



专题：网络数字孪生

光传送网能力评估体系和成熟度模型研究

王郁¹, 秦忻², 李芳¹, 徐云斌¹

(1. 中国信息通信研究院, 北京 100091;

2. 中国电信股份有限公司北京研究院, 北京 100032)

摘要: 聚焦于光传送网 (optical transport network, OTN) 数字孪生能力评估体系和成熟度模型的构建与应用, 首先系统剖析了光传送网数字孪生能力评估需求和关键技术, 并提出能力评估体系应具备的核心特征, 然后对光传送网能力评估体系的构建进行研究, 以精准衡量技术水平和应用成效。最后, 基于构建的能力评价指标框架提出了光传送网数字孪生成熟度模型, 包括各阶段发展目标和评价因子, 从而勾勒出光传送网数字孪生技术和应用的未来发展演进方向和等级评价方法, 为该领域的持续发展提供参考。

关键词: 光传送网; 数字孪生; 能力评估; 评价指标; 成熟度

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025192

Research on the capability evaluation system and maturity model of optical transport network

WANG Yu¹, QIN Xin², LI Fang¹, XU Yunbin¹

1. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100091, China

2. Beijing Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Beijing 100032, China

Abstract: The construction and application of the evaluation system and maturity model for digital twin capabilities in optical transport network (OTN) were focused on. Firstly, the evaluation requirements and key technologies for digital twin capabilities in OTN were systematically analyzed, and the core characteristics that the evaluation system should possess were proposed. Subsequently, research was conducted on the construction of the evaluation system for OTN capabilities to accurately measure technical proficiency and application effectiveness. Finally, based on the constructed evaluation index framework for capabilities, a maturity model for digital twins in OTN was proposed, encompassing development goals and evaluation factors for each stage. This outlined the future evolution directions and hierarchical evaluation methods for digital twin technology and applications in OTN, providing a reference for the continuous development in this field.

Key words: OTN, digital twin, capability evaluation, evaluation indicator, maturity

收稿日期: 2025-04-16; 修回日期: 2025-06-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2022YFB2903200)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2903200)

0 引言

随着光传送网数字孪生技术逐步落地实践,如何全面科学地验证数字孪生能力,以评估技术发展水平,成为当前面临的问题之一。为构建科学合理的能力评估体系、评估方法和评价指标,全面评估光传送网数字孪生的技术水平和应用能力,推动数字孪生技术的不断成熟与融合,本文提出了一套可量化、可操作执行的能力评估体系、评价指标以及成熟度模型。

1 光传送网数字孪生能力评估需求分析

1.1 面向光传送网数字孪生各要素的能力评估需求

基于当前构建的光传送网数字孪生体系架构,孪生体具有的模型、数据、服务、交互和管理五大要素能够全面描述孪生体的主要能力特征^[1-5]。模型能力是孪生体的核心,包含了面向物理网络、设备、器件、拓扑、业务等不同实体的基础模型,以及面向典型场景的功能模型。模型准确度的评估成为模型能力的关键评价指标,是衡量模型是否可用的关键因素。数据能力融合了物理网络实际产生的数据和孪生体自身生成的数据,高质量的数据能力是保障模型仿真准确的前提,也是能力评估的关键要素之一。服务是面向用户的孪生能力开放,用户体验成为衡量服务能力水平的主要评价因素。交互能力反映了孪生体在虚拟空间与物理网络实体之间实现实时或准实时交互的能力,与数据同步,包括孪生体内部交互、孪生体对外交互及接口能力,及时性成为评价孪生体交互水平的核心标准。孪生体全生命周期管理能力是综合性评价要素,覆盖了模型、数据、服务等对象的全生命周期管理和可视化水平。因此,光传送网数字孪生能力评估需要覆盖这五大要素的能力水平,以全面构建光传送网数字孪生能力评估体系。

1.2 光传送网数字孪生全生命周期典型应用场景的能力评估需求

能力评估体系需要覆盖光传送网数字孪生全生命周期典型应用场景,以满足不同应用的评估诉求。由于光传送网管控和运营的复杂性,初始阶段对光传送网数字孪生进行全场景的能力评估具有较大挑战,因此,可以考虑某些典型应用场景在网络全生命周期中的重要性,优先对这些高优先级的典型场景进行能力评估,随着评估体系和方法的不断完善,再逐步扩展到全场景化的能力评估。可优先选择在现网环境难于操作执行且亟须预先做技术验证的应用场景,如当前运营商更为关注的层次化性能仿真与预测、网络切片规划与优化,以及多重故障模拟等典型场景。采取“先开始再完善”的设计和评估策略,从实际需求出发,直击现网运营管理痛点,从而更有效地推动数字孪生产品的落地和迭代优化,为孪生体的验证和测评提供指导。

1.3 构建可量化、可评测、可执行的数字孪生分级能力评估体系

当前光传送网数字孪生技术应用正处于新技术启航期,应用场景、应用模式等还在不断探索中,构建可操作、易于执行、适用于不同发展阶段的能力评估分级体系成为光传送网数字孪生能力评估需求之一。这要求评估体系需要具有可量化、可评测、可执行的特征,以确保评估结果的准确性、客观性和实用性。

可量化意味着评估体系需要能够将光传送网数字孪生的各种能力转化为一套全面而具体的能力评价指标体系和参考值,形成较为完整的能力评价标准,以便于进行比较和分析。例如,对于光层器件/设备的性能、系统传输性能等,通过计算模型的精度、召回率等指标来评估数字孪生模型的准确性。这些量化指标不仅能够直观地反映孪生能力的优劣,还能够为后续的优化决策提供数据支持。可评测要求评估体系能够设计合理的



评测方法和流程，可以对光传送网数字孪生能力进行全面、客观的测试。评测方法需要考虑光传送网不同应用场景和需求，包括正常情况下的功能和性能评测，以及异常情况下的稳定性、故障模拟能力评测等，以便于横向对比分析。同时，评测流程需要具有可重复性和可验证性，以确保评测结果的准确和可靠。通过可评测的评估体系，运营商可以及时发现网络孪生能力存在的问题，为孪生能力优化提供有力支持。可执行是数字孪生网络能力评估体系的实践需求，在评测过程中，要易于操作和客观判定。评估方法不仅需要给出评估分析结果，还要能够提供具体的优化建议和可执行的方案。

1.4 构建具有可扩展性和适应性的评估体系，满足不同发展阶段的评估目标

随着光传送网数字孪生技术的不断发展，能力评估体系可以按不同场景、不同能力维度、不同层次独立评估，需要具有可扩展性和适应性，能够灵活调整，以满足不同发展阶段的评估目标。其中，可扩展性主要体现在场景可扩展、能力可扩展、网络层次可扩展、评价指标体系可扩展、分级框架可迭代升级等方面。

构建数字孪生能力评估体系还需要考虑以下因素。

(1) 灵活的架构设计：数字孪生网络能力评估体系需要具备灵活的架构设计，能够根据不同的能力评估目标进行扩展或缩减，这种灵活性使得评估体系能够应对各种应用场景。

(2) 模块化的体系组成：可将评估体系划分为多个独立的模块，每个模块负责特定的评估任务。这种模块化设计使得评估体系能够轻松添加或删除模块，以适应不同的评估需求。同时，模块之间可以相对独立实现评测。

