

人工智能技术赋能的 数字孪生 IP 网络研究及应用探讨

Research and Application Discussion on Digital Twin IP Network
Empowered by Artificial Intelligence Technology

庞 冉¹,石鸿伟^{2,4},苏 琛²,薛金明³,吕文祥¹,程智炜²(1. 中国联通研究院,北京 100048;2. 紫金山实验室,江苏 南京 211111;3. 中国联通江苏分公司,江苏 南京 210019;4. 东南大学网络空间安全学院,江苏 南京 210003)

Pang Ran¹,Shi Hongwei^{2,4},Su Chen²,Xue Jinming³,Lü Wenxiang¹,Cheng Zhiwei²(1. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China; 2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China; 3. China Unicom Jiangsu Branch, Nanjing 210019, China; 4. School of Cyber Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210003, China)

摘 要:

为解决 IP 承载网络运维复杂、优化策略效率低和网络管理智能化低等问题,从国家政策、行业标准、产业实践和学术研究等方面系统分析人工智能技术与数字孪生网络的发展现状,提出面向 IP 承载网的基于人工智能的数字孪生网络体系架构,深入研究人工智能技术与数字孪生网络结合的关键能力,同时对人工智能技术如何提升数字孪生网络的建模精度、赋能承载网络的运维管理以及提升网络优化效率的典型应用进行探讨。

关键词:

数字孪生网络;人工智能;IP 承载网;智能决策

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.03.005

文章编号:1007-3043(2025)03-0025-06

中图分类号:TN915

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

To address the issues of complex operations and maintenance (O&M), low optimization strategy efficiency, and low intelligence in network management within IP transport networks, it systematically analyzes the current development status of artificial intelligence (AI) technology and digital twin networks from the perspectives of national policies, industry standards, industrial practices, and academic research. It proposes an AI-based digital twin network architecture tailored for IP transport networks, and also delves into the key capabilities required for the integration of AI technology with digital twin networks. At the same time, it explores typical applications of AI technology in improving the modeling accuracy of digital twin networks, empowering O&M management of transport networks, and enhancing network optimization efficiency.

Keywords:

Digital twin networks; Artificial intelligence; IP transport networks; Intelligent decision-making

引用格式:庞冉,石鸿伟,苏琛,等. 人工智能技术赋能的数字孪生 IP 网络研究及应用探讨[J]. 邮电设计技术,2025(3):25-30.

1 概述

随着网络新兴业务和技术的不断涌现,现代 IP 网络在承载多样化应用的同时,面临着日益复杂的管理和优化挑战。传统的网络管理方法依赖人工经验和静态配置,难以适应大规模、动态变化的网络环境。而现有的优化算法在应对这些复杂需求时,往往效率低、适应性差。为应对这一局面,数字孪生网络作为

一种新型的网络管理和优化方案,逐渐受到关注。基于实时数字化的物理网络状态,数字孪生网络能提供精准的监控与管理,并通过模拟和预测进行优化,从而提升网络的灵活性和效率。

然而,数字孪生网络建模过程中仍面临许多技术难题。首先,数字孪生网络需要处理来自物理网络的大量异构数据,如设备状态、流量信息、链路质量等。如何高效地采集、存储和处理这些数据,并确保其准确性与时效性,是建模的挑战之一。其次,物理网络的异构性增加了建模的复杂性。不同厂商、协议标准

收稿日期:2025-02-06

的设备在接口和运行机制上存在差异,导致模型难以统一。最后,数字孪生网络还需支持实时优化和决策,这要求网络具备网络状态预测和快速决策能力。

人工智能技术,尤其是深度学习、强化学习、图神经网络等,已在处理大规模数据和复杂系统建模方面取得突破。人工智能技术通过自适应算法清洗、降维和聚类海量数据,提取有价值的信息,可以有效提升建模效率和精度。同时,针对物理网络异构性问题,通过可微调大模型等方法克服设备间差异,实现更高层次的抽象建模。特别是在网络优化和决策中,人工智能的作用尤为突出,利用深度学习等技术,可自动调整网络配置,优化资源利用率,并精确预测故障。

