中国科学: 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 9 期: 299504
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 高频段大口径射电望远镜设计与观测专题

面向射电望远镜的数字孪生应用挑战

冯晨[1], 刘源杰[1], 程安宇[1*], 陈勇[2]

1. 重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065
2. 重庆理工大学车辆工程学院, 重庆 400054
*联系人, E-mail: chengay@cqupt.edu.cn

收稿日期: 2025-10-27; 接受日期: 2026-01-13; 网络出版日期: 2026-05-27
国家重点研发计划(编号: 2021YFC2203601)、国家自然科学基金地区项目(编号: 12562033)和重庆市技术创新与应用发展专项(编号: CSTB2025TIAD-STX0026)资助项目

摘要 大口径、高频段射电望远镜在重力、温度与风载等环境作用下易发生结构变形, 进而影响主反射面面形与指向精度. 为此, 本文系统梳理了数字孪生在射电望远镜中的虚实融合诊断机制与应用进展. 首先明确数字孪生与传统数字仿真、状态监测的差异与边界, 随后总结了FAST和QTT等工程中的方法, 并对当前主要面临的多源异构与多尺度融合、模型不确定性与实时性制约下的稳健预测, 以及工程落地中的通信时延与系统复杂度等挑战进行了归纳. 面向未来, 围绕提升环境适应性与高频段观测能力, 结合深度学习, 构建机理-数据深度耦合的数字孪生模型, 为下一代射电望远镜的稳健运行与性能提升提供新的思路与路径.

关键词 射电望远镜, 数字孪生, 深度学习, 机理-数据融合

PACS: 07.05.Tp, 84.40.Ba, 95.55.Jz

1 引言

射电望远镜作为探索宇宙的关键科学设备, 在引力波探测、脉冲星观测和黑洞成像等重大天文发现中发挥着核心作用. 随着天文观测需求的不断提升, 全球射电望远镜正向更大口径、更高工作频段发展[1]. 然而, 大口径、高频段射电望远镜面临诸多技术挑战, 例如, 结构刚度保障困难; 重力、温度和风载等环境因素对指向精度的影响; 机电耦合关系愈发紧密[2]. 在此背景下, 传统的被动补偿难以满足精度要求, 毫米、亚毫米波段误差容限急剧收窄. 虽然主动面技术可通过促动器来补偿主反射面形变[3], 但现有分布式架构存在通信时延、系统复杂、诊断困难等问题[4], 且缺乏全生命周期的环境感知与预测能力. 如图1所示, 射电望远镜在主反射面面形保持、副反射面位姿保障、背架结构安全监测与补偿、俯仰轴与方位轴伺服系统控制性能优化以及轮轨损伤与平整度实时监测等方面仍面临问题与挑战.

数字孪生技术在制造业[6,7]、航空航天和建筑等领域通过构建物理实体的高保真虚拟模型, 实现实时数据交互与多功能集成. 从而推动设计优化与智能运维[8], 并提升了大型设备的运行监测与维护决策能

引用格式: 冯晨, 刘源杰, 程安宇, 等. 面向射电望远镜的数字孪生应用挑战. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 299504
Feng C, Liu Y, Cheng A, et al. Challenges of digital twin applications for radio telescopes (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 299504, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0491

© 2026《中国科学》杂志社

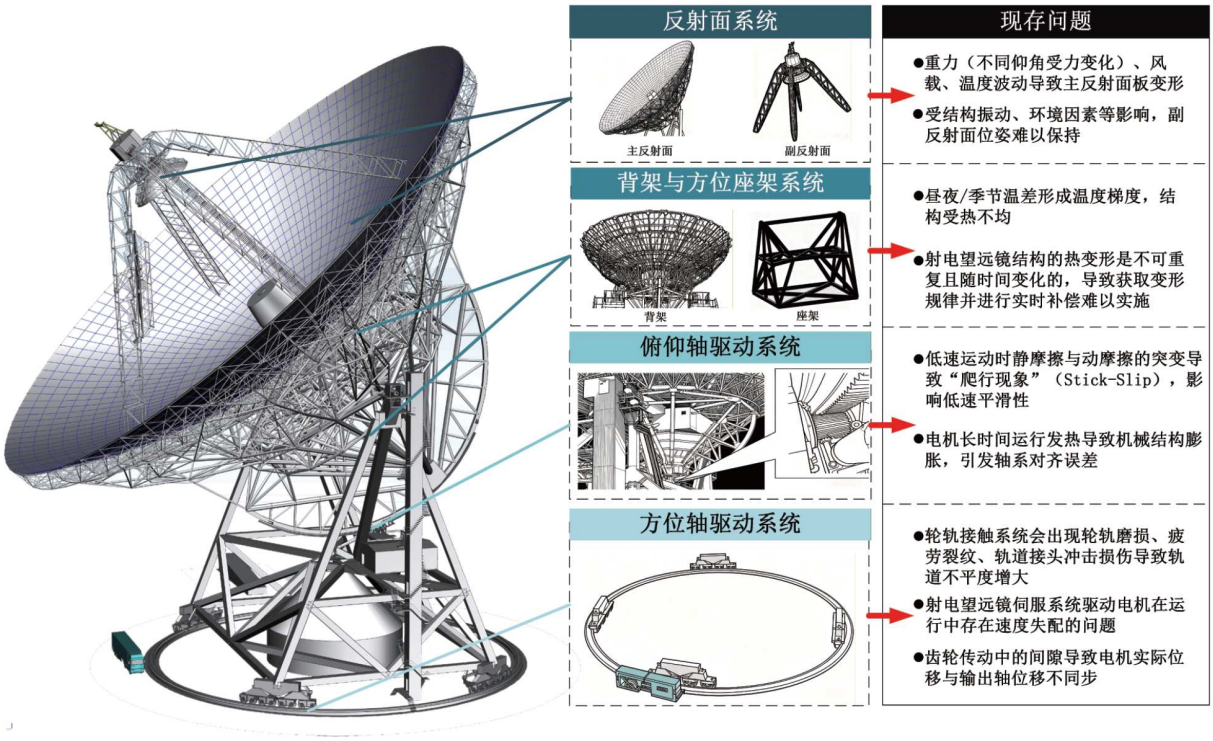


图 1　大型射电望远镜[5]主要系统及关键技术挑战

Figure 1　Main systems and key technical challenges of large radio telescopes [5].

力[9], 相较于制造业与航空航天领域, 射电望远镜中的数字孪生应用仍处于初级阶段. 本文首先系统梳理了数字孪生的关键技术, 然后归纳其在射电望远镜上的应用进展并提出未来发展建议, 为射电望远镜数字孪生构建和高精度运行保障提供参考.

2　数字孪生技术及关键技术

数字孪生(Digital Twin)作为近年来在工业、科技等领域迅速崛起的前沿技术, 正以其强大的模拟、分析和预测能力, 为各行业的创新发展注入新的活力. 它本质上是在虚拟空间中构建一个与物理实体高度一致的数字化镜像, 通过实时数据交互与动态映射, 实现对物理实体的全生命周期管理、优化与决策支持. 陶飞等人[10]提出的五维模型: 物理实体、虚拟实体、服务、孪生数据、连接, 为数字孪生构建了系统化框架, 其中虚拟实体的构建尤为重要.

