孪生技术与AI技术需要进行大量的技术研发和系统集成工作，需要投入大量的人力、物力和财力资源，成本较高，因此，需要考虑采用渐进式部署方式。

(2) 数据安全和隐私问题：数字孪生技术与AI技术涉及大量的数据采集、存储和分析，可能会涉及用户的隐私信息和敏感数据，因此，在引入数字孪生技术时需要考虑设计相应的数据安全保护机制。

(3) 技术风险和不确定性：数字孪生技术负责构建网络孪生体，AI技术则负责动态预测网络属性并生成优化策略，这两项技术相结合可能在实现初期存在技术风险和不确定性。例如，孪生体的准确性和稳定性可能受到数据质量和算法设计的影响，优化策略的可靠性和实用性也需要经过长期的实践验证。

## 5 结束语

本文分析了数字孪生技术赋能6G网络的需求场景、网络架构、关键使能技术以及机遇与挑战，在研究与分析的过程中发现，数字孪生技术应用在6G网络中，有助于实现网络的智能化管理，但要想实现高效的虚实交互与深度的网络自治，还需要AI技术的融入。AI技术具备通过学习大量数据样本产生原创内容的能力，它的引入为数字孪生网络赋予了更高的灵活性与创造力。数字孪生技术与AI技术相结合可以为6G网络带来诸多益处，但业界也应关注到构建数字孪生网络的成本，以及这两项技术本身存在的不确定性，扬长避短，探索一条实际的6G网络与数字孪生技术相结合的发展路线。

## 参考文献：

[1] 叶增炜, 张云帆, 鞠卫国. 数字孪生网络技术及典型应用研究[J]. 电信快报, 2022(3): 33-37.  
YE Z W, ZHANG Y F, JU W G. Research on digital twin net-

work technology and typical applications[J]. Telecommunications Information, 2022(3): 33-37.

[2] 中国联通研究院. 中国联通数字孪生网络白皮书[R]. 2023.  
China Unicom Research Institute. China Unicom digital twin network white paper[R]. 2023.

[3] 中国移动. 数字孪生网络(DTN)白皮书[R]. 2021.  
China Mobile. Digital twin network (DTN) white paper[R]. 2021.

[4] 李姗姗, 刘阳, 李涛, 等. 面向算网的数字孪生关键技术研究及应用探讨[J]. 邮电设计技术, 2024(3): 20-26.  
LI S S, LIU Y, LI T, et al. Research and application discussion on key technologies of digital twins for computing networks[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2024(3): 20-26.

[5] 王友祥, 唐雄燕. 6G网络架构和关键技术展望[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(5): 21-27.  
WANG Y X, TANG X Y. Prospect of 6G network architecture and key technologies[J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(5): 21-27.

[6] 武亚龙, 赵占纯, 张玓, 等. 数字孪生赋能下的6G自智网络研究[J]. 邮电设计技术, 2025(4): 1-6.  
WU Y L, ZHAO Z C, ZHANG D, et al. Research on 6G autonomous network empowered by digital twins[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2025(4): 1-6.

[7] 李姗姗, 许建宏, 李涛, 等. 运营商数字孪生网络能力成熟度模型研究[J]. 电信科学, 2023, 39(6): 149-158.  
LI S S, XU J H, LI T, et al. Research on digital twin network capability maturity model of telecom operators[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(6): 149-158.

[8] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS): TS 23.501 V19.3.0[S]. 2025.

[9] 3GPP. Procedures for the 5G system (5GS): TS 23.502 V19.3.0[S]. 2025.

[10] 中国联通研究院. 6G核心网系统架构及关键技术展望白皮书[R]. 2024.  
China Unicom Research Institute. White paper on prospects for 6G core network system architecture and key technologies[R]. 2024.

[11] 程子豪, 刘向南, 高宏伟, 等. 数字孪生赋能下的6G网络资源管控机制[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 38-45.  
CHENG Z H, LIU X N, GAO H W, et al. Scheme of resource management in digital twin-aided 6G networks[J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(3): 38-45.

[作者简介]



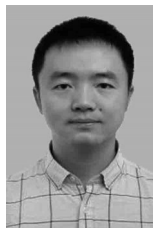
邢天齐（1995-），男，中国联合网络通信有限公司研究院工程师，主要研究方向为移动核心网技术、5G-Advanced/6G 核心网架构及相关国际标准。



魏群（1982-），女，中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师，主要研究方向为 5G-Advanced/6G 移动核心网关键技术标准及新技术验证。



任驰（1986-），男，中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师，主要研究方向为移动核心网技术、5G-Advanced/6G 核心网架构及相关国际标准。



穆佳（1984-），男，中国联合网络通信有限公司研究院正高级工程师，主要研究方向为移动核心网新技术、5G/6G 核心网总体架构和关键技术、网络内生业务等。