

数字孪生赋能下的 6G 网络资源管控机制



Scheme of Resource Management in Digital Twin-Aided 6G Networks

程子豪/CHENG Zihao, 刘向南/LIU Xiangnan,
高宏伟/GAO Hongwei, 管婉青/GUAN Wanqing,
张海君/ZHANG Haijun

(北京科技大学, 中国 北京 100083)
(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20230620.1434.008.html>

网络出版日期: 2023-06-25

收稿日期: 2023-04-20

摘要: 如何提高资源利用率, 高效分配和管理稀缺的无线通信资源, 是发展未来移动网络通信技术的关键。数字孪生技术因其具有可以连接物理实体与数字模型的特性广泛应用于各个领域。建立数字孪生网络可以实现物理世界与信息世界交互与融合, 利用虚拟模型在物理实体的整个生命周期中进行仿真模拟、辅助优化决策, 有助于控制和优化物理实体。对移动通信场景下的数字孪生网络建模方法进行阐释, 讨论了面向数字孪生的传统无线资源、新型无线资源管理和人工智能赋能下数字孪生技术在无线资源管理方面的应用。

关键词: 数字孪生; 6G 网络; 无线资源管理; 人工智能; 区块链技术

Abstract: How to improve resource utilization and efficiently allocate and manage scarce radio resources is the key to developing future mobile network communication technology. Digital twin technology is widely applied in various fields due to its ability to connect physical entities with digital models. By establishing a digital twin network, the physical world and the information world can interact and integrate, and virtual models can be used to simulate and optimize decisions for physical entities. The modeling method of digital twin networks in mobile communication scenarios is introduced. The traditional wireless resources and new wireless resource management under the digital twin technology are discussed. Meanwhile, with the aid of artificial intelligence, the digital twin in radio resource management is elaborated.

Keywords: digital twin; 6G network; radio resource management; artificial intelligence; blockchain technology

引用格式: 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): 39-45. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303008

Citation: 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. DOI:10.12142/ZTETJ.202303008

当前, 随着6G通信技术的不断更新迭代以及新业务的不断涌现, 人们对于通信的需求持续增加。新需求具有计算密集和高时延敏感的特性, 因此需要6G网络提供低时延、高可靠、易管理的服务保障, 这给6G网络资源管理带来了挑战。同时随着硬件设施、网络架构的进一步升级, 网络资源不再局限于速率、时隙、频谱等传统资源, 还包括新兴的计算、缓存资源, 这进一步加大了新一代无线通信资源管控的难度。此外, 由网络中大量难以预测的用户行为造成的无线网络状态实时变化, 也对网络资源管理提出了挑战。由于缺乏有效的虚拟验证平台, 实时变化的网络优化策

略不得不直接作用于现有的网络, 而这给网络带来了较大的风险^[1]。这些均使得人们迫切地想要应用学科建模、虚拟仿真技术将现有网络数字化, 推动数字孪生技术与新一代移动通信技术的融合。

数字孪生是一种集成多物理、多尺度、多学科属性, 具有实时同步、忠实映射、高保真度特性, 能够实现物理世界与信息世界交互与融合的技术手段^[2]。应用数字孪生技术可以实现物理实体整个生命周期的虚拟数字化。这说明在时间维度上, 物理实体要与其数字孪生模型保持状态同步。具体而言, 通过物理实体与虚拟模型双向实时的数据交互, 物理实体将实时参数发送给数字孪生模型。数字孪生模型基于接收到的实时数据更新状态, 并通过建模和仿真分析对物理实体下一时刻的状态做出预测分析, 并将结果反馈给物理实

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目 (U22B2003)

体,从而实现对物理实体的控制和优化。值得一提的是,应用数字孪生网络技术可以有效地辅助网络实时捕获异常^[3]。

随着6G移动通信技术的发展,人们对应用流程自动化的需求持续提高,而实现自动化的核心是大量的数据。这需要通信网络提供快速、可靠的传输服务,在有限的资源下传输尽可能多的数据,而高效的资源管理策略是实现这些需求的关键。6G移动网络将实现虚拟现实、全息技术、物联网等新型应用,这说明连接到移动通信网络中的不仅是人,还会有汽车、可穿戴设备、机器人等智能终端。如何有效地管理不同类型的终端并有效地处理多模态的数据,是6G移动网络资源管理的关键。对于大规模的移动通信网络,应用人工智能技术可以有效地处理不同类型的数据,辅助制定网络资源管理策略。因此,高效地融合人工智能与新一代移动通信技术是推动未来6G移动网络发展的关键因素。

数字孪生可以为不同类型的终端构建相应的数字孪生模型,并在虚拟空间中实现统一管理、控制和优化。同时,数字孪生网络中存储的大量数据和对应物理实体的虚拟模型可以辅助人工智能模型的训练。因此,融合数字孪生技术与移动网络资源管控技术,是新一代移动通信技术的潜在发展方向。VAN H.等利用数字孪生技术将基于超可靠低时延(URLLC)的链路计算密集型网络虚拟化,对边缘服务器进行建模,并以此优化整个系统的资源分配^[4]。为解决移动用户终端因计算资源和存储资源不足而无法有效训练神经网络的问题,LIU T.等提出数字孪生边缘网络架构,利用数字孪生收集到的大量数据辅助移动用户终端进行计算任务卸载,一定程度上提高了网络的整体性能^[5]。由此可见,数字孪生技术可以有效地辅助资源分配算法的求解。数字孪生技术本质上是虚拟模型对物理实体的仿真技术。也就是说,没有对物理实体的精确建模,数字孪生技术就无法完成后续的仿真、模拟、优化等。上述研究只是对某一具体场景下的通信系统进行建模。对于各类异构网络,如何准确地建立起高保真的数字孪生网络模型,仍是融合数字孪生和新一代通信技术的关键问题。