数字孪生的核心在于高保真模型与高质量数据: 前者通过几何、物理、行为和规则建模刻画对象, 后者通过采集、融合与交互实现虚实同构与闭环反馈. 当前, 数字孪生与数字仿真、工厂状态监测之间易出现混淆, 因此有必要从数据流向、时间特性与模型复杂度等维度加以区分, 具体而言, 数字仿真主要用于离线场景下的单向推演, 侧重于利用简化模型进行开环分析与规划; 工厂状态监测虽具备实时性, 但本质上是基于无模型或轻量模型的被动观察与预警; 相比之下, 数字孪生凭借双向实时的交互机制与高保真的动态模型, 实现了物理实体与虚拟空间的同步运行, 从而达成具备预测控制能力的闭环反馈.

2.1　数字模型的孪生

要想更好地将数字孪生技术应用于射电望远镜, 保障其高频、高精度运行, 厘清数字孪生技术的框架脉络极其重要, 可以为如何构建射电望远镜数字孪生系统提供清晰的思路. 对于数字孪生模型构建而言, 其从概念迈向实际应用的关键前提在于构建逻辑清晰、维度完整的理论模型.

2.1.1　基本框架

虚拟实体由几何模型、物理模型、行为模型和规

则模型四个子模型组成，为实现对物理实体多尺度、全方位的精准刻画，这四个子模型的构建需结合不同技术路径与工具来完成，下文将分别针对几何模型、物理模型、行为模型及规则模型的建模技术展开详细阐述.

(1) 在几何建模技术方面，点云、建筑信息建模(BIM)和CAD是构建数字孪生几何模型的三种主要技术手段. 点云技术[11]通过激光扫描或摄影测量获取密集的三维空间点集合，能够直接高效地表征目标表面并最终呈现三维物理实体，其处理过程涉及从3D激光扫描仪获取的原始点云数据中提取项目的空间信息(如尺寸和属性信息)以及组件之间的关系(如依赖关系和连接点)，进而生成数字化竣工BIM模型，从点云到BIM的转换过程通常称为Scan-to-BIM[12]. BIM作为提升行业协同与交付质量的方法与工具体系，通过关注整个项目生命周期中利益相关者之间的信息管理和数据交换需求, 按照开发级别的概念组织交付成果, 该概念是一个参考工具，用于指定3D模型中组件特征和细节的最低要求，从而促进BIM利益相关者之间更好地沟通[13]. CAD软件如Pro-E，CATIA，SolidWorks, UGNX等专注于工业机械的三维建模, 而Autodesk Revit专用于建筑信息建模(BIM)，这些专业化工具能够精确构建物理实体的形状、尺寸、内部结构、空间位置和装配接口的三维几何模型. 上述点云、BIM与CAD技术为通用场景下数字孪生几何模型的构建提供了技术路径，而针对历史建筑这类结构复杂、信息可能不完整的特殊对象，几何建模则需要更具针对性的策略与方法. 对于历史建筑等复杂结构的几何建模, 采用分层装配的概念, 将结构几何以分层方式组织, 各个部分单独建模后组装成最终模型，这种方法可以根据对历史建筑不断获得的知识持续更新，特别是对于复杂部分如砌体拱顶、节点区域，可以采用自动重建程序来克服耗时的建模任务，或者从可用的BIM或CAD模型中导入部分结构几何[14].

(2) 物理模型的构建为数字孪生的分析与预测任务提供基础，有限元分析是构建物理模型最常用的方法，可用有限元软件等进行多物理场有限元分析，并借助Simulink等仿真技术进行系统级联合仿真. 物理模型不仅需要考虑静态的物理属性如材料特性、载荷约束等, 还需要通过数值方法描述系统的动态行为, 例如在工字钢的数字孪生建模中，基于几何模型进行有限元网格划分，生成65212个节点和14350个单元，通过施加相应的工艺约束进行应力分析仿真[15].

(3) 行为模型的构建赋予了几何模型和物理模型动态演变的功能，并借助Unity等引擎实现可视化与交互，描述不同粒度、不同空间尺度下物理实体在外部环境与内部运行机制共同作用下产生的实时响应[10].

(4) 规则模型通过数据挖掘、信息处理等手段, 将复杂的经验和知识形式化表示，使数字孪生模型能够理解和应用既有的智慧与经验，机器学习作为规则建模技术，能够从历史数据、操作逻辑和经验知识中挖掘、提取和表示规则. 近期研究表明，将物理模型与机器学习模型相结合能够充分发挥各自优势，物理模型确保了物理可解释性，而机器学习模型则具有良好的数据适应性和实时应用能力[16]. 在BIM与增强现实技术结合的建筑施工进度监控中，通过现实捕捉技术获取的数据与4D BIM模型的集成, 显著提高了项目进度监控的自动化水平[17].

在整体构建中, 物理建模决定仿真可信度, 方法选择尤为关键，所以下文对物理模型建模方法做进一步说明.

数字孪生模型的物理模型建模方法主要包括以机理模型为基础的三维动态仿真方法和以数据驱动方法及降阶建模技术为主的数字特征建模方法，前者通过构建机理模型并借助数值方法来描述系统内在机理, 能够模拟和分析系统的动态行为，而后者则着重于通过挖掘数据中的规律和模式直接进行建模. 然而，高保真的仿真模拟计算效率较低，难以满足数字孪生实时监测和控制的需求，即使借助超级计算机的并行计算能力，经典的有限元方法在面对需要多次求解或需要快速甚至实时求解的问题时仍然面临效率挑战，因此降阶建模技术(ROM)成为解决这一问题的关键方法[18].

2.1.2　降阶建模技术

结构的数字模型构建过程中，通常会遇到构建模型过于精细会极大增加计算资源，而模型过于简单又不能很好地反应结构的实际物理场景，因此降阶建模技术是构建孪生模型的关键，其核心思想是通过数学方法将高维动力系统降维到低维空间，在保持系统主要动力学特性的同时大幅降低计算复杂度. 随着工程系统对仿真精度要求的不断提高，模型中包含的细节

越来越多，导致大规模、复杂的动力系统模型计算需求急剧增长，即使借助高性能计算和并行技术，传统的有限元、有限体积等高分辨率数值方法在面对需要多次求解或实时求解的参数化问题时仍然面临巨大挑战, 而降阶建模技术通过构建低维高效的代理模型, 在典型参数化求解中可实现2–3个数量级的加速, 成为缓解计算负担的主要手段[19]. 根据降阶方法的数学原理, 当前主流的降阶建模技术可分为投影类方法和数据驱动方法两大类，投影类方法包括缩减基有限元方法(Reduced Basis Finite Element Method)、本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)、平衡截断(Balanced Truncation)等, 这些方法通过将高维状态空间投影到由典型解张成的低维子空间来实现降阶，其中缩减基方法通过贪婪算法迭代构造最优基函数空间，POD方法则通过奇异值分解提取系统的主要模态; 而数据驱动的降阶方法不需要系统的先验数学模型, 能够直接从观测数据中提取系统的低维表示，这类方法在处理缺乏完整数学描述的复杂非线性系统时具有独特优势[20].

近年来，机器学习方法在模型降阶领域展现出巨大潜力，主要包括动态模态分解(Dynamic Mode Decomposition，DMD)、非线性动力学稀疏识别(Sparse Identification for Nonlinear Dynamics, SINDy)和神经网络方法三种架构, 其中DMD通过数据驱动的方式提取系统的动态模态和特征频率，能够直接从快照数据中构建线性化的降阶模型；SINDy方法通过稀疏回归从预定义的候选函数库中识别控制方程，能够发现系统的解析表达式；深度神经网络特别是自编码器架构, 通过非线性映射学习数据的低维流形表示，在处理高度非线性系统时表现出色，这些数据驱动方法相比传统的Galerkin-POD投影方法往往能产生更稳定的降阶模型，并且可以同时利用计算数据和测量数据构建准确高效的代理模型，为数字孪生技术的发展提供了重要支撑[21], 如图2所示.