总之，通过灵活的架构设计和模块化的体系组成，光传送网数字孪生能力评估体系能够具备更强的适应性和可扩展性，以满足不同的评估需求。

2 数字孪生能力评估关键技术

2.1 数字孪生模型评估

数字孪生模型评估包括数据驱动模型和机理驱动模型的评估。数据驱动模型评估包括但不限于模型性能评估和模型泛化能力评估等。其中，模型性能评估又包括对分类模型和回归模型的评估。

对于分类模型的评估，目前主要有以下评估指标。

(1) 准确率 (Accuracy)：表示正确预测的样本数占总样本数的比例。

(2) 精确率 (Precision)：表示真正 (true positive, TP) 样本占有所有预测为正样本的比例，体现了模型对正样本的识别能力，表示为 $Precision = TP / (TP + FP)$ 。其中，TP 样本指的是模型预测为正例，且实际也为正例的样本数；假正 (false positive, FP) 样本指的是模型预测为正例，且实际为负例的样本数。

(3) 召回率 (Recall)：表示 TP 样本占有所有真实为正样本的比例，体现了模型发现正样本的能力，表示为 $Recall = TP / (TP + FN)$ 。其中，假负 (false negative, FN) 样本指的是模型预测为负例，但实际为正例的样本数。

(4) F1 分数：表示模型准确率和召回率的一种加权平均，表示为 $F1 = 2 \times (Precision \times Recall) / (Precision + Recall)$ 。

(5) 受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线：通过将真阳性率 (true positive rate, TPR) 和假阳性率 (false positive rate, FPR) 作为横、纵坐标来描绘分类器在不同阈值下的性能。其中，TPR 也被称为召回率，表示实际为正样本的样本中被正确预测为正样本的比例，FPR 表示实际为负样本的样本中被错误预测为正样本的比例。

(6) 曲线下面积 (area under the curve, AUC)：

表示 ROC 曲线下的面积。

对于回归模型的评估，主要有以下评估指标。

(1) 平均绝对误差 (mean absolute error, MAE): 表示预测值和观测值之间的绝对误差平均值。

(2) 均方误差 (mean square error, MSE): 表示模型预测值与实际值之间的平均平方误差。

(3) 均方根误差 (root mean squared error, RMSE): 表示预测值与真实值偏差的平方与观测次数比值的平方根。

(4) 残差平方和 (residual sum of squares, RSS): 将数据点与它在回归直线上相应位置的差异称为残差，将每个残差平方之后加起来称为残差平方和。

(5) 决定系数 (R-Square): 分子部分表示真实值与预测值的平方差之和，分母部分表示真实

值与均值的平方差之和。 R^2 值越接近 1，说明模型预测效果越好。

不同模型性能评估指标特点及适用范围见表 1。

对于数据驱动模型，根据数据量大小及模型的泛化性，有以下常用的评估指标。

(1) K 折交叉验证 (K -fold cross validation): 将数据集分成 K 个子集，每次选择一个子集作为验证集，其余 $K-1$ 个子集作为训练集，最后将 K 次验证结果的平均值作为模型的性能评估指标。其优点是能够平衡偏差和方差，充分利用数据，但计算成本较高，适用于大数据量的情况，以及模型选择和参数调整阶段。

(2) 留一法交叉验证: 当数据集较小时，每次只留下一个样本作为验证集，其余样本作为训练集，重复这一过程，直到数据集中的所有样本

表 1 不同模型性能评估指标特点及适用范围

模型	性能指标	特点	适用范围
分类模型	准确率	关注的是整体的正确性，即模型在所有预测中的正确比例	适用于类别分布相对均衡的场景
	精确率	关注的是正类预测的正确性，即模型预测为正类的样本中有多大比例是正确的	适用于正类样本较少且误报（假阳性）代价较高的场景
	召回率	关注的是模型对正类样本的捕获能力，即所有正样本中有多少被正确识别。高召回率意味着假阴性较少，但不一定意味着模型对正类预测准确	适用于关注假阴性成本较高的场景
	F1 分数	提供了一种在精确率和召回率之间的权衡，适用于需要同时考虑假阳性和假阴性情况的场景	适用于类别不平衡，且需要综合考虑精确率和召回率的二分类任务
	ROC 曲线	能全面评估模型的性能，不受类别不平衡的影响	适用于二分类问题，尤其是在样本不平衡的情况下，提供了不同阈值下模型性能的详细信息，适用于需要深入分析模型表现的场景
	AUC	AUC 值越接近 1，模型性能越好；AUC 值为 0.5 时，模型性能与随机猜测相当	适用于二分类问题，尤其是在样本不平衡的情况下，提供了一个简洁的评价指标，适用于评估二分类模型的整体性能
回归模型	MAE	反映了误差的平均绝对大小，对异常值不敏感	适用于对误差的方向（正负）不敏感和对异常值敏感度要求不高的场景
	MSE	放大了较大的误差，对异常值敏感	适用于对大误差非常重视的场景，常用于模型训练中的损失函数
	RMSE	保持了 MSE 的特性，同时使得误差的量纲与原始数据相同，同样对异常值敏感	适用于需要评估模型在原数据尺度上的误差的场景，常用于报告模型误差，因为其单位与原数据一致
	RSS	本质上是未标准化的 MSE（未取平均值），同样对异常值敏感	在模型拟合过程中用来衡量总体误差，在比较不同模型时使用（数据集相同时）
	R-Square	取值范围在 0 到 1 之间，越接近 1 说明模型解释力越强。对异常值不如 MSE、RMSE 敏感，但也会受到一定影响	用于衡量模型对数据的拟合程度，适用于对解释变量总体变异的解释能力进行评价的场景



都作为验证集被验证过一次，然后将所有验证结果的平均值作为模型性能评估指标。其优点是无偏估计，数据利用率最大化，但计算成本极高，且可能导致高方差，适用于小数据量的情况，以及需要精确评估模型性能的场景。

机理驱动模型评估包括但不限于模型精度评估、计算效率评估以及模型可扩展性和灵活性评估等。

(1) 模型精度评估：通过与实际光传送网络的行为和数据进行对比，测量机理驱动模型仿真结果的准确性。

(2) 模型计算效率评估：测试机理驱动模型在不同网络规模和复杂度下的运算速度和资源占用情况。

(3) 模型可扩展性和灵活性评估：评估机理驱动模型能否适应不同规模和复杂度的光传送网络，以及在不同应用场景下的适应能力。

2.2 数字孪生数据评估

数字孪生数据评估包括数据质量评估和数据处理评估两方面。

数据质量评估包括数据完整性、准确性、一致性等常用指标，目前更受关注、更具可测评特性。随着评估技术的逐步成熟，将会引入时序性、可用性、有效性等更多指标参与数据质量的评估。用于网络数字孪生的数据质量评估方法见表2。

表2 用于网络数字孪生的数据质量评估方法

数据质量评估因子	评价方法
正确性	满足合法值的记录条数/全部被测记录条数
完整性	非空值记录条数/全部被测记录条数
一致性	满足条件的导出值
精确性	给定数据值集合/相应的正确值集合
范围	包含的实体信息/要求的实体信息
时效性	描述某实体的历史记录时间长度
生命周期	一个记录保存在数据仓库中的时间
获取性	一个时间间隔内获取数据的比例
唯一性	与唯一性记录冲突的数据的比例
时序性	描述数据仓库的时序特征
可用性	采集到的数据应用的比例
有效性	可用数据的更新频率