数字孪生技术的本质是虚拟模型对物理实体的仿真,而驱动数字孪生技术的是物理实体与虚拟模型间实时的数据交互,这对虚-实间可靠的连接与交互提出了挑战。同时,与物理实体网络类似,数字孪生网络完成特定的模拟仿真任务,需要依靠虚拟模型间的相互配合,这也需要数据在虚拟环境中实时交互。数字孪生连接与交互的内涵已经被定义,相应的“感知-通信-映射-联动-融合”连接与交互的理论体系也被提出^[6]。JIANG H.等提出了基于物联网和大数据的数据交互模型,对物理实体与虚拟模型间的数据传感、处

理、传输、存储和分析等相关功能进行了阐释^[7],但是对于连接与交互技术的具体实现和应遵守的准则缺少明确的定义。在数字孪生融合移动通信技术实现的过程中,如何满足较高的数据交互实时性、安全性要求,是实现数字孪生技术的一个挑战。基于上述问题,本文将探讨数字孪生赋能下的6G网络资源管控机制。

1 移动通信场景下的数字孪生网络建模

数字孪生网络由物理实体网络和与其对应的虚拟孪生体组成,二者通过数据的双向实时交互使状态保持同步。从上述定义可以看出,数字孪生网络基于数据创建模型,即通过对物理实体网络数据进行收集来构建目标网络模型。但是通信网络具有节点和链路数量多、网络信息复杂、拓扑结构动态变化的特点,这对构建各类异构网络的数字孪生模型提出了挑战。对目标网络进行精准建模,并描述网络中各层次的信息,是数字孪生技术实现高效仿真、控制、分析和诊断的关键。

1.1 数字孪生网络拓扑结构及功能

数字孪生网络包含物理空间要素和虚拟空间要素。在物理空间中存在大量的物理实体要素,这些实体要素在通信网中主要分为网络节点要素、网络链路要素和网络拓扑要素。其中,网络节点要素指的是通信网中各个节点的外部特征和内部属性(后简称属性),例如终端、交换机、路由器、服务器等,这些不同的节点由不同的软硬件体系组合而成;网络链路要素指的是网络中通信链路的属性,包含时延、带宽、吞吐量、时延带宽积等通信链路量化数据,是分析网络性能的重要指标;网络拓扑要素指的是通信网络的拓扑结构,例如星形、树形、总线型等。虚拟空间由大量数字孪生子模型构成。子模型通过对物理实体外在特征和内部逻辑的虚拟映射,分别对应物理空间中不同的物理实体。同时这些子模型可以组成功能不同的虚拟层,例如:用于描述物理空间要素实体信息的模型层,描述路由规则、安全规则等的通信协议层,实现用户行为和网络行为的行为层。这些不同的虚拟层构成完整的数字孪生网络。正如物理空间中通信网络各个节点相互配合为用户提供可靠的服务一样,虚拟世界中各个数字孪生子模型也可以相互配合完成特定任务。数字孪生网络功能的实现需要做到虚-实间数据实时交互,本文第2节会对此着重说明。

上文介绍了数字孪生网络不同的组成部分,分别为物理实体、数字孪生子模型、数字孪生网络、连接与交互。在实际应用中,系统会基于不同的场景,对上述组成部分进行不

同的组合，形成不同的架构，但大体都可分为3层：物理层、数字孪生网络层、计算应用层，如图1所示。

1) 物理层

物理层包括物理实体设备和设备的计算、存储资源。这些物理实体是客观存在的，例如基站、路由器、终端设备等。它们通过6G通信技术连接到附近的基站，例如：在基于数字孪生的URLLC边缘网络的任务卸载和资源分配系统中，物理层包括基于URLLC的移动边缘计算服务器架构、边缘网络中的任务卸载模型、边缘服务器接入点、天线、用户终端等物理设备。在数字孪生应用之前，这些设备已经可以构成一个功能完善的系统，相互配合完成特定任务。在融合数字孪生技术后，这些物理实体通过无线通信技术将实时数据上传给数字孪生网络，然后数字孪生网络处理这些数据，辅助物理层完成特定任务。相比于仅依靠物理层，利用数字孪生技术可以提高完成任务的效率和准确率，同时降低物理设备损坏的几率。