2.2　数字数据的孪生

(1) 数据采集

数据采集作为连接物理世界与虚拟空间的首要环节, 不同领域的数字孪生获取数据的方式多有不同, 一般会采用传感器与IoT (Internet of Things)、监视控制系统SCADA、企业IT系统、外部开放数据等技术. 尽管不同领域有不同的数据采集方式，但也面临着共性问题. 例如在建筑结构健康监测领域，其主要通过无线物联网传感器进行实时数据采集，并结合BIM技术和数字信号处理进行结构分析，但现有BIM-based SHM系统在数据集成和实时处理方面仍存在局限性[22]. 医疗领域的数字孪生[23]数据采集涉及多个生命周期阶段，采用大数据分析技术处理来自不同来源的海量医疗数据，包括结构化、半结构化和非结构化数据，但在数据异构性处理和实时优化方面仍面临挑战. 在核反应堆数字孪生领域，数据主要来源于传感器测量的探测数据、机理模型计算得到的仿真数据和数据驱动模型计算后的生成数据，虽然在核反应堆数字化方面已有较多研究，但在数据挖掘、知识挖掘以及智能决策等数据融合方面的研究较少，且面临有效样本缺乏、数据质量不高、融合数据类型单一等问题[24].

各领域在数字孪生数据采集方面都需要考虑高数据异构性、严格实时性要求、多源数据质量差异的问题. 只有这样才能把物理世界的状态、行为、环境全量、实时、持续地镜像到数字空间来构建一个精细可靠的孪生世界.

(2) 数据融合

在孪生系统中, 采集到的数据往往存在多源异构、采样频率不一、坐标系与时间基准各异、量纲不统一，以及缺失、跳变与噪声等问题，需要对其进行融合，才能在数字孪生体内构建唯一、完整、可信的实时镜像, 支撑高保真仿真与预测. 由此, 依赖数据融合技术有效整合利用多源多类型采集数据是技术落地的关键.

数据融合作为一种重要的信息处理技术，其概念最早可追溯至20世纪70年代的军事应用需求. 现代工业对象往往要求进行多传感综合监测，包括各种仪表的分布式检测、视频监视和网络化连接，同时对各种传感信息进行融合，完成设备运行故障诊断与报警等. 信息融合理论发展的另一重要推动因素是认知科学和人工智能研究的需要，人工智能可以通过机器视觉、机器听觉、机器触觉等多模态感知信息的融合过程, 模拟人和动物的认知过程. 数据融合的本质是利用计算机进行多源信息处理，从而获得可综合利用信息的理论和方法，研究重点在于提出处理具有相似或不同特征模式下的多源信息的理论与方法，以获得具有相关性和集成特性的融合信息.

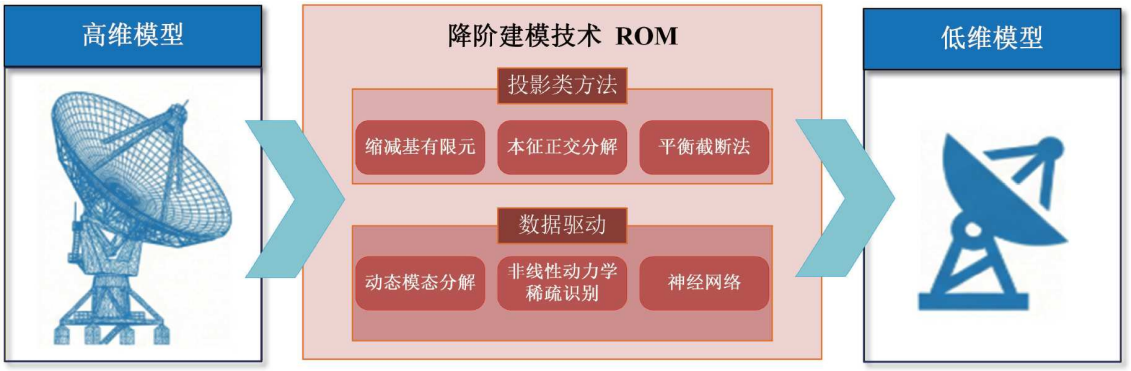


图 2　降阶建模技术ROM示意图
Figure 2　Schematic diagram of ROM technology.

从融合层次的角度分析，融合分为数据级、特征级与决策级：前者直接融合原始数据；中者先提取特征再融合；后者融合各模型的判决结果. 在数字孪生框架中，这种融合方式能够提供更完整和精确的物理对象描述. 特征级融合属于中间层次的融合，数据首先被预处理并转换为特征集合，这些特征是可用于进一步分析的特性属性或模式，例如光伏仿真中结合光模型和热模型时，分别提取辐照度和温度特征[25]. 决策级融合属于最高层次的融合，每个模型基于自身数据作出决策，通过将多个来源模型的结果进行融合得到最终的、更可靠的决策结果.

在融合需求方面，因系统层次差异呈现显著复杂性，而高效、准确的数据融合是实现数字孪生功能的关键前提. 根据数据集成程度，数字孪生系统可分为数字模型、数字影子和数字孪生三个层次：数字模型在物理实体与数字实体间无自驱动数据交互，数字影子存在从物理实体到数字实体的自驱动单向数据流，数字孪生则实现两者完全集成的双向数据交互[26,27]，如图3所示. 不同层次的数据交互特点差异巨大，如何针对各层次特性开发适配的数据融合技术与方法，成为当前面临的重要挑战.

在融合方法研究中，多种创新技术路径已展现出应用价值，它们从不同维度优化融合精度、效率与鲁棒性，为复杂场景下的数据协同提供了多元解决方案，下文将分别对深度有限元方法、集成学习、数据同化与机器学习的结合方法、贝叶斯推理视角下的融合应用及粒子滤波技术的具体原理与实践效果展开阐述：深度有限元方法(DFEM)通过将物理信息神经网络与有限元方法相结合，设计了融合深度神经网络与刚度矩阵的损失函数，避免了高阶导数项，实验结果表明该方法相比深度能量方法显著降低了相对误差，并通过整合预训练技术使计算时间较传统有限元缩短约87.5%，为快速计算和数字孪生应用提供了有效工具[28]. 集成学习作为重要的数据融合策略，通过在数据层面和特征层面进行操作来确保机器学习的多样性，其中同质学习策略因只需实现单一学习算法而被广泛采用，在多个应用领域如蛋白质相互作用预测、滑坡敏感性映射、短期负荷预测等场景中，通过重采样等技术在数据和特征层面进行操作，有效提升了模型的泛化能力和预测精度[29]. 数据同化与机器学习的结合为非线性系统状态估计提供了新思路，通过使用深度残差网络等神经网络算法学习数据同化过程中背景场和分析场之间的关系，将动力系统模型预测值作为代理模型输入来改进预测准确性，特别是提出不等权重集合卡尔曼滤波与样本再生粒子滤波相结合的方法，在观测数据稠密时比传统集合卡尔曼滤波的状态估计误差更小，在噪声为非高斯分布时表现出更强的鲁棒性. 从贝叶斯推理角度看，数据同化提供了关键的先验知识并生成详细的再分析数据集，丰富了机器学习应用的训练数据多样性和深度，如FourCastNet和Pangu-Weather等先进模型通过利用ERA5等综合再分析数据集大幅提高了预测精度，而机器学习训练的模拟器在数据同化输出上的应用已在加速高分辨率天气预报方面取得成功，通过机器学习生成的协方差矩阵增强的数据同化系统提高了状态估计效率[30]. 粒子滤波作为一种鲁棒的基于采样的跟踪算法，通过生成一组样本(粒子)作为输入，捕获每个粒子的测量值并分配权重来表示相对重要性，然后通过权重分配与重采