数据处理评估可以分为两个阶段：第一阶段是常见的数据处理过程，无论是机理驱动模型还是数据驱动模型，均需要完成此过程，主要包括数据的集成与合成、数据的预处理（清洗、去噪、插值处理、异常检测等）；第二阶段是针对数据驱动模型特有的数据处理过程，即在模型训练之前还需要进行的数据归一化、特征提取、数据降维、数据集划分等数据处理过程。

测试集的构建取决于实际的模型，一般而言，建议从实际生产环境中获取数据，并进行适当的脱敏处理。然而，也有一些场景，如正负样例数据不均衡，负例数据特别少但特征已知时，则可以考虑构造测试数据。构造测试数据时，最重要的是需要了解数据的特征，如取值范围、平均值、方差等，以确保构造出来的数据能够对一个充分泛化的模型产生较好的测试效果。

为了实现各种类型数据的统一表示，需要采用统一的数学模型。基于高维空间的张量数学模型，能够对多源数据进行统一表示，在高维空间中，每一个维度都对应一个数据特征，如时间、告警类型、单板类型等。各类型数据的各字段可用向量进行表示，其中数值可以直接表示，字符串等可以设定种类标识号进行转化，再通过张量数学模型嵌入操作，统一纳入高维空间中，从而实现所有数据的统一描述。

2.3 数字孪生管理评估

管理能力是对数字孪生技术的应用和运作的全面管理。评估数字孪生对实体世界中的对象、系统或过程进行建模、仿真、监测、分析和优化，以实现预测、决策和控制的能力。管理评估主要包括以下4种。

(1) 数据管理：包括数据采集评估、数据存储评估和数据访问评估3个方面。数据采集评估具备高效的数据采集机制，能够避免相同数据的重复采集，并能根据需求动态自适应地调整采集频率，同时设立独立的数据采集通道，确保不影

响正常网络管理。数据存储评估通过高效的数据压缩、合理的老化机制，实现历史数据的存储管理。数据访问评估按照高效的检索机制存储数据，提供灵活且快速的检索能力，同时提供高效的数据发布方式，以满足多应用并行访问的需求。

(2) 模型管理：支持模型的生命周期管理，能够根据实际需求构建准确的光网络数字孪生模型，包括基础模型的完整度、功能模型的完整度、模型的可视化、模型的灵活性和效率等。

(3) 服务管理：评估平台在服务实例的创建、配置、监控、维护、优化以及升级等方面的能力。

(4) 安全管理：评估平台在数据采集、存储、处理、传输等过程中是否具备完善的安全机制，如数据加密、权限控制、审计日志等。

2.4 数字孪生服务评估

数字孪生服务层面向应用层和管控系统的各种应用提供接口服务，基于所构建的模型，在网络运维过程中提供服务支撑，主要包括网络规划服务、网络健康度评估服务、网络故障分析服务和网络仿真服务等，需要从可用性评估和安全性评估两方面对数字孪生服务进行评估。

(1) 可用性评估：主要评估数字孪生各项子服务的可用性，子服务的可用性与子服务正常运行时间等因素相关，子服务正常运行的时间越长，表明子服务的可用性越高。

(2) 安全性评估：包括子服务内安全和子服务间安全，特别是在孪生系统中，需要保证每个孪生子服务都实现相应的安全保证机制，包括系统自身安全、访问安全等。

2.5 数字孪生交互评估

(1) 南向接口：数字孪生与物理网络之间的接口，负责将物理网络的实时数据传输到数字孪生中，包括设备状态、流量负载、链路性能等。南向接口的关键指标：一是保真性，南向接口应准确地传递物理网络的数据，确保数字孪生模型与实际网络状态匹配；二是实时性，南向接口需

要快速传输数据，以便数字孪生网络能够实时反映物理网络的变化。

(2) 北向接口：数字孪生与网络应用之间的接口，允许应用程序访问数字孪生网络的模型和数据，以支持网络管理、优化和故障诊断。北向接口的关键指标：一是灵活性，北向接口应能够适应不同类型的网络应用，如性能监控、故障预测、优化验证等，上层应用可根据各自需求灵活调用数字孪生的各项能力；二是可扩展性，北向接口需要支持不断变化的网络应用需求，当设备类型、网络拓扑架构等变化时，要保持接口格式稳定。

(3) 东西向接口：旨在实现传统管控系统与数字孪生体之间的信息及控制交互。

3 光传送网数字孪生能力评估体系构建

3.1 能力评估框架

基于光传送网数字孪生总体架构^[5]，孪生能力通过应用层典型场景的应用服务来驱动，本文围绕模型、数据、服务、交互和管理五大要素进行孪生能力类的划分。因此，按网络智能运营场景、能力类和能力评价指标3个维度模块化构建光传送网数字孪生能力评估体系，如图1所示。该体系根据实际应用需求，可以灵活选取特定的典型应用场景、能力类和能力评价指标，具备一定的灵活性和可扩展性。

(1) 运营场景：能力评估体系需要面向光传送网全生命周期的典型应用场景，主要包括网络的规划与建设场景、运营场景、维护场景，以及优化场景。同时，能力评估体系需要具有典型场景的可扩展性，以满足不同阶段的应用评估需求。

(2) 能力类：能力评估体系需要对模型、数据、服务、交互和管理孪生体五大能力要素划分能力类，并分别进行评估，以全面反映各要素的能力水平。

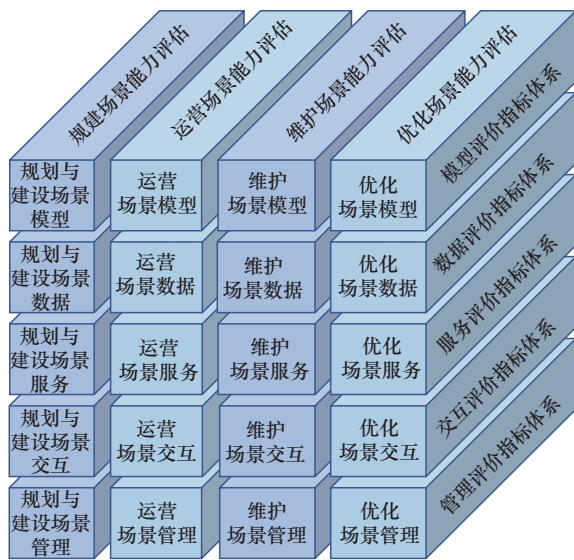


图1 光传送网数字孪生能力评估体系

(3) 能力评价指标体系：全面构建面向各要素的能力评价指标体系，并提出指标分级评估要求，不同指标根据发展目标划分的等级数量不同，以实现可量化、可评测、可执行的能力评估需求。

光传送网数字孪生能力评估体系需要覆盖网络全生命周期过程，包含网络规划与建设、网络运营、网络维护和网络优化场景4个环节；能力类按要素划分，包括模型、数据、服务、交互和管理五大能力类，另包括孪生体整体能力的评估。结合目前主流的评估技术和测试能力，本文对每个能力类提出了若干能力评价指标，光传送网数字孪生能力类评价指标见表3。