将人工智能技术与数字孪生网络结合,能为网络管理提供智能化、自动化的解决方案。人工智能在数据处理、建模和优化决策中具有很大优势,能有效提升数字孪生网络的效率与效果。目前,学术界和工业界已开展相关研究并取得进展。通过结合数字孪生技术的实时仿真与人工智能的自适应学习能力,未来的网络管理系统将能更好地应对复杂变化的网络环境,提供更精准、灵活的服务。然而,人工智能与数字孪生技术的结合还面临诸多挑战,例如,如何确保人工智能模型在动态复杂网络中的鲁棒性与稳定性,如何提升其在大规模网络中的计算效率等问题,这些问题还需进一步研究与创新。

2 基于人工智能技术的数字孪生网络研究现状

在数字孪生网络标准化方面,国内外的标准化组织以及运营商等机构开展了针对数字孪生网络概念、架构及关键技术的研究。国际电联电信标准化部门发布了首篇数字孪生网络标准《数字孪生网络-需求和架构》(Y.3090),给出了数字孪生网络的概念和需求^[1];互联网工程任务组也开展了“数字孪生网络:概念和参考架构”的立项工作^[2]。在国内,中国移动发布了《数字孪生网络(DTN)白皮书》,提出了“三层三域双闭环”的数字孪生网络架构,并给出了部分关键技术和应用场景^[3];中国联通发布了《中国联通数字孪生网络白皮书》,讨论了孪生网络架构和典型应用场景^[4]。

在基于机器学习与深度学习的孪生建模方面,利用机器学习和深度学习方法可以高效构建和优化数字孪生体。通过深度神经网络对网络状态进行建模,能够实现对复杂网络环境的精确描述^[5]。此外,基于深度学习的网络预测算法,如卷积神经网络和循环神

经网络,被广泛用于流量预测和资源调度,从而提升网络动态响应能力^[6]。图神经网络也可用于建立网络数字孪生模型,包括对网络节点、路由和调度规则的建模,从而实现对网络时延、抖动和丢包的快速评估^[7-11]。

在多模态数据融合与实时监控方面,实时数据采集和多模态数据融合是保证数字孪生高保真度的关键。人工智能技术能够整合来自网元设备、操作日志等多种数据源的数据,实现对网络状态的实时监控和精准更新^[12]。

在数字孪生网络的闭环控制和验证方法方面,近年来,生成式人工智能的发展为数字孪生网络带来了新的智能化手段。通过集成生成式人工智能模型,可以实现数字孪生状态的高精度仿真、特征抽象和智能决策,从而构建智能闭环的网络管理体系^[13]。

3 数字孪生网络与人工智能技术的融合

人工智能与数字孪生网络的结合为现代通信系统的智能化发展提供了强有力的支撑。随着网络规模的不断扩大和复杂度的增加,传统的网络管理和运维方法已经难以满足高效、灵活和自动化的需求。人工智能技术通过深度学习、机器学习等方法,使得数字孪生网络能够实时获取、分析和处理来自网络各个层面的数据,并基于这些数据做出智能决策。通过对网络状态、流量模型、设备性能等进行实时监控,人工智能能够预测网络的状态,并发现潜在的问题,以提前采取优化措施。这种预测和优化能力不仅提高了网络的性能和稳定性,还减少了人工干预,提高了网络管理的效率。同时,人工智能与数字孪生的结合还可以加速网络故障诊断和修复的过程,通过实时仿真与预测模型快速定位问题,降低了网络故障带来的影响,并提升了网络的可用性和安全性。因此,这种结合推动了网络管理向更加智能化、自动化的方向发展,使得网络能够更加高效地适应各种动态变化和挑战。