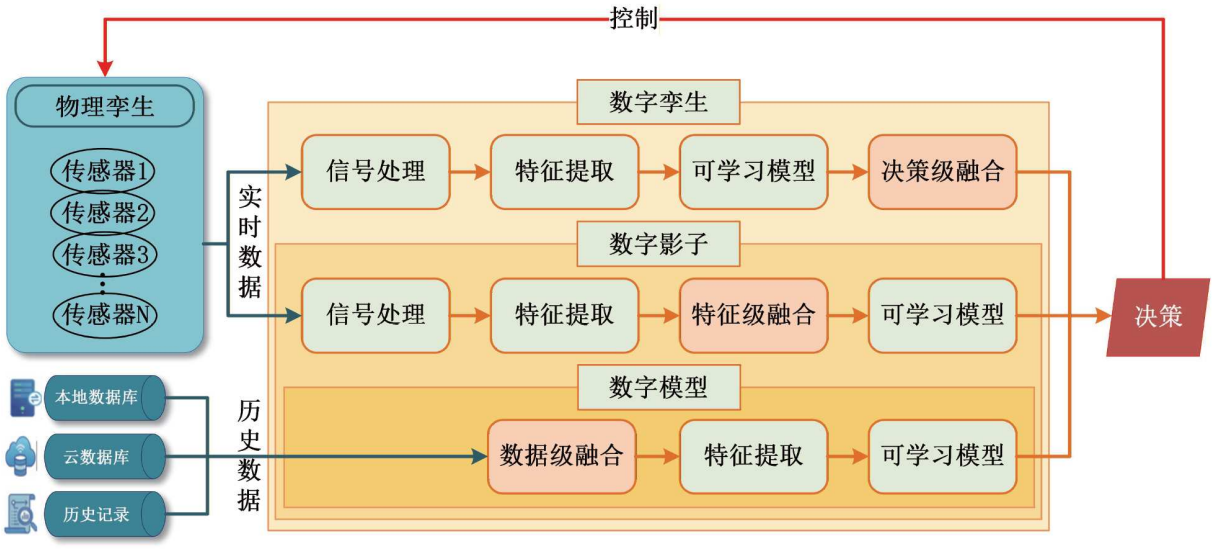


图 3　数据融合在数字孪生框架中的应用[27]
Figure 3　The application of data fusion in the digital twin framework [27].

样过程计算并归一化每个粒子权重，基于权重统计性保留高权重粒子、消除低权重粒子，递归地估计和更新每个粒子，在太阳能跟踪系统中实现了无需历史气象数据和复杂数学模型的有效跟踪[31].

通过上述分析可以看出，数据融合作为连接物理空间与数字空间的关键技术，其发展水平直接决定了数字孪生系统的性能表现. 无论是从数据层面的直接融合，还是从特征层面的抽象融合，或是从决策层面的高级融合，都需要通过先进的融合方法来实现. 随着人工智能、机器学习等技术的不断发展，数据融合方法也在不断演进，为数字孪生技术的深入应用提供了强有力的技术支撑.

(3) 数据交互

数字孪生连接交互理论进一步丰富了数据融合的内涵，Lin等人[32]提出了“感知-通信-映射-联动-融合”五个方面的理论体系. 在交互融合阶段，通过融合物理环境和数字孪生的各类信息，包括数字孪生模型的实时仿真结果、数字孪生数据存储的信息知识、智能服务算法、人类认知决策等信息，实现深度融合决策. 为实现这一深度融合决策过程，需先解决数据交互环节的标准化问题，确保不同来源、不同类型的信息在传输与整合中具备一致性与兼容性，Schroeder等人[33]提出了使用AutomationML进行数字孪生数据建模的方法，AutomationML作为一种基于XML的标记语言，遵循面向对象的范式存储工程信息，允许将物理和逻辑工厂组件建模为封装在不同方面的数据对象，通过这种方式可以实现数字孪生与其他系统之间的高级数据交换，并提供了一种通信方法论来支持异构系统之间的数据交换[34]. 在工业场景中，除AutomationML外，OPC UA和MQTT是常用标准化数据交互协议：OPC UA (统一架构)基于服务模型，适合在OT与IT之间可靠传输结构状态数据，保障物理资产传感器数据(如振动、温度信号)与数字孪生模型间安全可靠的数据传输，部分研究借此捕获物联网传感器数据构建数字孪生[35,36]；MQTT支持低带宽发布-订阅，实现实时数据流[37,38]. 但在实际操作中，如何确保各类信息之间的有效协同和融合，避免信息冲突和冗余，以及如何根据不同的应用场景和需求，动态调整融合策略和决策机制，以实现数字孪生系统对物理世界的动态高效分析、控制、预测和优化，形成深度信息融合的群智决策模式，是当前数字孪生数据交互与融合层面共同面临的重要课题.

因此，一个完备的数字孪生系统必须把物理传感器、控制信号、业务数据与外部开放数据全部打通，并可以利用深度神经网络对多源异构数据进行自动特征提取、缺失插补与噪声抑制，通过时空卷积、图网络或Transformer对未来状态进行高置信度预测，再借助强化学习在线生成最优控制策略，实时反馈给前端

执行机构, 从而将数字孪生从静态可视化拓展为具备预测、优化与自主决策能力的运行系统.

为了直观地理解上文描述的数字孪生系统架构, 图4结合陶飞等提出的五维模型, 展示了射电望远镜数字孪生的实现路径.

其中实体维度对应实际的射电望远镜物理实体, 感知维度则通过传感器实时采集设备状态, 数据维度体现在孪生数据库对多源异构数据的集中管理和处理, 虚拟维度通过数字孪生体实现对物理实体的高保真模拟与模型更新, 而服务维度则由中央服务模块完成智能分析与优化策略生成, 形成闭环的感知-决策-执行体系.

3　射电望远镜的健康监测与数字孪生应用

数字化技术的发展让射电望远镜健康管理进入数字化阶段, 在射电望远镜领域, 数字孪生尚未形成统一的标准定义, 但健康监测与结构健康分析技术始终伴随射电望远镜的发展而演进, 可作为数字孪生技术中的某一环节. 数字技术在望远镜上的应用通常会围绕着望远镜结构变形补偿、站点环境监测、故障检测、天线主反射面精度测量等方面独立开展研究, 其共同目标是保障射电望远镜的高精度运行.

3.1　射电望远镜健康监测应用现状

风[39]、温度[40]等环境载荷对射电望远镜有直接影响, 如图5所示射电望远镜环境影响示意图.