光传送网数字孪生能力类评估主要包括以下方面。

(1) 模型能力评估：以孪生模型的构建、训练、推理、运行、优化、迁移等环节为核心的能

力评估过程。它以模型为中心，对模型的仿真效果进行评估，包括模型的功能和性能，更关注模型的仿真性能的评估，如准确率、及时率、泛化性、稳定性等。模型能力的评估应包含基础模型、功能模型和孪生模型整体的能力评估^[6-13]。

(2) 数据能力评估：以孪生数据的采集、处理、存储等环节为核心的能力评估过程。它以数据为中心，分析并评估数据的质量。

(3) 服务能力评估：以模型和数据的服务交付、服务体验、服务安全等环节为核心的能力评估过程。它以服务为中心，向外提供孪生能力的开放。

(4) 交互能力评估：以孪生体内部的数据交互和外部的数据交互，以及支撑各类交互的接口能力为核心（包括应用接口、东西向接口、南向接口、北向接口等）的评估过程^[14]。

(5) 管理能力评估：对孪生体模型、数据、服务、交互要素的管理能力，以及可视化能力等的评估过程。

(6) 孪生体整体能力评估：孪生体整体自身的功能和性能的评估过程。

光传送网能力评估指标的选取，原则上根据评估目标和评估对象来确定。根据评估指标影响程度的不同，可以将能力评价指标按等级进行划分，分为A级、B级和C级。其中，A级为重要指标，是评估能力类的必选指标；B级为参考指标，作为各能力类的表征参数，初期可不要求量化评估；C级为一般指标，基于当前数字孪生技术水平，可根据实际评测需求选择确定。

光传送网数字孪生能力评价指标体系如图2

表3 光传送网数字孪生能力类评价指标

光传送网全生命周期过程	能力类（指标数量/个）						评价指标合计/个
规划与建设场景	模型能力（15）	数据能力（10）	服务能力（8）	交互能力（14）	管理能力（6）	孪生体整体能力（6）	59
运营场景							
维护场景							
优化场景							