图1所示为人工智能赋能的数字孪生网络架构。具体来说,人工智能在数字孪生网络中的应用主要体现在2个方面,即人工智能赋能数字孪生网络的构建以及数字孪生网络助力人工智能的训练。首先,人工智能赋能数字孪生网络的构建包含了2种构建过程,一方面人工智能可以赋能数字孪生网络的数据收集、清洗和生成等,另一方面人工智能可以实现各类数据

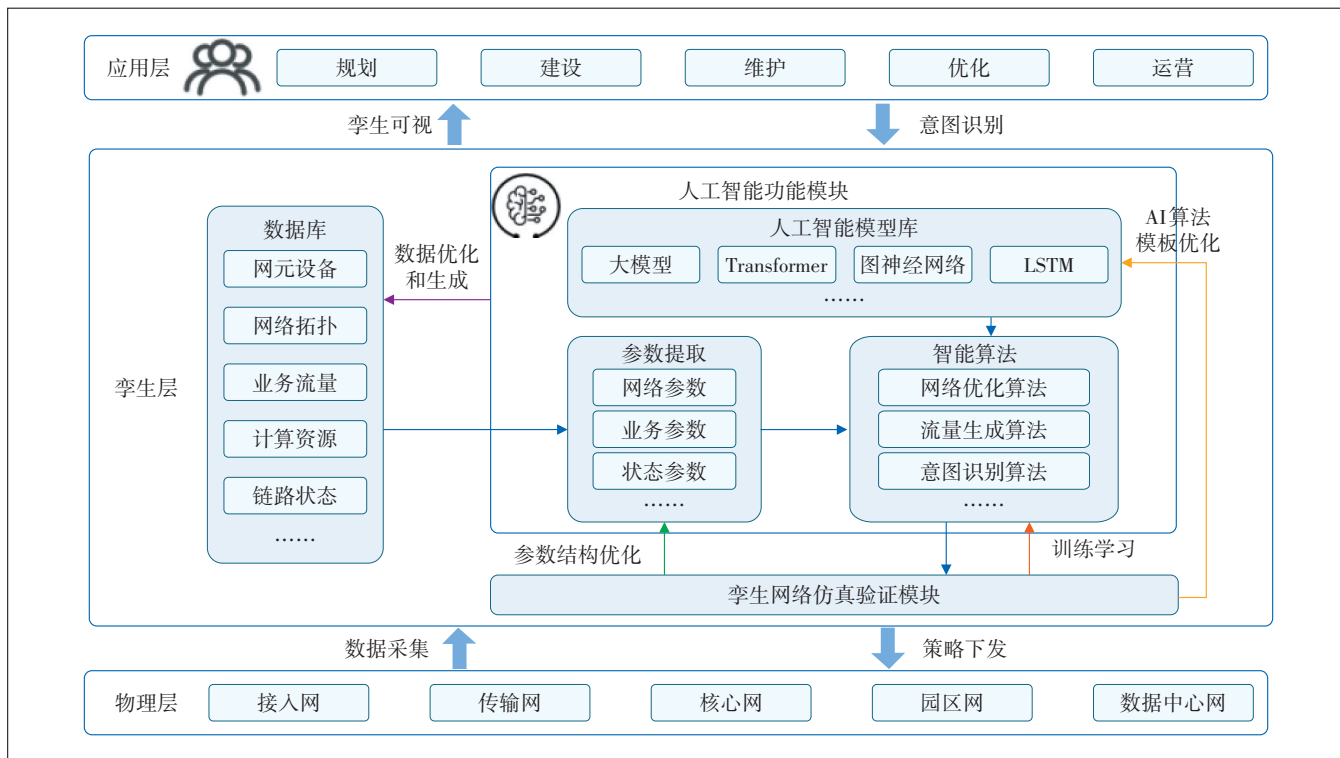


图1 人工智能赋能的数字孪生网络架构

的生成及优化。在数据收集、清洗和生成方面,人工智能通过自动化算法对网络中的海量数据进行高效处理,去除噪声并提取出关键特征,确保数据的质量和准确性。而在数据生成方面,人工智能能够通过流量生成模型,模拟不同网络环境下的流量模式。特别是,通过生成对网络行为有预测性的虚拟流量,人工智能能够在没有真实数据的情况下进行仿真和分析,从而提高网络设计和资源调度的准确性。这些生成的流量数据可用于测试网络的承载能力、应对突发流量的策略优化以及预见潜在的网络瓶颈。其次,数字孪生网络通过构建一个高度仿真的环境,为人工智能训练提供了重要支持。在这种环境中,人工智能模型可以使用虚拟网络的数据进行训练和验证,从而在真实部署前优化模型的表现。以自动驾驶领域为例,数字孪生网络可以模拟复杂的车联网场景,为人工智能模型提供多样化的训练数据,包括不同的交通状况、车与车之间的通信情况等。