首先在结构变形监测方面, 早期是通过布置传感器采集相关结构变形数据来直接分析和监测天线结构变形情况, 1972年德国Effelsberg 100 m射电望远镜安装应变片与倾斜仪开始实时监测应力与形变[41]; 还有在射电望远镜周围安装风传感器等、在天线结构上安装温度传感器感知环境信息. Ambrosini等人[42]在VLBI天线的基座梁上布置精确的温度传感器, 同时在其仰角轴上布置了倾斜计来分析太阳辐射热对望远镜结构的影响. Doyle[43]使用综合热结构-光学分析预测了由于热滞后效应引起的天线性能退化. Buffa等人[44]使用SRT测站周围布置不同传感器组成的分布式复合系统, 实时测量和预测大气参数来分析台址周围自然环境载荷对射电望远镜的影响.

通过测量主副反射面面形一直是最直接的保障方式. 对于天线主反射面, 从最早期的经纬仪测量方法发展到后来的激光测量法[45]、全息测量法[46]、摄影测量法[47]、光电测量法[48–50], 已经有大量案例应用在主

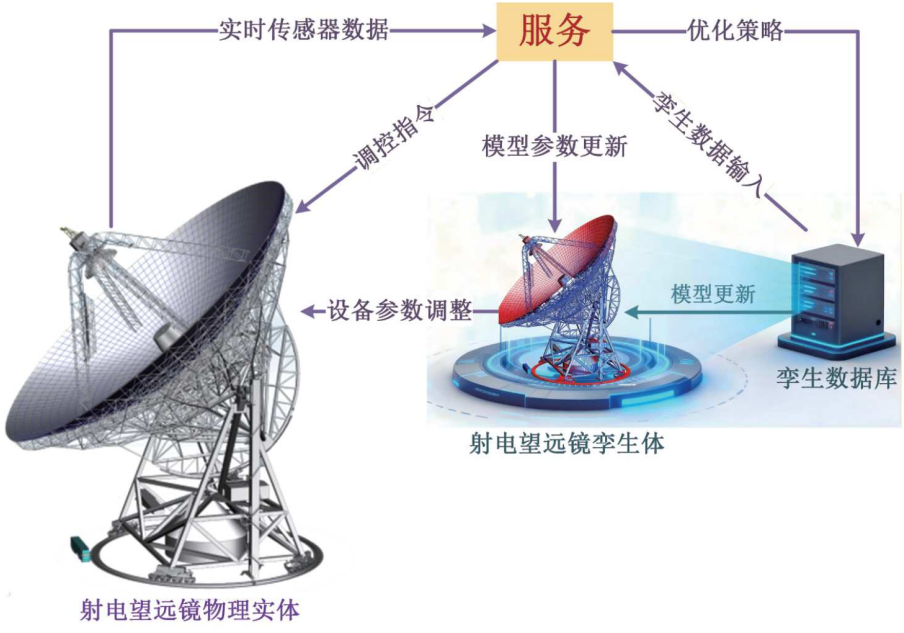


图 4　射电望远镜的数字孪生系统
Figure 4　The digital twin system of the radio telescope.

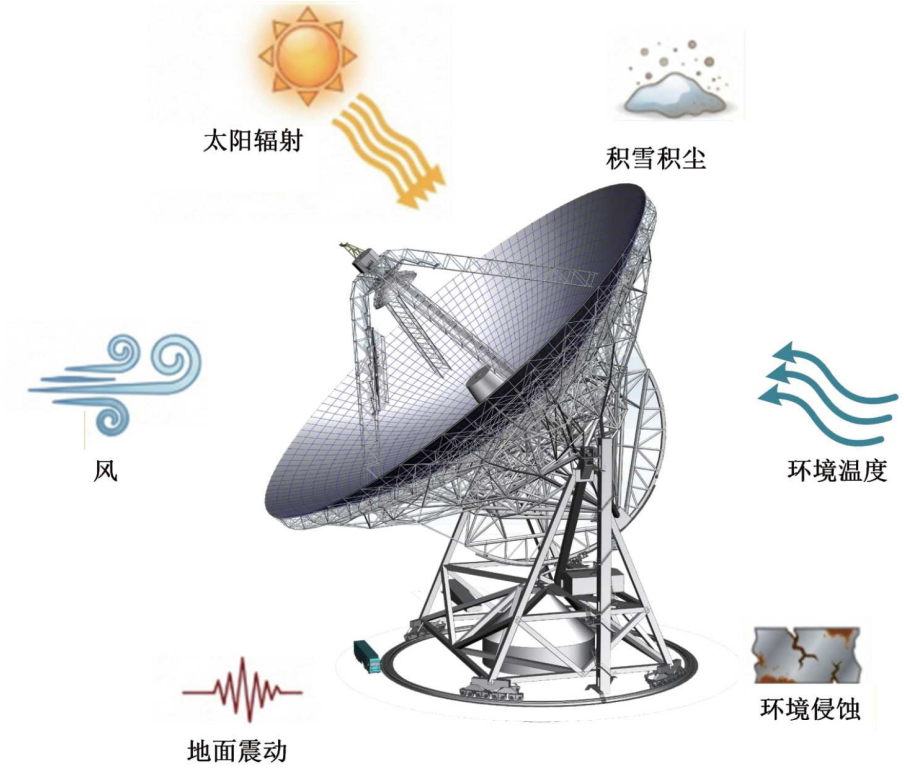


图 5　射电望远镜环境影响示意图
Figure 5　Schematic diagram of environmental impact on radio telescope.

反面面形测量中. 班友等人[51]和汪赞等人[52]详细综述主反射面面形测量方法, 对于天线副反射面, 会因天线主反射面变形和环境载荷而发生副面姿态偏离, 引起整个口径面的光程差变化[53–56], 从而导致天线性能下降, 林上民等人[57,58]使用结构光法开展了天线副反射面位姿测量相关研究并综述了天线副反射面位姿测量的所有相关技术.

随着数字仿真技术的成熟, 数字化结构分析技术的应用实现了天线从物理实体到数字化天线的进一步发展, 为数字模型的构建提供支撑, 通过有限元软件构建相应的数字模型然后进行有限元分析, 降低了天线结构变形分析的难度, 并可对风险作出一定的预测, 通过构建数字模型来开展对望远镜结构形变的预测工作[59]. 1995年英国Lovell 76 m望远镜[60]通过仿真预测金属疲劳风险[61], 意大利SRT射电望远镜团队在望远镜建立初期就建设了有限元模型来分析其重力变形.

远程数字及处理技术的发展进一步提升望远镜维护的便利性, 组成了数字孪生数据处理中重要的一环. 20世纪80年代, 美国Arecibo 305 m望远镜建设风速与温度数据库用于支撑形变补偿; 此后远程数据监控进一步应用在了射电望远镜上, 进一步提升望远镜的健康监测能力[62], 20世纪90年代, 美国VLA引入SCADA, 实现远程状态监控与报警, 通过振动数据识别促动器异常, 形成数据驱动的运维雏形. 由此奠定了面向全生命周期的数据基础[63].

在以上射电望远镜的运维管理研究中, 当前存在若干问题. 其一, 数据采集与分析工作主要聚焦于射电望远镜结构变形的独立监测, 以及天线结构损伤的专项检测, 而利用有限元方法进行的天线结构变形分析也处于相对孤立的状态. 这种碎片化的处理方式, 忽视了影响天线精度的诸多综合因素. 实际上, 天线精度的保障是一个系统工程, 涉及结构变形、材料性能、环境因素等多方面的交互作用.