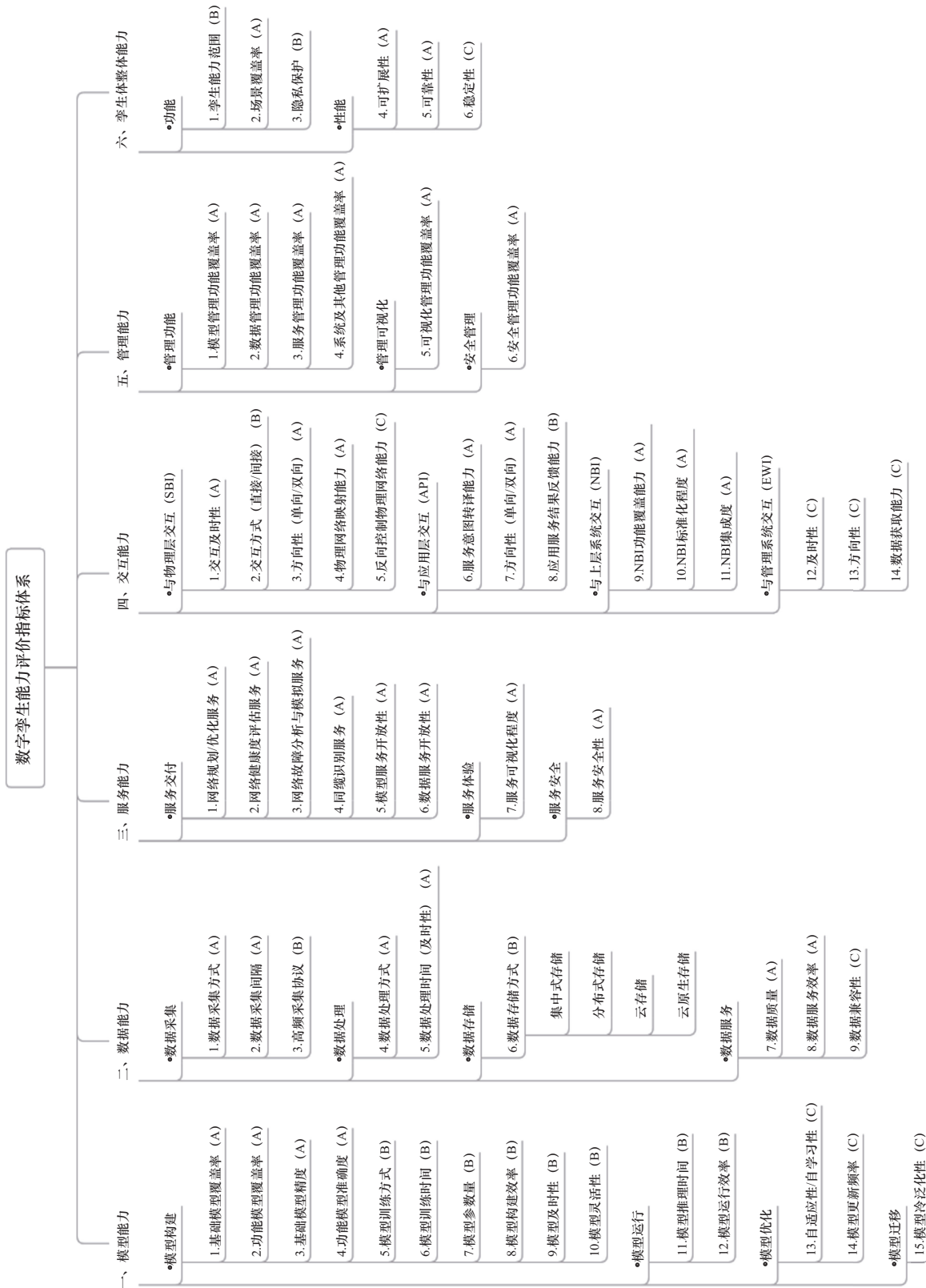


图2 光传送网数字孪生能力评价指标体系



所示。

3.2 关键能力评价指标框架

鉴于图2提出的评价指标较多，本文从中选取关键能力评价指标，以进一步列举说明指标描述和分级框架。

模型能力关键评价指标描述见表4。

数据能力关键评价指标描述见表5。

服务能力关键评价指标描述见表6。

交互能力关键评价指标描述见表7。

管理与孪生体能力关键评价指标描述见表8。

3.3 能力评估方法及应用

光传送网能力评估方法和过程包括以下步骤。

步骤1 确定评估对象：评估对象是选定的数字孪生网络层次，如光传送网光层，并确定评估对象是否为跨域、单域或多域场景。

步骤2 确定评估范围：评估范围是选定的

表4 模型能力关键评价指标描述

评价指标名称	指标描述	指标分级框架
基础模型精度 (base model accuracy, BMA)	<p>针对指定性能仿真场景和仿真周期，衡量仿真值与真实值之间的偏差，计算仿真值与真实值的MSE或绝对值RMSE，且不限于此</p> $BMA = MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_i - f(x_i))^2 \text{ 或 } BMA = RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_i - f(x_i))^2}$ <p>(其中，Y_i为仿真值，$f(x_i)$为真实值，N为样本数量。单位与$f(x_i)$单位相同)</p>	<p>BMA1: 不支持网元级性能仿真； BMA2: 支持网元级性能仿真，BMA值相对偏大； BMA3: 支持BMA2，并支持简单系统性能仿真； BMA4: 支持BMA3，并支持器件/模块/光纤性能仿真； BMA5: 支持BMA4，并支持大规模传输系统性能仿真； BMA6: 支持BMA5，BMA值更优，误差最小</p>
功能模型-回归算法准确度 (functional model-regression algorithm accuracy, FM-RA)	<p>针对指定性能预测场景和预测周期，衡量预测值与真实值之间的偏差，计算预测值与真实值的MSE或绝对值RMSE，且不限于此</p> $FM-RA = MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_i - f(x_i))^2 \text{ 或 } FM-RA = RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_i - f(x_i))^2}$ <p>(其中，Y_i为预测值，$f(x_i)$为真实值，N为样本数量。单位与$f(x_i)$单位相同)</p>	<p>FM-RA1: 不支持性能预测模型； FM-RA2: 能正确预测出缓慢变化场景的变化趋势； FM-RA3: 支持FM-RA2，并支持预测周期性变化场景； FM-RA4: 支持FM-RA3，并支持预测非周期性（递增/递减/偏移等）变化场景； FM-RA5: 支持FM-RA4，并支持预测突发场景的变化场景； FM-RA6: 支持FM-RA5，并能预测以上全部场景的变化场景</p>
功能模型-分类算法准确度 (functional model-classification algorithm accuracy, FM-CA)	<p>正确预测的样本数占总样本数的比例。不限于以下统计方法：FM-CA = $\frac{N_{fm-ca}}{S_{fm-ca}} \times 100\%$ (其中，N_{fm-ca}为正确预测的样本数，S_{fm-ca}为样本总数。N_{fm-ca}、S_{fm-ca}均为正整数)</p>	<p>FM-CA1: 不支持此类模型； FM-CA2: 支持分析简单场景或小规模网络，FM-CA\geq70%； FM-CA3: 支持FM-CA2，FM-CA\geq80%； FM-CA4: 支持FM-CA3，FM-CA\geq90%； FM-CA5: 支持FM-CA4，并支持分析复杂场景或大规模网络，FM-CA\geq90%； FM-CA6: 支持FM-CA5，FM-CA可达100%</p>
模型训练方式 (model training method, MTM)	<p>针对数据驱动和混合驱动模型，模型训练的方式包括在线训练和离线训练。该指标等级越高，表明模型能力越高</p>	<p>MTM1: 模型训练采用离线方式； MTM2: 模型训练采用离线和在线混合方式，如初始模型构建采用离线方式，增量训练支持在线训练方式等； MTM3: 模型训练采用在线方式</p>
模型自适应性 (model adaptability, MA)	<p>衡量模型在运行过程中，受到干扰、噪声或异常状态影响时，参数和关联关系自动更新的能力。该指标等级越高，表明模型能力越高</p>	<p>MA1: 参数和关联关系只能手动更新； MA2: 参数和关联关系较少部分 (MA<30%) 可以自动更新； MA3: 参数和关联关系部分 (30%\leqMA<60%) 可以自动更新； MA4: 参数和关联关系大部分 (MA\geq60%) 可以自动更新； MA5: 参数和关联关系全部可以自动更新</p>

表5 数据能力关键评价指标描述

评价指标名称	指标描述	指标分级框架
数据采集方式 (data collection method, DCM)	从数字孪生物理层获取数据的方式是人工获取, 或是系统通过接口自动获取。该指标反映数据采集的智能化程度, 指标等级越高, 表明数据采集的智能化程度越高	DCM1: 人工采集物理设备全部数据, 或人工使用工具 (仪表) 定期测量数据; DCM2: 人工采集或定期测量大部分数据 (>50%), 系统自动采集少部分数据; DCM3: 人工采集或定期测量小部分数据 (<50%), 系统自动采集大部分数据; DCM4: 系统自动采集物理设备全部数据信息
数据采集间隔 (data collection interval, DCI)	在特定时间内对指定物理设备进行数据采集的时间间隔或量级	DCI1: 最小采集间隔支持小时级采集, 如 24 h 采集; DCI2: 支持 DCI1, 最小采集频率支持分钟级采集, 如 15 min 采集; DCI3: 支持 DCI2, 最小采集频率支持秒级采集, 采集间隔可按需设置; DCI4: 支持 DCI3, 最小采集频率支持毫秒级及以上采集, 采集间隔可按需设置
数据处理方式 (data processing method, DPM)	对获取的原始数据进行清洗、转换、整合等数据预处理, 方式可以是人工或自动处理。该指标反映数据处理过程的智能化程度, 指标等级越高, 表明自智等级越高	DPM1: 数据预处理过程全部由人工完成; DPM2: 数据预处理过程大部分由人工完成 (>50%), 少部分由系统自动完成; DPM3: 数据预处理过程小部分由人工完成 (<50%), 大部分由系统自动完成; DPM4: 数据预处理过程全部由系统自动完成
数据质量 (data quality, DQ)	衡量孪生体与物理层、应用层、管控系统之间进行数据传输、控制反馈等交互过程中数据服务的稳定性、准确性、完整性、一致性和唯一性。DQ = $\frac{S_{dq} - N_{dq}}{S_{dq}}$ (其中, N_{dq} 为漏传、重传、错传等异常记录条数, S_{dq} 为全部被测记录条数。 N_{dq} 、 S_{dq} 均为正整数)	DQ1: 数据服务过程中出现严重漏传、重传、错传等异常情况, DQ 小于 0.3; DQ2: 数据服务过程中频繁出现漏传、重传、错传等异常情况, DQ 小于 0.6; DQ3: 数据服务过程中偶尔出现漏传、重传、错传等异常情况, DQ 小于 0.8; DQ4: 数据服务过程中无漏传、重传、错传等情况, 而当采集频率发生变化 (提高/降低) 时, 数据交互中出现漏传、重传、错传等情况; DQ5: 数据服务过程中无漏传、重传、错传等; 当采集频率变化 (如升高/降低) 时, 数据交互具有自适应速度能力, 无漏传、重传、错传等现象

表6 服务能力关键评价指标描述

评价指标名称	指标描述	指标分级框架
模型服务开放性 (model service openness, MSO)	在指定场景下, 评估模型对外服务的能力, 包括是否提供对外服务访问接口、对外提供的模型服务能力, 以及对交换模型服务信息的开放程度。该指标等级越高, 表明开放性越高	MSO1: 没有模型接口, 不支持对外交换信息和对外提供模型服务; MSO2: 具有模型接口, 支持基础模型的查询、检索、存储等, 交换基础模型信息, 满足部分模型服务需求; MSO3: 支持 MSO2, 并支持功能模型服务, 满足高模型服务需求; MSO4: 支持 MSO3, 模型开放度最高, 完全满足模型服务需求
数据服务开放性 (data service openness, DSO)	在指定场景下, 评估对外提供数据服务的能力, 包括是否提供对外服务访问接口、对外提供的数据服务能力, 以及对交换数据服务的开放程度。该指标等级越高, 表明开放性越高	DSO1: 不支持数据服务对外开放能力; DSO2: 支持基本数据服务功能, 如数据收集、存储和检索等; DSO3: 支持 DSO2, 并支持批量处理、实时处理、数据发布/订阅等高级功能; DSO4: 支持 DSO3, 并支持数据分析和决策等智能功能
服务可视化程度 (service visualization level, SVL)	评估特定场景下面向服务的全生命周期的图形图像等可视化呈现水平, 可通过图形图像等信息方式呈现。该指标等级越高, 表明服务可视化水平越高	SVL1: 不支持面向服务的可视化; SVL2: 能显示基于服务的物理网络层传输系统、网元、拓扑和物理链路等; SVL3: 支持 SVL2, 并能以更精细的粒度显示基于服务的物理层和逻辑层网络、业务和状态, 包括传输系统、网元/单板/器件、物理链路、逻辑拓扑、业务等; SVL4: 支持 SVL3, 并支持基于服务的数据模型全生命周期可视化, 包括数据服务实例的创建、更新、组合和销毁等; SVL5: 支持 SVL4, 并支持基于服务的各种数据的网络仿真、模拟、优化、预测等数据分析过程的可视化; SVL6: 支持 SVL5, 能够及时显示网络数字孪生和物理网络之间的映射交互