通过这些仿真数据,人工智能模型能够在复杂的环境下进行训练,提升其预测和决策能力。通过这种双向融合,人工智能与数字孪生网络不仅提升了网络管理的智能化水平,还加速了人工智能模型的训练过程,促进了网络与智能系统的深度协同,推动了网络技术的全面升级。

3.1 人工智能技术赋能数字孪生网络构建

在数字孪生网络的建设和运维过程中,数据是至关重要的组成部分。随着人工智能技术的融入,尤其是大模型、Transformer、图神经网络等深度学习与智能算法的应用,人工智能在数据处理和生成方面的能力得到了显著提升。图2所示为人工智能赋能数字孪生网络数据处理和数据生成的整体架构和关键模块,明确了人工智能如何在不同维度上推动数字孪生网络的发展。

首先,图2展示了人工智能如何通过一系列技术手段实现数据的采集并提升数据的质量和有效性。在数据采集过程中,人工智能技术可以实现智能化采样,将不同类型的数据进行不同频率的采样,在保证数据精度的同时降低了数据量。在数据处理过程中,人工智能通过数据清洗、数据标注与分类、特征提取与降维等步骤优化原始数据的结构和质量。具体来说,人工智能能够自动识别并去除数据中的噪声,确保数据的精确性;通过数据标注与分类,人工智能进一步对数据进行归类,使得后续的处理和分析更加高效。