其二, 现有的有限元仿真技术虽然能够提供一定的结构变形预测, 但其仿真结果的真实性仍有待提升, 且难以实现实时性的动态监测. 同时, 数据采集、处理与分析各环节之间缺乏有效的协同机制, 导致对射电望远镜天线变形各部分的理解较为片面, 无法形成全

面而准确的认识.

3.2　数字孪生技术在射电望远镜上的应用现状

数字孪生技术在数据采集与天线状态管理的基础上, 融入了对多源数据的处理, 能够整合数据采集、有限元分析、结构监测等多源信息，通过数据融合与交互，构建出高度逼真的虚拟模型，为射电望远镜的运维管理带来了新的思路. 当前数字孪生在射电望远镜上的应用还处于初级阶段且应用案列较少，可从结构安全保障、面形精度保障、天线结构轻量化评估、全生命周期管理等方面梳理其应用现状.

(1) 结构安全保障

贵州FAST射电望远镜在结构安全保障上有典型应用. 丁宁[64]率先构建“Revit-ANSYS-SQL”三层内核的五层DT框架，以节点平衡方程构建目标函数，采用序列二次规划在线修正索力，实现物理实体与虚拟模型的实时映射与超限预警；Li等人[65]通过引入雨流计数获取钢缆真实应力谱, 结合Miner线性累积损伤评估剩余寿命，实现从经验维护向基于状态的维护(CBM)的转换. Li和Huo[66]将规模扩展至29359个组件，利用机器学习封装故障模式，形成可视化-仿真-数据双向闭环健康管理平台. 上述工作已实现“传感-模型-CBM-可视化”的完整闭环, 在FAST调试阶段即避免多次高空作业，为维护效率提升与安全事故预防提供了可直接参考的样板.

(2) 面形与指向精度保障

在毫米波全可动望远镜上保障其面形精度并抑制指向误差是关键. Wei等人[67]基于五维DT概念建立了WRT 70 m望远镜的参数化几何模型，融合实测温度与FEA热-结构耦合仿真，构建指向误差模型，实现实时热误差估算，并为季节性指向补偿提供依据. Wang等人[68]则聚焦主面局部形变, 提出DAE-DCNN混合方法，显著降低相位测量硬件复杂度. 两项研究共同将“热-形变-指向”纳入孪生框架，为大型射电望远镜在太阳辐射环境下的高精度观测提供了在线误差评估方法.

(3) 天线结构轻量化评估

通用反射面天线需在观测过程中实时评估结构性能, 但完整的FEA单次计算耗时从数分钟到数小时, 无法满足“边观测-边评估”的需求. Cui等人[69]首先建立有限元样本库，并采用高斯过程回归构建代理模型，随后，通过Socket和串口通信实现传感器与孪生空间实时互联，并利用Unity引擎渲染变形云图，从而实现毫秒级性能预测与运动姿态交互. Cui等人[70]进一步引入改进QEM网格简化算法，削减网格规模，结合随机森林回归与RBF插值构建了高精度的代理预测模型, 在保持与物理实体一致性的前提下, 代理模型可把结构计算推进至实时范畴，为后续主动面板调整、风载补偿等闭环控制奠定算力基础.

(4) 天线全生命周期管理

射电望远镜本身既要担任探测任务，还要承担科普任务，望远镜的无线电静默与科普和巡检维护相矛盾，FAST周围5 km射电静默区内禁止无线通信，导致高空设备巡检、科普展示与数据归档同时受阻；Arecibo望远镜因老化与维护成本过高而坍塌[71]，更凸显“数字遗产”的必要性. Wen等人[72]提出“点-线-面-模型”快速建模方法, 集成HPC, VR与OPC UA有线传输, 构建覆盖健康监测、部件维护、科普教育与信息传承的DT原型系统. 该系统实现远程VR巡检、数字备件库与科普可视化, 并已在FAST调试期承担多次高空复核任务. Li和Huo[66]的健康管理平台则通过WinForm界面把监测、诊断、预测、维护四大模块集成于同一窗口, 形成24 h无人值守模式, 现场仅保留紧急干预人员. 两项工作共同把“运维-科普-遗产”纳入统一孪生体，为电磁静默环境下大科学装置的“少人化、知识化、可持续”运行提供了示范路径.

目前，数字孪生技术在大口径全可动射电望远镜上的应用仍停留在理论层面，尚未实际在望远镜工程运行与观测任务中形成成熟的工程化落地. FAST的数字孪生案例虽有一定参考价值，但全可动射电望远镜结构复杂、面临问题多样，在数字孪生过程中，多物理场耦合建模方法不统一、数据采集融合技术不足、模型验证更新机制不完善等问题突出. 所以, 要推动全可动射电望远镜数字孪生技术发展，需深入分析探讨这些问题.

4　射电望远镜的数字孪生实施探索与挑战

对于超大口径全可动射电望远镜而言，构建孪生系统时，若要一次全面整体地构建数字孪生系统难度很高，可以参考其他领域的研究尝试先构建局部数字孪生系统，然后逐步构建整体孪生系统. Jia等人[73]为

应对多尺度、多场景下复杂数字孪生建模的挑战，提出了一种新型建模方法. 该方法通过模型分解与组装实现复杂数字孪生的构建，旨在提高数字孪生的可扩展性、互操作性和复用性，为智能制造等领域提供更高效、更精准的数字孪生建模解决方案.

4.1　问题拆解与系统架构

针对射电望远镜上现存的问题，首先将望远镜拆解成面形精度保障的主反射面孪生系统、副面位姿保障的副反射面孪生系统、背架变形规律预测的背架结构孪生系统、指向精度保障的伺服孪生系统、轮轨健康保障的轮轨孪生系统五个局部孪生系统，然后进一步通过数据融合阶段将多源数据融合，逐步实现功能闭环并最终集成全局数字孪生系统.

(1) 主反射面孪生系统(面形精度保障)

主反射面的核心在于实时监测反射面形变并通过主动面技术动态补偿[74–76]，保障天线高精度观测时的接收精度. 在数据感知上, 使用主反射面面形测量系统采集变形数据并进行面形拟合，然后结合主面数字模型进行有限元分析, 通过构建热-力耦合模型进行主反射面变形规律预测[77]. 在调整保障上通过序列二次规划算法计算促动器调整量，用以补偿重力[78]、热致变形[79]. 当孪生系统数据累积到一定量时，结合历史控制数据训练深度强化学习模型以替代有限元计算和传统的面形拟合方法, 实现数据快速采集到变形调整, 并优化促动器群组协同策略[80].

(2) 副反射面孪生系统(电性能保障)

通过对副反射面姿态进行主动调整来实现电性能补偿是一种有效手段[58,81], 在数据感知上, 通常使用激光测量法和摄影测量法感知副面姿态[82]，实时获取副面空间坐标，将处理后的数据送入调整机构，建立Stewart六自由度并联机构模型[83,84]，驱动虚拟模型实时映射物理实体运动轨迹, 并实时调整副面姿态.

(3) 背架结构孪生系统(变形规律预测)

射电望远镜背架变形影响主面面形、副面位姿和指向精度, 因此分析背架变形, 研究其受环境影响时的变形规律，为主副反射面调整和指向精度调整提供依据. 引起望远镜背架结构变形以环境因素为主[85–88], 因此在数据采集环节，通过在背架关键节点部署温度传感器，或通过在天线周围布置热测量仪器[89,90]采集天线热变形数据，然后在数据阶段使用历史数据来构建神经网络快速预测获取整个天线的温度分布[91]. 最后使用有限元分析方法构建数字模型来分析其变形分布并预测变形规律[92], 为将数据用于预测调整做准备.