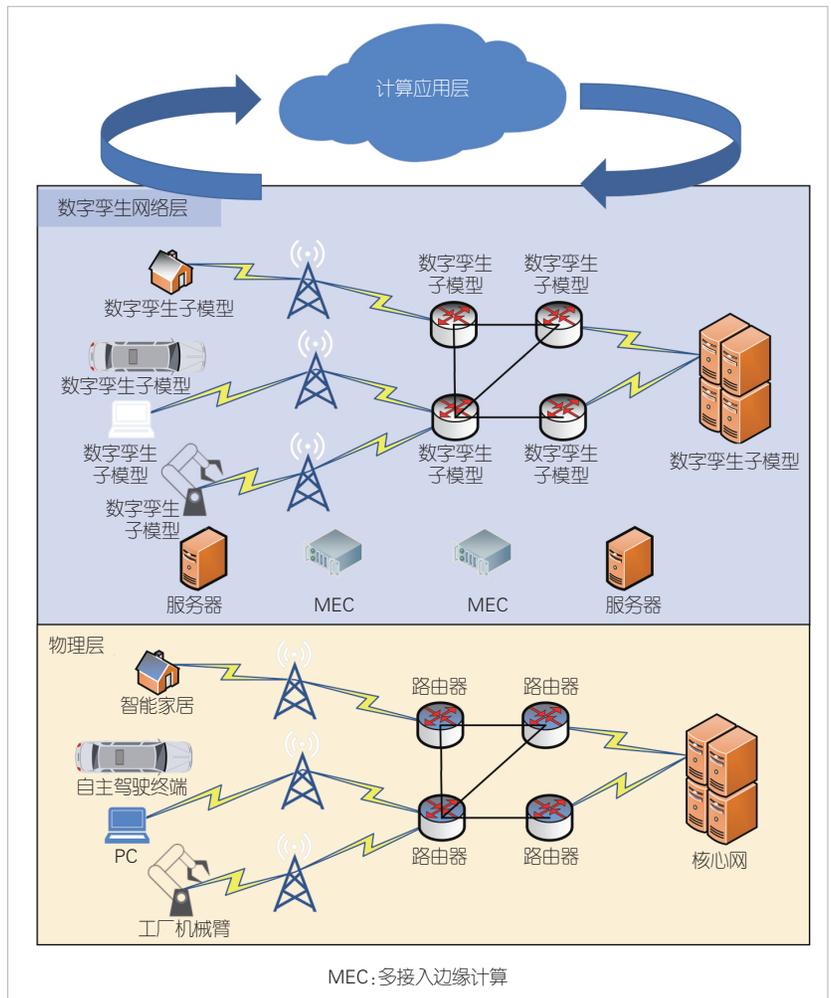
2) 数字孪生网络层

在数字孪生网络层，一些基站配备负责执行计算任务的移动边缘计算服务器，其他基站为终端用户提供无线通信服务。数字孪生网络中的虚拟模型由配备移动边缘计算服务器的基站建模和维护。上述模型分为两类：一类是物理实体模型，它是物理设备的仿真映射，即对硬件配置、实时状态信息和历史运行数据的映射；另一类是指向性服务模型，它是针对某一特定应用而建立的轻量化映射模型，该模型并不需要收集物理实体的全部状态参数，只收集完成某特定功能必需的数据。以自动驾驶数字孪生网络为例，物理实体模型可以是一辆车的虚拟映射模型，这个模型拥有这辆车的参数，例如型号、体积，甚至是颜色；而指向性服务模型是专门用来支持自动驾驶服务的，它仅需要收集车辆的驾驶信息，不需要颜色这类对自动驾驶服务没有显著帮助的信息。上述数据的收集由物理层中多种类型的传感器完成。数据收集完成后，经传感器上传至移动边缘计算服务器，以便构建孪生网络数据库。数据库中不仅包含物理层的实时状态信息，还包含历史状态信息。在网络出现异常时，可以根据历史数据回溯物理实体状态，从而保持网络的正常运转。移动边缘计算服务器基于孪生网络数据库中的数据对物理实体的“几何-物理-逻辑-行为规则”4个方面进行建模，即对物理实体的几何特征、物理特性、行为操作、逻辑规范多方面进行虚拟仿真，从而构建其虚拟数字孪生子模型；对单元级虚拟模型构建完成后，要在逻辑空间上实现单元级模型到系统网络模型的构建，即基于数字孪生子模型搭建数字孪生网络。这需要以物理层中不同物理实体之间交互方式为基准，在数字孪生网络层中为不同数字孪生子模型间添加交互规则，从而使虚拟网络可以完成与物理层形式上完全等价的功能。

辑-行为规则”4个方面进行建模，即对物理实体的几何特征、物理特性、行为操作、逻辑规范多方面进行虚拟仿真，从而构建其虚拟数字孪生子模型；对单元级虚拟模型构建完成后，要在逻辑空间上实现单元级模型到系统网络模型的构建，即基于数字孪生子模型搭建数字孪生网络。这需要以物理层中不同物理实体之间交互方式为基准，在数字孪生网络层中为不同数字孪生子模型间添加交互规则，从而使虚拟网络可以完成与物理层形式上完全等价的功能。

3) 计算应用层

计算应用层分为计算模块和应用模块。其中，计算模块并不是必需的。当物理层包含的设备很少，对计算资源和存储资源的需求不大时，简单的任务完全可以由数字孪生网络层中的边缘计算服务器独立完成，并不需要将任务上传到计算应用层进行处理；当物理层规模很大，单独依靠边缘计算服务器不足以完成计算任务时，就需要配备计算模块来辅助计算。计算模块中配备了大量的计算和存储资源，可以有效