其次,图2中的流量数据生成、配置数据生成和网络事件生成模块分别展示了人工智能在生成网络仿

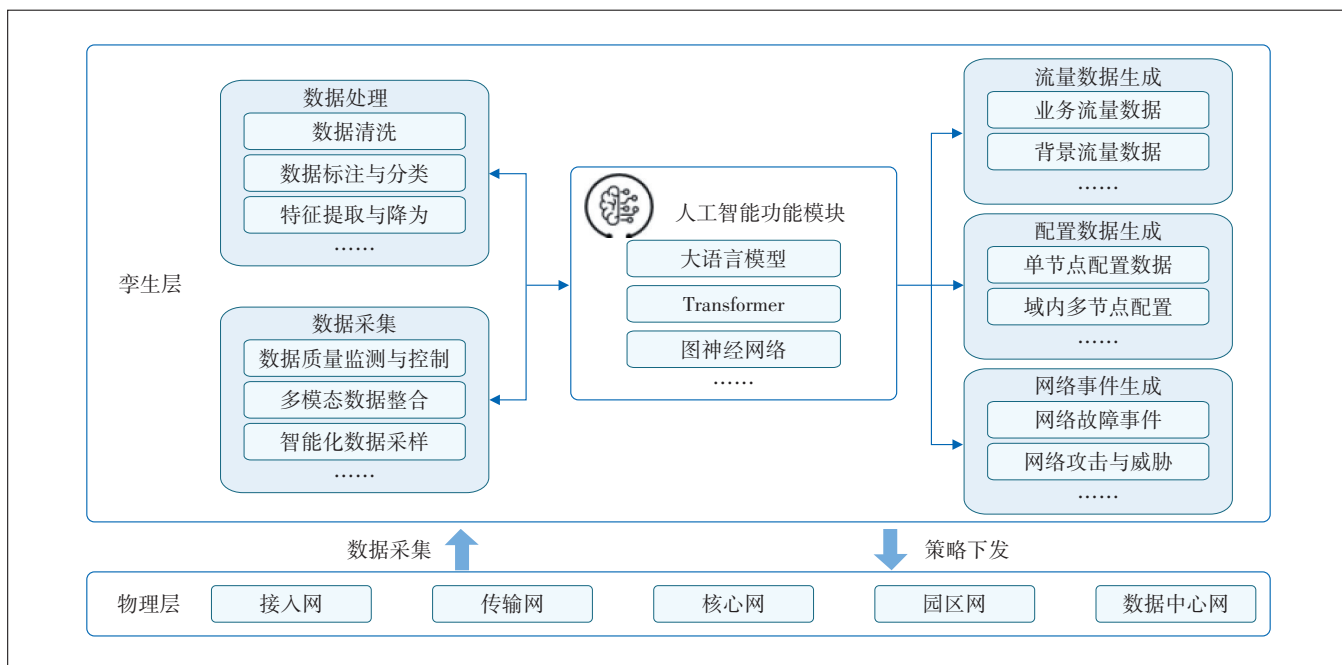


图2 人工智能赋能数字孪生网络数据处理和生成

真数据方面的能力。在流量数据生成模块中,人工智能通过模拟不同业务流量和背景流量的变化,为网络性能评估、优化以及容量规划提供了逼真的数据支持^[14];在配置数据生成模块中,人工智能根据网络节点的配置需求自动生成网元的配置参数,支撑了不同厂商、多种设备、多种协议的网元的快速构建;而在网络事件生成模块中,人工智能通过模拟网络故障事件、网络攻击与威胁等情景,为网络的安全性分析和故障预测提供重要数据,上述数据使得网络运维团队能够在数字孪生环境中提前识别问题并分析解决方案。

综上所述,基于人工智能的智能化数据处理和生成能力,有力支撑了数字孪生网络的构建与优化。人工智能不仅通过提升数据处理的精准度和效率,为数字孪生网络提供高质量的数据基础,而且通过生成各种虚拟数据,为网络的性能评估、故障诊断和优化调整提供丰富的支持。

3.2 数字孪生网络助力人工智能训练及验证

数字孪生网络作为物理网络的高保真虚拟映射,通过其虚实交互、动态仿真和闭环优化的特性,为人工智能模型的开发与部署提供了创新模式。图3所示为数字孪生网络助力人工智能训练与验证的关键模块和架构。

首先,数字孪生网络的实时映射特性,可为人工

智能模型提供更加灵活、准确和丰富的训练数据。一方面利用孪生映射获取真实物理网络的数据,包括网元参数、拓扑结构、流量统计、路由策略及故障日志等,通过与历史数据以及静态配置数据的融合,能够构建出高质量的数据集,准确反映网络在运行过程中的动态特征,为人工智能模型提供基础训练样本;另一方面,数字孪生网络还可利用仿真技术构造出传统方法难以采集的复杂网络场景。例如,在网络切片应用中,数字孪生能够模拟不同切片之间的资源竞争、干扰协同以及负载均衡问题,为训练模型提供多样化的训练样本。通过在虚拟环境中设计极端情景,进一步拓展模型对异常情况的学习能力,提高模型的鲁棒性和泛化性能。