表7 交互能力关键评价指标描述

评价指标名称	指标描述	指标分级框架
NBI 标准化程度 (interface standardization level, SLN)	数字孪生系统北向接口符合标准化要求的数目占全部标准化条目数的比例, 即接口一致性的符合程度。 $SLN = \frac{N_{sln}}{S_{sln}} \times 100\%$ (其中, N_{sln} 为符合一致性要求的条目数, S_{sln} 为全部被测接口一致性条目总数。 N_{sln} 、 S_{sln} 均为正整数)	SLN1: 不支持NBI, 或支持非标准NBI; SLN2: NBI少部分符合标准, 标准化率小于30%; SLN3: NBI部分符合标准, 标准化率在30%~70%; SLN4: NBI大部符合标准, 标准化率不少于70%; SLN5: NBI全部实现标准化, 标准化率可达100%
API 服务意图转译能力 (service intent translation capability, SITC)	将源自应用层用户发起的原始服务意图请求映射为传送领域系统可识别并可执行的指令或操作的能力。该指标反映服务意图转译能力的自智能化程度, 指标等级越高, 表明自智等级越高	SITC1: 全部过程人工转译; SITC2: 支持SITC1, 并支持人工和自动混合方式, 转译存在偏差; SITC3: 支持SITC2, 并支持人工和自动混合方式, 转译正确; SITC4: 全自动转译, 但转译存在偏差; SITC5: 智能转译, 转译正确
SBI 物理网络控制能力 (physical network control capability, PNCC)	孪生体向物理网络反馈控制策略的能力。该指标反映孪生体反向控制过程的自智能化程度, 指标等级越高, 表明自智等级越高	PNCC1: 没有虚拟到真实的映射; PNCC2: 手动将策略从虚拟同步到实际; PNCC3: 通过必要的手动干预, 半自动地将策略从虚拟同步到现实; PNCC4: 自动将策略从虚拟同步到现实, 构建闭环控制系统; PNCC5: 在自适应时延情况下, 智能地将策略从虚拟同步到现实

表8 管理与孪生体能力关键评价指标描述

评价指标名称	指标描述	指标分级框架
模型管理功能覆盖率 (model management function coverage, MMFC)	评估模型管理功能的实现程度。在指定评估范围内, 计算已实现的模型管理功能数量在全生命周期模型管理功能总数中的占比。 $MMFC = \frac{N_{mmfc}}{S_{mmfc}} \times 100\%$ (其中, N_{mmfc} 为已实现的模型管理功能数, S_{mmfc} 为全部被评估的模型管理功能总数。 N_{mmfc} 、 S_{mmfc} 均为正整数)	MMFC1: 不支持模型管理; MMFC2: 支持少部分模型管理功能, 覆盖率不小于30%; MMFC3: 支持部分模型管理功能, 覆盖率为30%~70%; MMFC4: 支持大部分模型管理功能, 覆盖率不小于70%; MMFC5: 支持全生命周期模型管理功能, 覆盖率可达100%
数据管理功能覆盖率 (data management function coverage, DMFC)	评估数据管理功能实现程度。计算已实现的数据管理功能数量在全生命周期数据管理功能总数中的占比。 $DMFC = \frac{N_{dmfc}}{S_{dmfc}} \times 100\%$ (其中, N_{dmfc} 为已实现数据管理功能数, S_{dmfc} 为全部被评估数据管理功能总数。 N_{dmfc} 、 S_{dmfc} 均为正整数)	DMFC1: 不支持数据管理; DMFC2: 支持少量数据管理功能, 覆盖率不小于30%; DMFC3: 支持DMFC2, 并支持更多数据管理, 覆盖率为30%~70%; DMFC4: 支持DMFC3, 并支持大部分数据管理, 覆盖率不小于70%; DMFC5: 支持DMFC4, 并支持全部数据管理, 覆盖率可达100%
服务管理功能覆盖率 (service management function coverage, SMFC)	评估服务管理功能的实现程度。计算已实现的服务管理功能数量在全生命周期服务管理功能总数中的占比。 $SMFC = \frac{N_{smfc}}{S_{smfc}} \times 100\%$ (其中, N_{smfc} 为已实现的服务管理功能数, S_{smfc} 为全部被评估的服务管理功能总数。 N_{smfc} 、 S_{smfc} 均为正整数)	SMFC1: 不支持服务管理; SMFC2: 支持少部分服务管理功能, 覆盖率不小于30%; SMFC3: 支持部分服务管理功能, 覆盖率为30%~70%; SMFC4: 支持大部分服务管理功能, 覆盖率不小于70%; SMFC5: 支持全生命周期服务管理功能, 覆盖率可达100%
数字孪生体能力范围 (digital twin capability range, DTCR)	数字孪生体可实现的网络范围, 包括单点、单域单系统、单域多系统、多域协同孪生等。该指标等级越高, 表明孪生范围越大、能力越高	DTCR1: 能够实现单点 (网元/器件/光纤层) 孪生; DTCR2: 支持DTCR1, 并实现单域点到点单系统孪生; DTCR3: 支持DTCR2, 并实现单域网络层多系统孪生; DTCR4: 支持DTCR3, 并能够实现多域协同孪生
孪生体场景覆盖率 (scenario coverage, SC)	评估总体实现程度, 在指定评估范围内, 计算已实现的场景在被评估的场景总数中的占比。 $SC = \frac{N_{sc}}{S_{sc}} \times 100\%$ (其中, N_{sc} 为已实现的场景数, S_{sc} 为全部被评估的场景总数。 N_{sc} 、 S_{sc} 均为正整数)	SC1: 不支持对外场景服务; SC2: 支持少部分场景服务, 场景覆盖率小于30%; SC3: 支持部分场景服务, 场景覆盖率为30%~60%; SC4: 支持大部分场景服务, 场景覆盖率不小于60%; SC5: 支持全部场景服务, 场景覆盖率达100%

一个及以上光传送网全生命周期中的数字孪生典型场景，包括规划与建设、运营、维护和优化阶段的典型场景^[2,5]。

步骤 3 确定评估维度：针对选定的每个典型场景，确定数字孪生能力评估维度，评估维度按照模型、数据、服务、交互、管理和孪生体 6 个要素进行划分。

步骤 4 按评估维度评分：根据各维度的评价指标和等级定义，分别按评估维度进行评分。

步骤 5 按典型场景评分：按能力评估的典型场景，采用平均法或加权平均法对每个典型场景进行评分。

步骤 6 按评估对象综合评分和改进建议：按孪生体评估对象，采用平均法或加权平均法等对多个典型场景进行综合评分，并根据评分结果

给出提升评估对象能力水平的改进建议。

光传送网光层评测示例：首先确定能力评估对象和范围，再确定评估场景和评估维度。能力评估对象和范围示例见表 9。

根据表 9 所示的场景、评估维度和孪生体整体能力分别评分，数字孪生体综合评分过程示例见表 10。

4 光传送网数字孪生成熟度模型

本文通过构建光传送网数字孪生成熟度模型，评估现阶段数字孪生能力的实现程度和发展水平，并为未来发展和演进指明方向，为孪生能力提升和迭代优化提供指导^[2,15-16]。与其他专业领域相比，光传送网自身具备管控系统，并已具备一定的数智化特征。因此，在构建光传送网数