▲图1 移动通信场景下的数字孪生网络

地映射物理实体，并将数字孪生模型存储，为应用模块服务。应用模块利用已建模的数字孪生网络模拟仿真物理实体的真实行为，通过模拟不同的行为产生不同的业务需求，传达任务指令，使虚拟网络中模型相互配合完成相应的任务。模拟的用户行为可以是基于物理层用户真实行为的模拟仿真，也可以是数字孪生网络管理者为验证算法、检查网络故障行为而人为发出的虚拟指令。

1.2 面向数字孪生的双循环移动网络架构

当前网络按照功能可划分为两部分：接入网和核心网。根据国际电信联盟电信标准分局的定义，接入网是指核心网到用户之间的所有设备，由业务节点接口和用户网络接口之间的一系列传送实体组成，可为电信业务提供相应的支撑。核心网主要负责数据的交换、转发、接续、路由。在接入网中，传统技术通过光接入与无线接入技术的融合，使接入网的性能大大提升。然而，近些年出现了许多计算密集、时延要求高的新型业务，例如车联网、虚拟现实等。一种新技术的出现——计算任务卸载解决了移动端设备（例如手机）中计算资源有限的问题，即移动设备将计算资源要求高的任务卸载到边缘服务器中。相比于传统云计算，边缘服务器部署的位置与用户的距离更近。这样一来，数据通过一跳即可在超低时延下传输到拥有大量计算资源的服务器中。边缘服务器向周围用户实时传输数据，这与基于数据建模的数字孪生技术相符。因此，我们可以在接入网的边缘服务器中利用实时交互的数据，对物理空间中的通信设备进行建模，以对应数字孪生网络中的实体要素建模；根据实时交互的数据来更新模型参数，使数字孪生模型与物理实体状态保持一致。当网络中计算任务量大，并且原先网络中的边缘服务器无法同时满足任务卸载和数字孪生建模需求时，服务器将以任务卸载等能满足用户服务质量的业务需求为首要任务。此时，边缘服务器对数字孪生网络来说只起到传输数据的作用，它将物理层网络中的实时状态信息传输到计算应用层。计算应用层完成数字孪生子模型建模的任务。此外，当边缘服务器的存储资源不足时，系统可以利用云端存储部分数据，并在需要时通过网络将数据传输到客户端，从而节省了边缘服务器的存储资源。由此可见，边缘服务器可以在一定程度上解决接入网中物理实体要素的数字孪生建模问题。同时，目前商用的核心网已经实现了完全的虚拟化，只需要进行一些精简和适配即可构建核心网对应的数字孪生模型。

在新一代移动通信网络融合数字孪生技术后，移动网络架构可以描述为外循环和内循环相结合的分层结构，即双循环移动网络结构。外循环包含物理实体网络和数字孪生网

络。其中，物理实体网络是由接入网和核心网组成的完整移动通信网络，数字孪生网络在外循环中只提供数据传输的接口。外循环可满足用户通信需求，并负责传输虚-实间实时交互的数据。内循环由虚拟网络中的数字孪生模型组成。这些模型分别对应不同的物理实体，可以相互配合完成与物理实体网络相同的功能，负责对物理实体各项参数的不断迭代调优和仿真验证。具体来说，在处理实际需求时，新一代移动通信网络会根据物理实体网络构建数字孪生网络：首先由网络管理人员下达优化命令，数字孪生网络会以需求为导向执行内循环，在内部不断进行自我迭代和仿真模拟，直至虚拟环境中的网络性能达到网络运维预设的要求；在外循环中，物理实体网络接收到来自数字孪生网络的优化策略并在实际中运行，若发现实际结果与预期不符，则再将实时状态参数反馈给数字孪生网络。内外循环不断运转，驱动物理网络性能达到预设目标。其中，内循环迭代优化策略既可以采用人为设计静态算法，也可以利用智能技术动态“自学习”优化算法（将在3节中详细介绍）。内外循环运转的前提是虚-实间数据的实时交互，只有物理实体与其数字孪生模型保持状态同步，才能在内循环中进行正确的迭代优化。

2 数字孪生连接与交互

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。上文提到，只有获取强时效、高保真的数据，数字孪生网络才能够正确地更新状态，实现预设定的功能，而这需要虚-实之间可靠的连接与交互服务。对于数字孪生网络，连接与交互不仅包括虚拟模型与物理实体间的数据传输，还包括物理层内物理实体间的数据交互和数字孪生网络层内虚拟模型间的数据交互，如图2所示。依据数据交互主体的存在形式，连接与交互的形式包括实-实、虚-虚、虚-实3种方式。其中，虚-实连接与交互最为关键，它促使虚拟模型与物理实体高度耦合，以实现虚拟模型实时更新参数、物理实体及时得到反馈的良性循环。同时为了实现这种循环，虚-实间连接与交互需要满足实时性、准确性和安全性等要求。

2.1 数字孪生连接方式

1) 实-实连接与交互

实-实连接与交互是指物理实体间的通信行为，它保证了物理实体之间的数据交互和数据共享。实-实连接与交互发生在物理信道中，因此数据传输的速度、质量都会受到环

境的干扰。各种通信设备（如传感器、控制器等）与物联网网关、网络接入点和支持实-实之间通信的基站连接。此外，网络连接通过各种通信协议及低功耗广域网技术（如窄带物联网等）来实现。