(4) 伺服系统孪生系统(指向精度保障)

射电望远镜通常具有较大的结构质量，其运动控制存在工程难点，天线伺服系统中摩擦、间隙、结构柔性等非线性因素[93–98]，以及风等外部环境干扰都对指向精度产生负面影响，这些因素共同导致指向偏差和控制滞后[99]，在伺服指向精度保障上，数据采集环节通常使用编码器获取望远镜位置和速度数据[99]，然后基于物理机理开发动态仿真模型，用于构建天线伺服系统的数字孪生模型，最后利用构建后的伺服系统数字孪生模型指导伺服系统进行自抗扰控制以保障望远镜的指向性能.

(5) 轮轨孪生系统(结构健康保障)

射电望远镜轮轨[100–104]作为整个大型结构的地基, 也是保障天线全可动最重要的一环, 保障轮轨结构健康是保障天线正常运行的关键，方位轨道所面临的问题在于装配阶段的误差和长期运行带来的轮轨损伤会影响整个天线的指向精度[105]. 数据采集与感知层采用电磁超声技术实时监测轮轨表面损伤，动态建模层基于瞬态有限元分析构建多物理场耦合模型来模拟损伤演化过程. 功能服务层通过仿真结果生成预测性维护策略，结合指向误差修正方法，将轮轨变形量转换为实时控制指令, 动态补偿天线伺服系统. 此外, 依据接触压力安全阈值和磨损速率模型规划部件更换周期, 优化寿命管理, 闭环反馈层将实际运维数据反馈至孪生模型, 修正材料参数假设或更新接触算法, 实现模型自进化.

4.2　多源数据融合与整体孪生模型构建探讨

为实现射电望远镜整体性能优化，需通过多源数据融合技术整合主反射面(面形测量数据)、副反射面(位姿补偿参数)、背架结构(变形监测数据)、伺服系统(指向误差修正值)及轮轨系统(健康状态信息)等分布式孪生子系统的异构数据. 首先, 基于统一时空基准(数据时间、天线坐标系)进行数据对齐，并通过数据清洗与特征提取消除冗余噪声，形成标准化全局数据集[106].

通过融合数据驱动全局耦合分析模型，实现跨系统协同优化. 主反射面形变与副反射面位姿调整通过

机电耦合理论关联，结合背架重力变形预测和伺服系统动态响应，提升指向精度；轮轨健康数据为结构安全评估提供实时依据. 该模型支持动态补偿策略，如风载下背架变形可通过副面主动调整抵消电性能损失.

最终，如图6所示, 通过可视化平台集成射电望远镜各子系统孪生模型[107], 实现全生命周期状态监测与决策优化.

5　总结和展望

本文系统梳理了数字孪生技术的完整逻辑链条, 涵盖当前孪生模型构建、数据采集、数据融合及数据交互的全流程技术细节, 并引入深度学习等前沿技术. 详细分析了当前数字孪生在大口径射电望远镜上的应用现状. 为数字孪生技术在超大口径射电望远镜上的深度应用提供了全流程技术参考，或可有效支撑并优化射电望远镜的精度保障体系.

将数字孪生技术与深度学习结合并应用于超大口径射电望远镜上，可以从以下几个方面展开分析和展望, 以保障其高精度运行.

(1) 克服当前射电望远镜数字孪生模型多为静态理想模型的局限，引入几何结构自适应调整机制. 利用激光扫描、摄影测量等实测数据，驱动虚拟模型中的网格节点进行动态重构，使其能够实时反映物理实体因重力变形或热变形产生的真实几何状态. 确保数字孪生体在全生命周期内始终与物理实体的形变保持几何一致性，为高精度指向控制提供实时更新的高保真基准.

(2) 融合射电望远镜的物理机理模型(有限元、多体动力学)与传感器监测数据(温度场、应变场)，构建机理-数据双驱动的误差溯源模型. 不仅要利用深度学习处理多源异构数据，更要将其植入到误差传递链的物理方程中，精准解析不同环境载荷对主反射面面形和指向精度的具体贡献权重，从而制定更具针对性的主动面调整与伺服补偿策略，实现极端环境下的极致观测性能.

(3) 利用历史观测数据反演表征关键精度的模型参数，输入数字孪生引擎中进行加速服役性能演化趋势推演. 通过虚拟环境下的多应力(极端温差、阵风序列)加载，实现对望远镜未来数年精度保持能力的快速预测与评估，将事后维护转变为基于预测的主动精度

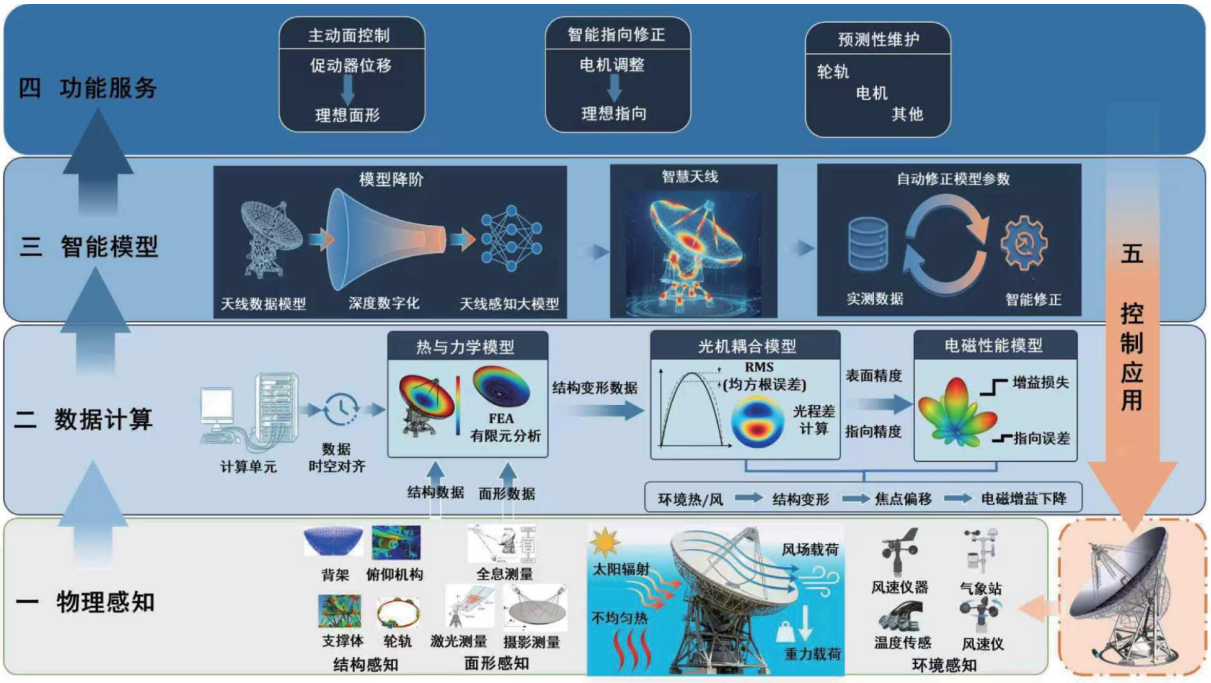


图 6　大型射电望远镜数字孪生构建框架
Figure 6　Framework for the construction of digital twins of large radio telescopes.