表 9 能力评估对象和范围示例

评估维度	单域、光传送网业务域		
	场景 A1: 网络健康度评估	场景 A2: 故障溯源与多重故障模拟	场景 A3: 同缆识别
模型能力 B1	✓	✓	✓
数据能力 B2	✓	✓	✓
服务能力 B3	✓	✓	×
交互能力 B4	✓	×	✓
管理能力 B5	✓	×	×
孪生体整体能力 B6		✓	

注:✓表示参与评测;×表示不参与评测。

表 10 数字孪生体综合评分过程示例

评估维度	场景 A1: 网络健康度评估	场景 A2: 故障溯源与多重故障模拟	场景 A3: 同缆识别
模型能力 B1	S11	S21	S31
数据能力 B2	S12	S22	S32
服务能力 B3	S13	S23	0
交互能力 B4	S14	0	S34
管理能力 B5	S15	0	0
孪生体整体能力 B6	S16	S26	S36
场景评分 (平均法)	$S_{\text{scenarioA1}} = (S11+\dots+S16)/6$	$S_{\text{scenarioA2}} = (S21+S22+S23+S26)/4$	$S_{\text{scenarioA3}} = (S31+ S32+S34+S36)/4$
数字孪生体综合评分 (平均法)	$S_{\text{DT}} = (S_{\text{scenarioA1}} + S_{\text{scenarioA2}} + S_{\text{scenarioA3}})/3$		

注:数字孪生体综合评分过程也可采用加权平均法统计确定。



字孪生成熟度模型时，需要将原有管控系统能力与数字孪生能力相结合进行考虑，在一个完整的管控体系中进行成熟度模型规划和评估，更符合当前光传送网智能化发展的现状。同时，需要考虑光传送网中引入数字孪生的发展目标和应用价值，近期目标是增强光传送网管控体系的智能化模拟仿真能力，积极推动智能化运维模式由被动向主动运维转型；长远目标是实现高阶网络的自智、自主运行。

基于上述考虑，光传送网数字孪生成熟度模型分为5个等级，从低到高依次为L1监视级、L2预测级、L3优化级、L4多域级和L5共生级。光传送网数字孪生成熟度模型的等级特征及目标见表11。

表11描述了光传送网数字孪生成熟度等级特征和各阶段发展目标，形成了数字孪生应用的演进方向。为评价孪生体成熟度，可以从图2提出的能力评价指标体系中选择可以表征等级特征的评价指标作为成熟度等级评价因子（即本文第3.2节列举出的关键能力评价指标），并按照成熟度等级明确具体的等级要求，光传送网数字孪生成熟度等级要求见表12。从这个角度看，成熟

度模型也是能力评估的一种典型应用。

本文以光传送网传输性能预测和仿真优化场景为例，对某数字孪生成熟度进行评估。光传送网数字孪生成熟度评估示例见表13。

5 结束语

针对数字孪生能力评估，能够发现光传送网数字孪生在实际应用中存在的问题或短板，为后续的优化和改进提供方向，并为数字孪生应用相关的各类实验验证和能力测评提供依据。针对成熟度评估，可以为数字孪生技术的未来发展提供指引，推动光传送网的智能化升级，实现可持续发展。

当前，数字孪生技术的引入成为光传送网智能化发展进程中的关键使能技术之一。从运维模式革新来看，它有力地支撑并推动光网络运维从传统的被动响应模式，朝着主动运维的智能化方向转型升级，极大地提升了运维效率与网络稳定性。从网络自智发展层面来看，数字孪生技术更是未来光网络向L5自智等级迈进的关键助力。

表 11 光传送网数字孪生成熟度模型的等级特征及目标

成熟度等级	等级特征	等级目标
L1	监视级：以虚映实，物理可视	实时呈现物理网络的运行状态，实现物理网络的状态监视； 实现网络监视典型场景的模型、数据、服务和管理能力； 无法实现网络运行性能的预测和模拟； 无法实现对物理网络的决策控制
L2	预测级：以虚预实，静态推演	实现预测物理网络未来一段时间的运行状态和性能趋势； 实现物理网络配置变更及其性能影响的模拟； 实现网络预测与模拟典型场景的模型、数据、服务和管理能力； 无法实现对物理网络的决策控制
L3	优化级：以虚优实，虚实互动	实现对物理网络的优化，实现优化的物理网络预评估与验证； 实现网络优化典型场景的模型、数据、服务和管理能力； 实现对物理网络优化的决策控制
L4	多域级：跨域孪生，协同互促	实现多域协同孪生，包括多控制域、多技术、多厂商等场景； 实现跨域网络的监视、预测、仿真与模拟能力； 实现物理网络与孪生体之间的自动闭环控制
L5	共生级：虚实共生，自主调控	实现物理网络和数字孪生体的长时间同步运行； 实现数字孪生体动态自适应，在网络全生命周期过程中，物理网络与孪生体之间实现自主闭环管控； 实现典型场景到全场景的覆盖，实现到多层多域场景的覆盖

表 12 光传送网数字孪生成熟度等级要求

成熟度等级		L1 (监视级)	L2 (预测级)	L3 (优化级)	L4 (多域级)	L5 (共生级)
模型	基础模型精度 (BMA)	≥BMA3	≥BMA3	≥BMA4	≥BMA5	=BMA6
	功能模型-回归算法准确度 (FM-RA)	=FM-RA1	≥FM-RA3	≥FM-RA4	≥FM-RA5	=FM-RA6
	功能模型-分类算法准确度 (FM-CA)	≥FM-CA2	≥FM-CA3	≥FM-CA4	≥FM-CA5	=FM-CA6
数据	模型训练方式 (MTM)	≥MTM1	≥MTM1	≥MTM1	≥MTM2	=MTM3
	模型自适应性 (MA)	≥MA1	≥MA1	≥MA2	≥MA3	=MA5
	数据采集方式 (DCM)	≥DCM2	≥DCM3	=DCM4	=DCM4	=DCM4
	数据采集频率 (DCI)	≥DCI2	≥DCI3	=DCI4	=DCI4	=DCI4
	数据处理方式 (DPM)	≥DPM2	≥DPM3	=DPM4	=DPM4	=DPM4
	数据质量 (DQ)	≥DQ1	≥DQ2	≥DQ3	≥DQ4	=DQ5
服务	模型服务开放性 (MSO)	≥MSO1	≥MSO2	≥MSO3	≥MSO3	=MSO4
	数据服务开放性 (DSO)	≥DSO2	≥DSO3	=DSO4	=DSO4	=DSO4
	服务可视化程度 (SVL)	≥SVL3	≥SVL4	≥SVL5	≥SVL5	=SVL6
交互	NBI 标准化程度 (SLN)	≥SLN1	≥SLN2	≥SLN4	=SLN5	=SLN5
	API 服务意图转译能力 (SITC)	≥SITC1	≥SITC2	≥SITC3	≥SITC4	=SITC5
管理	SBI 物理网络控制能力 (PNCC)	≥PNCC1	≥PNCC2	≥PNCC3	≥PNCC4	=PNCC5
	模型管理功能覆盖率 (MMFC)	≥MMFC2	≥MMFC3	≥MMFC4	=MMFC5	=MMFC5
	数据管理功能覆盖率 (DMFC)	≥MMFC2	≥MMFC3	≥MMFC4	=MMFC5	=MMFC5
	服务管理功能覆盖率 (SMFC)	≥SMFC2	≥SMFC3	≥SMFC4	=SMFC5	=SMFC5
孪生体	数字孪生体能力范围 (DTCR)	≥DTCR2	≥DTCR2	≥DTCR3	=DTCR4	=DTCR4
	孪生体场景覆盖率 (SC)	≥SC2	≥SC3	≥SC4	≥SC4	=SC5