2) 虚-虚连接与交互

虚-虚连接与交互是指利用虚拟模型映射发生在真实的物理实体之间的通信行为。虚-虚连接与交互的好处是数据传输建模。相对于物理实体间的传输数据模态的多样性，在虚拟模型中数据可以有效地数字化，从而提高数据传输速率，突破在物理实体中的时间约束。物理实体中的通信往往需要一定的时间成本，然而虚拟空间中的通信可以在非常短的时间内完成相同的通信行为。因此，我们可以用较低的时间成本来反映或模拟长时间的通信行为。相比于物理空间，某些给定的通信行为可以在逻辑空间中更早地发生。也正是因为这种时效性，物理实体可以利用数字孪生网络提前发出的反馈做出正确的优化、控制决策。同时虚拟环境相比于物理环境更加稳定，可以高保真地传输数据，提高传输数据的准确性。此外，实-实连接与交互会消耗无线频谱、功率等资源，而虚-虚连接与交互主要依赖数字孪生网络服务器的计算资源来模拟数据的传输行为。

3) 虚-实连接与交互

虚-实连接与交互是指物理实体通过无线通信技术与数字孪生对象实现信息传输，实时共享物理实体的数据，并接收数字孪生对象产生的反馈。与实-实连接与交互类似，

虚-实连接与交互也发生在真实物理信道中，因此传输的数据会受到周围环境的干扰；但相较于虚-虚连接与交互，虚-实、实-实连接与交互可直接利用现有的移动网络进行通信。实传向虚的数据主要为网络节点要素、网络链路要素和网络拓扑要素，具体包括网络状态参数、网元状态参数、网络拓扑结构等。这些数据可以分为驱动建模数据和驱动服务数据。其中，驱动建模数据可帮助网络对物理实体建模；驱动服务数据是指传输用户的行为、业务需求等数据，为数字孪生网络下达指令，使其完成仿真、优化决策等功能。虚传向实的数据主要为仿真得出的结果、下一时刻优化的控制决策。相应的通信技术主要为广域网无线通信技术，如5G蜂窝通信等。在这种情况下，物理实体是通过基站连接到无线接入网络的无线终端。该终端最后连接到互联网上的数字孪生网络。

2.2 数字孪生虚-实连接准则

虚-实连接与交互需要满足以下3个准则。

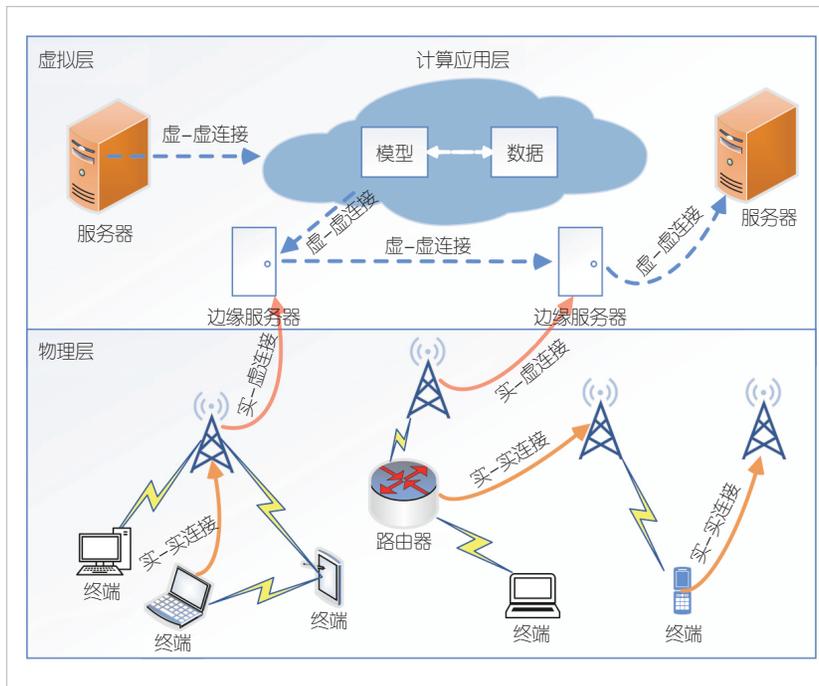
1) 实时性

在实时性要求严格的场景中，需要考虑实-虚通信延迟。等待时间的要求取决于物理实体和反馈数据两者对时间的敏感性。如果物理实体的演化严重依赖于虚拟孪生的实时反馈，那么减少实-虚的延迟是非常重要的，例如：在健康检测、远程手术和药物控制中，物理实体与其数字孪生之间的通信是超低延迟的；智能交通系统与高速公路预警系统中的虚拟系统之间的通信也要求低延迟。

2) 准确性

数字孪生与物理实体之间能否实现正确连接，数据交互是否真实有效，是保证数字孪生技术实现预测、分析、模拟等功能的基石。其中的准确性包括准确获取物理实体状态参数和准确传输数据。数字孪生需要正确获取物理实体的信息，并将实时数据准确可靠地传输给虚拟模型。与此同时，虚拟模型做出的决策、数据分析，也需要准确可靠地反馈给物理实体，然后物理实体才能进行下一步操作。例如：在通信网络资源分配中，错误的数据传输到数字孪生网络中，会导致数字孪生做出错误决策；紧接着物理实体接到反馈后会做出相对应的错误操作，又会导致网络堵塞，甚至网络崩溃。总之，数字孪生依赖模型进行预测和优化，而精确建模的关键是可靠、准确的通信。