其次,数字孪生网络为测试新的网络策略提供了一个与物理网络完全隔离但行为高度一致的虚拟环境。在该环境下,可以对网络配置、调整策略及资源分配方案进行全面模拟和实验。例如对网络未来的行为进行预测、评估新策略对关键性能指标(如延迟、吞吐量和可靠性)的影响,以及模拟过程中观测到的异常状态和突发事件信息。在数字孪生网络平台上完成模拟实验后,上述结果将作为反馈数据输入到人工智能训练系统中,为模型调整提供决策依据。因此基于数字孪生平台能够在安全可控的虚拟环境下反复测试和验证网络策略,大幅降低实际部署时可能面

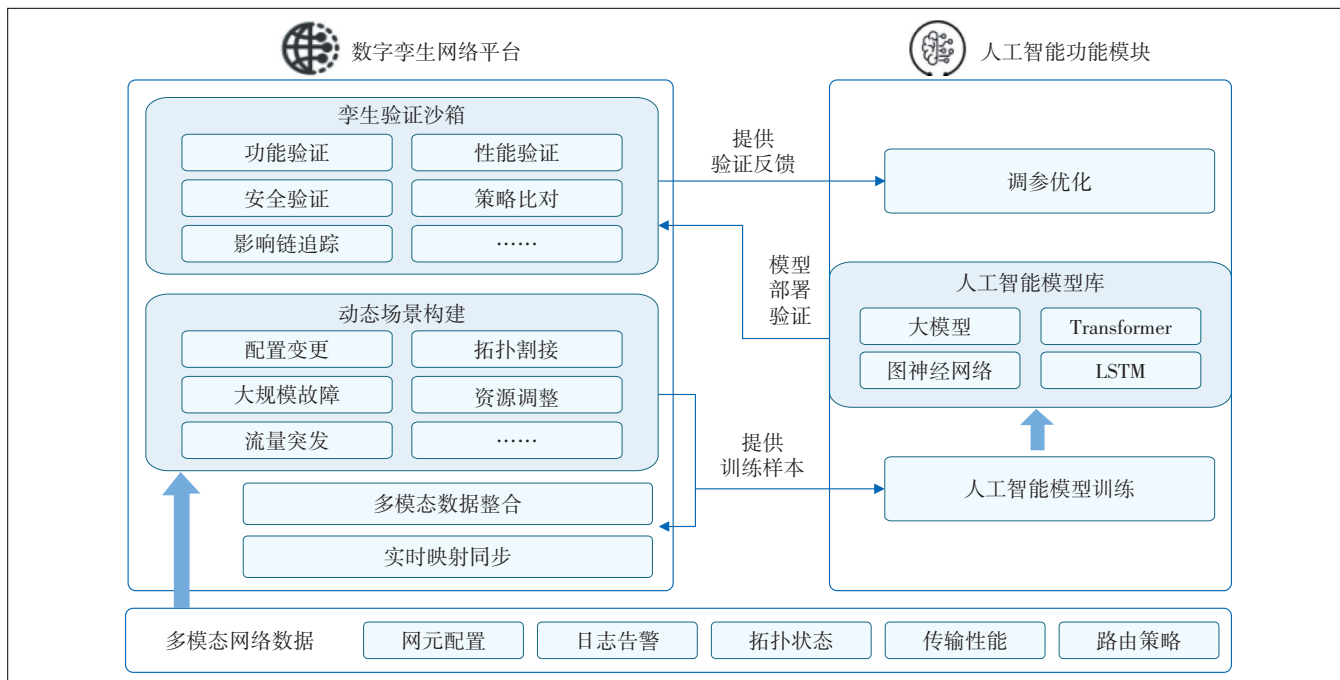


图3 数字孪生网络助力人工智能算法训练和验证

临的风险。

传统的人工智能预训练模型往往难以完全适应复杂多变的网络环境,而基于人类反馈的强化学习为解决这一问题提供了新的思路。在数字孪生网络环境中,通过人工设定的奖励机制和专家反馈,模型可以在每一次仿真实验后得到即时、定量的性能评估,并根据反馈调整参数,逐步优化决策策略。这种闭环优化流程提高了模型对现实网络环境的适应性,并为网络策略的快速迭代提供了保障。