表 13 光传送网数字孪生成熟度评估示例

评估指标		指标评测结果示例	指标等级判定	成熟度评估等级判定
模型	基础模型精度 (BMA)	满足 BMA3, 支持网元级性能仿真, 并支持简单系统性能仿真	=BMA3	L2 (预测级)
	功能模型-回归算法准确度 (FM-RA)	满足 FM-RA3, 能正确预测出缓慢变化场景的变化趋势, 并支持预测出周期性变化场景的变化趋势	=FM-RA3	
	功能模型-分类算法准确度 (FM-CA)	不涉及	-	
数据	模型训练方式 (MTM)	满足 MTM1, 模型训练采用离线方式	=MTM1	
	自适应性 (MA)	满足 MA1, 模型参数和关联关系支持手动更新	=MA1	
	数据采集方式 (DCM)	满足 DCM4, 系统自动采集物理设备全部数据信息	=DCM4	
	数据采集频率 (DCI)	满足 DCI4, 最小采集频率支持百毫秒级	=DCI4	
	数据处理方式 (DPM)	满足 DPM4, 预处理过程全部由系统自动完成	=DPM4	
	数据质量 (DQ)	满足 DQ3, 数据服务过程中偶尔出现漏传、重传、或错传等异常情况, 满足 DQ 小于 0.8	=DQ3	
服务	模型服务开放性 (MSO)	满足 MSO2, 具有模型接口, 支持基础模型的查询、检索、存储等	=MSO2	
	数据服务开放性 (DSO)	满足 DSO3, 支持数据批量处理、实时处理, 数据发布订阅等功能	=DSO3	
	服务可视化程度 (SVL)	满足 SVL4, 支持基于服务的数据模型全生命周期可视化, 包括数据服务实例的创建、更新、组合和销毁等	=SVL4	
交互	NBI 标准化程度 (SLN)	暂不涉及	-	
	API 服务意图转译能力 (SITC)	满足 SITC2, 支持半自动方式, 转译存在偏差	=SITC2	
管理	SBI 反向控制物理网络能力 (PNCC)	满足 PNCC2, 手动将策略从 DT 同步到物理网络	=PNCC2	
	模型管理功能覆盖率 (MMFC)	满足 MMFC3, 支持部分模型管理功能。	=MMFC3	
	数据管理功能覆盖率 (DMFC)	满足 DMFC5, 支持全生命周期数据管理功能, 包括提供数据检索能力、数据可视化	=MMFC5	
	服务管理功能覆盖率 (SMFC)	满足 SMFC3, 支持部分服务管理功能	=SMFC3	
孪生体	数字孪生能力范围 (DTCR)	满足 DTCR2, 支持实现单域点到点单系统孪生	=DTCR2	
	场景覆盖率 (SC)	满足 SC5, 支持该场景全部场景服务	=SC5	



参考文献：

- [1] SHU M, SUN W F, ZHANG J, et al. Digital-twin-enabled 6G network autonomy and generative intelligence: Architecture, technologies and applications[J]. Digital Twin, 2022, 2: 16.
- [2] IMT2020 (5G). 5G承载网数字孪生能力评估研究[R]. 2024. IMT2020 (5G). Research on the capability evaluation of digital twins in 5G bearer networks[R]. 2024.
- [3] 张辰源, 陶飞. 数字孪生模型评价指标体系[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(8): 2171-2186. ZHANG C Y, TAO F. Evaluation index system for digital twin model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(8): 2171-2186.
- [4] International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector. Recommendation Y.3091: Digital twin network - Capability levels and evaluation methods(S). 2025.
- [5] CCSA TC6. 光传送网(OTN)数字孪生总体技术要求(报批稿)[EB]. 2024. CCSA TC6. General technical requirements for digital twin for optical transport network (OTN)[EB]. 2024.
- [6] CCSA TC3. 数字孪生网络能力评估: YD/T 6387—2025[S]. 2025. CCSA TC3. Digital twin network: capability evaluation: YD/T 6387—2025[S]. 2025.
- [7] ANGUIA D, GHELARDONI L, GHIO A, et al. The ‘K’ in K-fold Cross Validation[C]//Proceedings of European Symposium on Artificial Neural Networks(ESANN). 2012, 102: 441-446.
- [8] WONG T T. Performance evaluation of classification algorithms by k-fold and leave-one-out cross validation[J]. Pattern Recognition, 2015, 48(9): 2839-2846.
- [9] SINGH S, GUPTA P. Comparative study ID3, cart and C4.5 decision tree algorithm: a survey[J]. International Journal of Advanced Information Science and Technology (IJAIST), 2014, 27(27): 97-103.
- [10] RIGATTI S J. Random forest[J]. Journal of Insurance Medicine, 2017, 47(1): 31-39.
- [11] RIBEIRO M T, SINGH S, GUESTRIN C. “Why should I trust you?”: explaining the predictions of any classifier[C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2016: 1135-1144.
- [12] LUNDBERG S M, LEE S I. A unified approach to interpreting model predictions[J]. arXiv preprint, 2017: 1705.07874.
- [13] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405-2415.
- [14] 陈丹阳, 陆璐, 孙滔. 数字孪生网络接口设计及其协议分析[J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(1): 29-33. CHEN D Y, LU L, SUN T. Multi-protocol cooperative interface for digital twin network[J]. ZTE Technology Journal, 2022, 28(1): 29-33.
- [15] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1267-1281. TAO F, ZHANG C Y, QI Q L, et al. Digital twin maturity model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(5): 1267-1281.
- [16] 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 the capability maturity model of digital twin networks for operators[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(6): 149-158.

[作者简介]



王郁 (1975–), 女, 中国信息通信研究院高级工程师, 主要研究方向为光网络管控、自智网络、数字孪生、AI智能化等。



秦忻 (1995–), 女, 博士, 中国电信股份有限公司北京研究院工程师, 主要研究方向为智能光网络、数字孪生光网络等。



李芳 (1974–), 女, 中国信息通信研究院正高级工程师, 主要研究方向为高速光通信、分组传送、4G/5G移动承载和光网络智能化等。



徐云斌 (1978–), 男, 博士, 中国信息通信研究院正高级工程师, 主要研究方向为智能光网络新技术、标准研制、测试验证等。