3) 安全性



▲图2 数字孪生下的连接与交互

物理实体和数字孪生之间的数据传输对隐私性和安全性要求很高。在实向虚传输的数据中包含通信网络相关配置信息。若这部分数据被攻击，则虚拟网络将做出错误的仿真模拟，从而使实体网络做出错误的决策。同时，在数据传输过程中，用户的身份信息也需要加密。此外，在虚向实的反馈中，会包含网络下一时刻的状态参数和控制决策，若不加以防护，则会成为很大的网络安全隐患。

2.3 基于区块链数据共享与加密的虚-实连接与交互

如2.2节所述，在搭建数字孪生网络层时，虚-实间数据往来需要遵循实时性、准确性和安全性。然而，数字孪生网络的时变环境复杂，对网络计算资源需求量大，同时达到上述3点要求的难度很大。区块链作为一种新兴的、去中心化分布式账本技术，通过多方共识和交易备份，可为用户提供安全的数据共享环境。

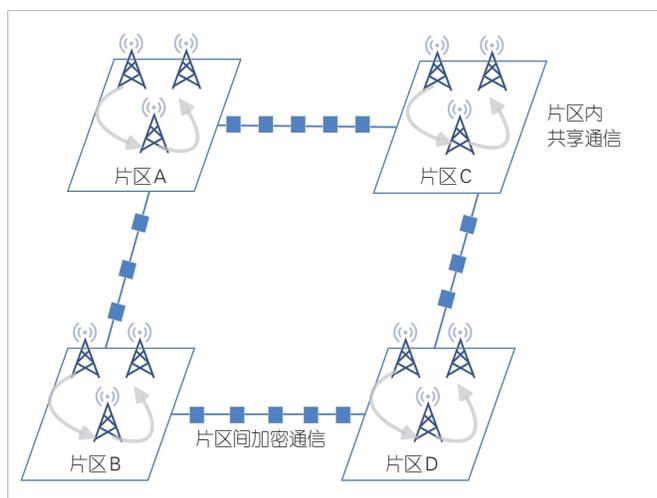
首先，区块链具有去中心化的特点。它可以帮助数字孪生物理实体与其对应的模型进行点对点数据传输。无论是虚拟模型依据物理实体数据更新参数，还是物理实体根据虚拟模型反馈的数据进行优化，都不需要第三方的介入，即有效减少数据传输的时延，可以满足虚-实传输实时性。其次，区块链还具有开放性。如图3所示，采用区块链分片技术，将不同服务区域的智能终端和接入点进行分片，在一个片区内的节点采用本地多播数据共享交易，可使片区内节点共享片区的所有数据（节点隐私除外），生成本地孪生数据共享链；片间边缘服务器采用基于委托权益证明的联盟区块链，验证全局孪生数据共享交易，生成全局孪生数据共享链^[9]。本地、全局孪生数据共享链通过信息交互，共同维护系统数字孪生数据共享链，从而使网络中配备有移动边缘计算服务器的基站，实时采集服务区域内的网络数据，构建区域内智能终端、接入点、网络拓扑、环境等数字孪生模型。同时，数字孪生网络中的模型可以及时获取网络中的动态参数，各个节点在接收到用户的行为时统一执行相同的任务，以达到仿真模拟的效果。此外，区块链也具备安全性。在物理实体与其相应数字孪生模型进行数据交互时，基于特定的加密算法使传输信息不易被人为干扰，从而使数字孪生模型可以正确地更新状态参数。同时，区块链不受任何节点的控制，数据存储在多个节点上，攻击者没有单一的入口点，有效保证了区块链片区中数据的安全，即保证了数字孪生网络中模型参数和网络状态参数的安全。最后，区块链具有不可篡改的特性。存储在区块链的信息都通过现代密码学进行加密，数据一旦进入区块链，任何信息都不能随意更改。当物理实体和数字孪生网络交互数据时，数据一旦发出便在片区内无法

修改，即输出可以高保真地传输。这满足了虚-实间数据通信的准确性要求，保证了数字孪生网络的精准建模。综上所述，利用区块链赋能虚-实连接与交互，可以实现高效安全的数据交互。

3 数字孪生助力6G网络资源分配

3.1 传统无线资源管理

随着新技术的出现和无线通信应用场景的多样化和复杂化，6G通信技术对时、频、空、能、码等多维传统无线资源的需求在迅速增长。然而，相对于需求而言，资源却是有限的，因此高效的无线资源管理成为移动通信网络发挥全部效用的关键。在通信系统的不同层次中，如何管理有限的资源以大幅提高资源利用率是一个重要研究方向，例如：在网络接入层，系统以最大化非正交多址接入系统的吞吐量为优化目标，将其建模为非凸优化问题，通过对问题的求解来证明非正交多址接入可以有效提升频谱资源的利用率；在网络层，可以使用交替乘法法进行多个节点的服务优化，在尽量满足用户服务质量的同时，保证每个网络节点不出现过载问题。随着网络规模的不断扩大，新算法的复杂度也越来越高。这些算法在迭代更新或实际验证时存在较大的试错风险和较高的验证成本。借助数字孪生技术，许多错误代价高的算法可以在虚拟网络中得到充分验证和高效仿真，从而在一定程度上降低安全隐患。具体而言，数字孪生模型可以将物理实体的最优解在虚拟映射中提前执行，然后利用云端强大的计算能力快速模拟出下一时刻的状态——若下一时刻状态符合用户服务质量、能耗、最小传输速率等约束条件，则可以证明物理实体在这一时刻的决策是正确的；若下一时刻状