4 人工智能使能的数字孪生网络典型应用

4.1 网络配置生成及验证

网络配置生成和验证是数字孪生网络建模的核心任务之一。将多种厂商的网络设备和协议实现无缝整合到统一的孪生网络中,并确保网络配置的正确性,通常需要消耗大量的人力和物力资源。此外,随着网络规模的不断扩大,如何高效处理海量配置信息以实现网络配置的快速生成是一个挑战。传统的基于规则的配置生成方法,尽管在小规模场景中具有一定优势,但在大规模网络环境中,由于缺乏足够的自动化和可扩展性,难以满足高效率和高准确度的需求。

因此,借助人工智能的生成与推理能力来实现网络配置的快速生成,成为提升数字孪生网络效率的关

键。这一过程不仅能够高效地将异构网络的配置信息精确地映射到数字孪生网络中,还能确保孪生网络真实反映物理网络的实际状态。例如,通过人工智能自动化生成和更新网络配置,能快速创建并测试新的网络配置,显著减少人工干预和错误率,进而提高工作效率,缩短新产品和服务的开发周期。

4.2 流量生成

高质量、具有多维时空特征的流量数据是支持网络仿真、验证和优化的核心基础。传统流量数据往往受限于采集手段和网络环境,难以全面反映复杂网络场景下的业务行为。近年来,基于生成模型的流量数据合成方法逐渐兴起,通过人工智能算法实现高保真、多维度流量数据的生成,为数字孪生网络提供了丰富的仿真数据支撑。

在多维度流量生成方面,生成对抗网络与扩散模型等深度生成模型已被证明在时序数据生成任务中具有显著优势。以NetDiffus^[15]为例,该方法首先将一维时序流量数据转换为二维图像,再利用扩散模型对图像进行合成,从而获得保真度高、细节丰富的合成流量数据。此类方法不仅能够模拟流量的统计特性,还能捕捉其时空动态变化,为网络仿真和性能评估提供可靠数据支撑。此外,通过数据增强技术,生成模型还能扩充训练数据集,进一步提高下游异常检测和分类等任务的鲁棒性。

4.3 网络性能预测

网络性能预测旨在通过建立高精度预测模型,对网络关键性能指标(如延时、吞吐量、丢包率等)进行预估,从而支持网络规划、资源调度及故障预防。借助数字孪生网络平台,物理网络的实时数据与历史数据能够为模型提供全面的支撑,使得预测结果更具针对性和实时性,为网络优化和智能运维提供科学依据。

近年来,深度强化学习算法已被应用于动态资源调度与网络状态预测,其通过不断迭代优化,实现了对网络性能的闭环预测和反馈。例如在网络规划场景中,通过对流量、时延及资源利用率等指标的预测,优化器能够提前识别潜在瓶颈,并给出针对性的资源调度方案,显著降低了网络部署的试错成本。

5 结束语

本文从国家政策、行业标准、产业实践和学术研究等多个维度对人工智能技术与数字孪生网络的发展现状进行了系统分析。通过深入研究人工智能与数字孪生网络的结合点,提出了一种面向IP承载网的基于人工智能的数字孪生网络体系架构,并探讨了人工智能技术如何在提升数字孪生网络建模精度、赋能承载网络的运维管理及优化网络效率等方面发挥关键作用。人工智能能够通过数据处理和优化算法,为数字孪生网络带来更加精准的建模和更高效的资源管理,尤其是在网络流量预测、动态资源调度和故障预测等领域的应用,为网络运营提供了强大的技术支持。未来,随着人工智能与数字孪生技术的进一步融合,IP承载网的智能化、自动化运维将成为可能,网络的灵活性和可靠性也将得到极大提升。

参考文献:

- [1] ITU T. Y.3090: digital twin network – requirements and architecture [EB/OL]. [2024-08-26]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3090-202202-1/en>.
- [2] ZHOU C, YANG H W, DUAN X D, et al. Network digital twin: concepts and reference architecture [EB/OL]. [2024-08-26]. <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-irtf-nmrg-network-digital-twin-arch/>.
- [3] 中国移动通信有限公司研究院. 数字孪生网络(DTN)白皮书[R/OL]. [2024-08-26]. <https://news.qq.com/rain/a/20211026A0BKCC00>.
- [4] 中国联通研究院联合浪潮通信, 亚信科技, 中兴通讯. 中国联通数字孪生网络白皮书[R/OL]. [2024-08-26]. https://it.sohu.com/a/810115044_120507942.

- [5] QIN B L, PAN H, DAI Y Y, et al. Machine and deep learning for digital twin networks: a survey [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(21): 34694–34716.
- [6] MUHAMMAD K, DAVID T, NASSISID G, et al. Integrating generative ai with network digital twins for enhanced network operations [EB/OL]. [2024-08-26]. <https://arxiv.org/abs/2406.17112>.
- [7] ALMASAN P, FERRIOL-GALMÉS M, PAILLISSÉ J, et al. Digital twin network: opportunities and challenges [EB/OL]. [2024-08-26]. <https://arxiv.org/abs/2201.01144>.
- [8] ALMASAN P, FERRIOL-GALMÉS M, PAILLISSÉ J, et al. Network digital twin: context, enabling technologies, and opportunities [J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(11): 22–27.
- [9] FERRIOL-GALMÉS M, SUÁREZ-VARELA J, PAILLISSÉ J, et al. Building a digital twin for network optimization using graph neural networks [J]. Computer Networks, 2022, 217: 109329.
- [10] FERRIOL-GALMÉS M, CHENG X L, SHI X, et al. FlowDT: a flow-aware digital twin for computer networks [C]//ICASSP 2022 – 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Singapore: IEEE, 2022: 8907–8911.
- [11] FERRIOL-GALMÉS M, RUSEK K, SUÁREZ-VARELA J, et al. RouteNet-Erlang: a graph neural network for network performance evaluation [C]//IEEE INFOCOM 2022 – IEEE Conference on Computer Communications. London: IEEE, 2022: 2018–2027.
- [12] HOSAMO H H, SVENNEVIG P R, SVIDT K, et al. A digital twin predictive maintenance framework of air handling units based on automatic fault detection and diagnostics [J]. Energy and Buildings, 2022, 261: 111988.
- [13] HUANG X Y, YANG H J, ZHOU C H, et al. When digital twin meets generative ai: intelligent closed-loop network management [J/OL]. IEEE Network, 2024; 1 [2025-01-26]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10818633>.
- [14] XU S Z, MARWAH M, ARLITT M, et al. STAN: synthetic network traffic generation with generative neural models [C]//Deployable Machine Learning for Security Defense. Cham: Springer, 2021: 3–29.
- [15] SIVAROOPAN N, BANDARA D, MADARASINGHA C, et al. Net-Diffus: network traffic generation by diffusion models through time-series imaging [J]. Computer Networks, 2024(251): 110616.

作者简介:

庞冉,毕业于北京邮电大学,高级工程师,硕士,主要从事下一代互联网技术研究工作;石鸿伟,毕业于东北大学,高级工程师,硕士,主要从事网络操作系统技术研究工作;苏琛,毕业于北京邮电大学,博士,主要从事数字孪生网络、确定性网络技术研究工作;薛金明,毕业于重庆师范大学,正高级工程师,硕士,主要从事光传送网、数据网运营及相关创新研究工作;吕文祥,毕业于北京交通大学,工程师,硕士,主要从事下一代互联网技术研究工作;程智炜,毕业于安徽大学,工程师,学士,主要从事数字孪生网络技术研究工作。