▲图3 区块链数据共享与加密下的虚-实连接与交互

态不满足约束条件，通信系统存在性能隐患，则数字孪生网络会第一时间将信息反馈给物理实体，随后物理实体可以根据反馈信息修改分配策略，从而避免现实中通信系统的性能隐患，提高通信系统的可靠性。

3.2 计算、缓存等新型资源管理

随着6G通信技术的发展，业务的多样性和网络规模的迅速发展大大增加了资源管理问题的复杂度，而解决这些问题会消耗大量的计算资源。因此，如何管理以计算资源为代表的新型资源，成为了新一代通信发展的难题。数字孪生技术可以依托于多接入边缘计算（MEC）提供一个强大的计算框架，同时可以利用服务器的计算能力优化整个系统的资源分配。利用MEC技术，基于无线通信的动态特性，在多种资源约束下，以减少用户的服务延迟为优化目标，合理分配计算任务和计算资源可减少移动计算密集型通信网络的平均时延。相对于基础算法，数字孪生带来的计算框架提高了资源分配决策的效率。同时数字孪生技术可以支持深度学习架构，以找到最佳资源分配策略和计算卸载策略。数字孪生可以依托通信系统完善的软硬件体系，为6G通信网络提供丰富的计算和存储资源，提高新型资源分配决策的效率。

网络规模的快速增加给通信系统的计算资源消耗和缓存资源部署带来了挑战^[9]。随着网络规模的扩大，数据传输业务的激增导致传输链路拥堵，从而增加了信息回传的时延。因此，合理优化缓存部署策略显得尤为必要。将资源缓存在不同的地理位置可以减少信息回传的时延。然而，由于6G网络结构、用户行为、网络状态等参数实时变化，缓存部署策略的时效性变得尤为重要。如何在极短的时间内找到最佳的缓存部署位置，如何更新替换缓存部署策略，都需要做进一步研究。数字孪生技术可以通过仿真模拟得到通信网络在未来短时间内的状态，即根据用户的行为提前预测网络未来的各项参数。具体而言，数字孪生网络预测用户短期内需要的数据，然后物理实体根据预测结果将常用的数据部署在用户附近，并舍弃不需要的数据，从而进行动态管理缓存资源的部署。数字孪生网络可以利用历史用户行为数据预测长时间网络状态的变化，从而得到缓存资源的默认最佳部署方案；配合短时期预测对缓存部署进行动态微调，从而可有效地减少用户接收回传信息的时延，提高用户的服务质量。

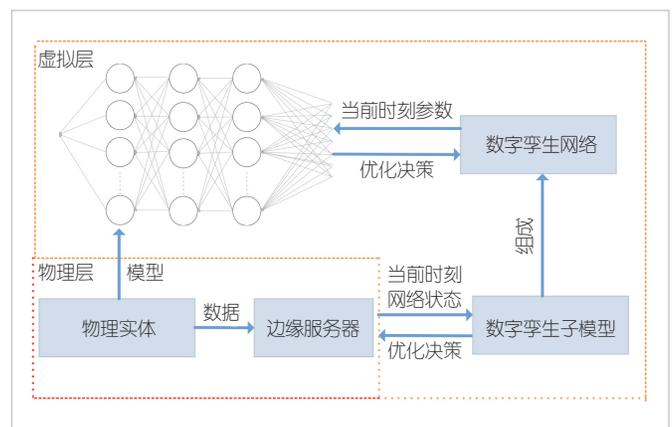
3.3 人工智能下的数字孪生在无线资源管理的应用

近年来，人工智能技术推动了各行业技术的快速发展。在新一代通信系统中，视频直播、网络电话等实时业务对网络系统提出巨大的挑战。当前通信系统中与用户服务质量相

关的因素不断增加，导致资源管理问题的复杂度不断提高。传统的静态资源分配和小规模资源管理已经无法满足多种分布式架构的需求^[10]。传统的算法往往只能以网络服务质量的某几项作为优化目标，忽略了其他的QoS因素。为了解决这些问题，新一代通信技术引入了人工智能，通过人工智能技术进行迭代学习，例如：应用深度确定性策略梯度算法得出用户调度和计算任务卸载优化算法。与传统算法相比，这种方式在提高收敛速度的同时，减小了系统延迟^[11]。然而，由于一些实际应用场景存在数据收集困难、模型参数敏感、训练迭代周期长等问题，人工智能智能技术难以发挥出最大优势。因此应用数字孪生技术可以有效地解决这些问题。

首先，数字孪生技术通过将物理实体的状态数字化，借助虚拟仿真技术生成丰富的训练集，并采用工具链自动标注数据，从而加速模型的训练过程；其次，数字孪生拥有丰富的计算资源，可以加速模型的收敛速度，减少模型的训练时间；最后，数字孪生还可以提供虚拟验证平台，以便对人工智能模型“自学习”的算法进行高效仿真验证，从而在低错误成本的前提下改进算法，如图4所示。此外，数字孪生技术还具有强大的历史状态储存能力，可以将网络状态参数和网元状态参数存储在本地或云端，在网络出现异常时将网络恢复至正常状态，还可以依据需求基于历史数据回溯网元状态。在引入人工智能技术赋能下的无线资源管理中，这些历史数据也可以作为数据集，帮助人工智能模型进行训练，从而不断优化人工智能模型，拟合更加复杂的模型。鉴于当前通信系统中的数学模型和传输速率的限制，传统技术在充分利用通信系统中不同模态的信息（如用户的位置、不同的天气条件等）时仍存在一定的困难。

随着人工智能技术的快速发展，现有模型可以拟合复杂的数据。其中，多模态强化学习技术可以应用于多模态无线通信资源的分配中，从而推动机器学习的发展。同时，数字



▲图4 人工智能赋能下的数字孪生无线资源管理策略

孪生技术具有传输数据量大、传输速率快、适应能力强等特点，可以与多模态通信技术相结合，弥补传统通信技术在跨模态信息之间潜在关系利用方面的不足。利用数字孪生技术可以解决人工智能技术应用在资源分配方面存在的问题，同时利用人工智能技术中的机器学习也可以辅助数字孪生建模。数字孪生网络层的任务是基于物理层传输的实时数据对物理实体进行建模，而实际上，这些实时数据的量级较大，对设备的计算资源提出了挑战。由于不同网元之间的外部特征和内部逻辑存在相似性，因此在建模的过程中我们可以利用人工智能技术学习模型的相似性，从而辅助设备对物理实体进行建模，减少软硬件资源消耗。

4 结束语

本文探讨了基于数字孪生的6G通信网络的资源管理问题，并提出了一种6G移动通信场景下的物理层-数字孪生网络层-计算应用层的3层数字孪生网络建模方法；探讨了实-实、虚-虚、虚-实3种连接与交互方式，并提出了一种基于区块链数据共享与加密的解决方案，以确保资源管理决策满足实时性、准确性和安全性要求；最后说明了数字孪生在6G网络资源管控中的具体应用，包括利用数字孪生技术对资源管理决策进行仿真，并根据网络状态进行验证，以降低网络异常的几率。数字孪生能够应用其强大的计算能力对复杂优化问题进行求解，并为物理实体提供优化决策反馈。

参考文献

- [1] 孙滔, 周斌, 段晓东, 等. 数字孪生网络(DTN): 概念、架构及关键技术 [J]. 自动化学报, 2021, 47(3): 569-582. DOI: 10.16383/j.aas.c210097
- [2] GUAN W Q, ZHANG H J, LEUNG V C M. Customized slicing for 6G: enforcing artificial intelligence on resource management [J]. IEEE network, 2021, 35(5): 264-271. DOI: 10.1109/MNET.011.2000644
- [3] WANG W L, TANG L, WANG C M, et al. Real-time analysis of multiple root causes for anomalies assisted by digital twin in NFV environment [J]. IEEE transactions on network and service management, 2022, 19(2): 905-921. DOI: 10.1109/TNSM.2022.3151249
- [4] VAN HUYNH D, NGUYEN V D, KHOSRAVIRAD S R, et al. URLLC edge networks with joint optimal user association, task offloading and resource allocation: a digital twin approach [J]. IEEE transactions on communications, 2022, 70(11): 7669-7682. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3205692
- [5] LIU T, TANG L, WANG W L, et al. Digital-twin-assisted task offloading based on edge collaboration in the digital twin edge network [J]. IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(2): 1427-1444. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3086961
- [6] 陶飞, 马昕, 戚庆林, 等. 数字孪生连接交互理论与关键技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(1): 1-10. DOI: 10.13196/j.cims.2023.01.001
- [7] JIANG H F, QIN S F, FU J L, et al. How to model and implement connections between physical and virtual models for digital twin application [J]. Journal of manufacturing systems, 2021, 58: 36-51. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.05.012
- [8] 蒋丽, 谢胜利, 田辉. 面向数字孪生边缘网络的区块链分片及资源自适应优化机制 [J]. 通信学报, 2023, 44(3): 12-23. DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023044
- [9] 龙隆, 刘子辰, 陆在旺, 等. 移动边缘网络下服务缓存与资源分配联合优化策略 [J]. 通信学报, 2023, 44(1): 64-74. DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023020

- [10] LIU X N, ZHANG H J, LONG K P, et al. Proximal policy optimization-based transmit beamforming and phase-shift design in an IRS-aided ISAC system for the THz band [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(7): 2056-2069. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3158696
- [11] ZHANG H J, FENG L Z, LIU X N, et al. User scheduling and task offloading in multi-tier computing 6G vehicular network [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(2): 446-456. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3227097

作者简介



程子豪, 北京科技大学在读本科生; 主要研究领域为数字孪生通信网络。



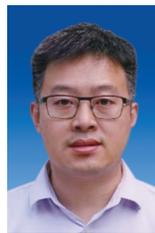
刘向南, 北京科技大学在读博士生; 主要研究领域为6G智能通信资源管理等。



高宏伟, 北京科技大学在读硕士生; 主要研究领域为通信感知一体化与智能通信等。



管婉青, 北京科技大学讲师; 主要研究方向为B5G/6G网络切片、无线网络资源管理等。



张海君, 北京科技大学教授、博士生导师; 主要研究方向为6G移动通信、人工智能与无线网络、机器学习与大数据等。