保持.数字孪生技术通过虚实融合、数据驱动和智能决策, 实现对复杂环境因素的感知、预测和主动控制, 为下一代高精度射电望远镜的发展提供关键技术支撑, 或能将射电望远镜运行时的指向精度提升到新的水平.

参考文献

1 Yan J, Zhang H Y. Introduction to main application goals of five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (in Chinese). J Deep Space Explor, 2020, 7: 128–135 [严俊, 张海燕. 500米口径球面射电望远镜(FAST)主要应用目标概述. 深空探测学报, 2020, 7: 128–135]

2 Yan Y F, Wang C S, Li S, et al. Development of large-aperture radio telescopes and applications of coupled structural-electromagnetic theory (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 129501 [严粤飞, 王从思, 李帅, 等. 大型射电望远镜天线发展动态及机电耦合应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 129501]

3 Wang C S, Xiao L, Xiang B B, et al. Development of active surface technology of large radio telescope antennas (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 059503 [王从思, 肖岚, 项斌斌, 等. 大型射电望远镜天线主动面补偿研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 059503]

4 Xiang B B, Xue F, Liu X, et al. Preliminary design of the control network for the QTT active surface system (in Chinese). Electro-Mech Eng, 2018, 34: 51–54, 64 [项斌斌, 薛飞, 刘璇, 等. QTT主动面系统控制网络初步设计. 电子机械工程, 2018, 34: 51–54, 64]

5 Wang N, Xu Q, Ma J, et al. The Qitai radio telescope. Sci China-Phys Mech Astron, 2023, 66: 289512

6 Tao F, Qi Q, Liu A, et al. Data-driven smart manufacturing. J Manuf Syst, 2018, 48: 157–169

7 Cimino C, Negri E, Fumagalli L. Review of digital twin applications in manufacturing. Comput Ind, 2019, 113: 103130

8 Jeremiah S R, El Azzaoui A, Xiong N N, et al. A comprehensive survey of digital twins: Applications, technologies and security challenges. J Syst Archit, 2024, 151: 103120

9 Bongomin O, Mwape M C, Mpofu N S, et al. Digital twin technology advancing industry 4.0 and industry 5.0 across sectors. Results Eng, 2025, 26: 105583

10 Tao F, Liu W R, Zhang M, et al. Five-dimensional model of digital twin and its ten application areas (in Chinese). Comput Integr Manuf Syst, 2019, 25: 1–18 [陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用. 计算机集成制造系统, 2019, 25: 1–18]

11 Song X, Zhang H, Wang L, et al. Deep learning techniques for point cloud tasks: A review. Appl Intell, 2025, 55: 991

12 Mirzaei K, Arashpour M, Asadi E, et al. 3D point cloud data processing with machine learning for construction and infrastructure applications: A comprehensive review. Adv Eng Inf, 2022, 51: 101501

13 Baghalzadeh Shishehgarkhaneh M, Keivani A, Moehler R C, et al. Internet of things (IoT), building information modeling (BIM), and digital twin (DT) in construction industry: A review, bibliometric, and network analysis. Buildings, 2022, 12: 1503

14 Angjeliu G, Coronelli D, Cardani G. Development of the simulation model for digital twin applications in historical masonry buildings: The integration between numerical and experimental reality. Comput Struct, 2020, 238: 106282

15 Wang L, Wang C, Li X, et al. State perception and prediction of digital twin based on proxy model. IEEE Access, 2023, 11: 36064–36072

16 Ritto T G, Rochinha F A. Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures. Mech Syst Signal Process, 2021, 155: 107614

17 Alizadehsalehi S, Yitmen I. Digital twin-based progress monitoring management model through reality capture to extended reality technologies (DRX). Smart Sustain Built Environ, 2023, 12: 200–236

18 Zhang C Y, Wu J H, Chen W L, et al. Fast solution methods of parameterized high-fidelity models (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 114605 [张纯禹, 吴家桦, 陈威林, 等. 参数化高保真模型的快速求解方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 114605]

19 Benner P, Gugercin S, Willcox K. A survey of projection-based model reduction methods for parametric dynamical systems. SIAM Rev, 2015, 57: 483–531

20 Ahmed T. Data-Driven Model Reduction Strategies for Dynamical Systems. Dissertation for Doctoral Degree. Knoxville: University of Tennessee, 2024

21 Hinze M, Kutz J N, Mula O, et al. Model Order Reduction and Applications. Cham: Springer, 2023

22 Hu X, Olgun G, Assaad R H. An intelligent BIM-enabled digital twin framework for real-time structural health monitoring using wireless IoT sensing, digital signal processing, and structural analysis. Expert Syst Appl, 2024, 252: 124204

23 Hu H J, Wang M B, Lei Q F, et al. Digital twin hospital: Transforming the future of healthcare (in Chinese). J Biomed Eng, 2024, 41: 376 [胡慧娟, 王明帮, 雷崎方, 等. 数字孪生医院: 改变医疗的未来. 生物医学工程, 2024, 41: 376]

24 Song M Q, Chen F K, Liu X J. A review of data fusion methods for digital twin in nuclear reactors (in Chinese). Nucl Power Eng, 2025, 46: 14–37 [宋美琪, 陈富坤, 刘晓晶. 面向核反应堆数字孪生的数据融合方法综述. 核动力工程, 2025, 46: 14–37]

25 Radhakrishnan P, Ramaiyan K, Vinayagam A, et al. A stacking ensemble classification model for detection and classification of power quality disturbances in PV integrated power network. Measurement, 2021, 175: 109025

26 Liu M, Fang S, Dong H, et al. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. J Manuf Syst, 2021, 58: 346–361

27 Yuan J, Ma J, Tian Z, et al. Digital twin integration with data fusion for enhanced photovoltaic system management: A systematic literature review. IEEE Open J Power Electron, 2024, 5: 1045–1058

28 Xiong W, Long X, Bordas S P A, et al. The deep finite element method: A deep learning framework integrating the physics-informed neural networks with the finite element method. Comput Methods Appl Mech Eng, 2025, 436: 117681

29 Yang Y, Lv H, Chen N. A survey on ensemble learning under the era of deep learning. Artif Intell Rev, 2023, 56: 5545–5589

30 Li X, Liu F. A mathematical comparison of data assimilation and machine learning in earth system state estimation from a bayesian inference viewpoint. Inf Geography, 2025, 1: 100001

31 Pirayawaraporn A, Sappaniran S, Nooraksa S, et al. Innovative sensorless dual-axis solar tracking system using particle filter. Appl Energy, 2023, 338: 120946

32 Lin Y H, Chiang C H, Yu C M, et al. Intelligent docking control of autonomous underwater vehicles using deep reinforcement learning and a digital twin system. Expert Syst Appl, 2026, 296: 129085

33 Schroeder G N, Steinmetz C, Pereira C E, et al. Digital twin data modeling with automationML and a communication methodology for data exchange. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49: 12–17

34 Luder A, Hoffmann D, Gudder R, et al. Representing property dependencies within automationML based digital twins. In: Proceedings of the 2024 IEEE 29th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Padova: IEEE, 2024. 1–4

35 Dosluoglu T, MacDonald M. Circuit design for predictive maintenance. Adv Artif Intell Mach Learn, 2022, 02: 533–539

36 Kumar A, Mane T, Kulkarni M S, et al. Vibration signal-based fault prediction using few-shot learning in the digital twin ecosystem. IET Conf Proc, 2023, 2023(23): 1–6

37 Huang H, Yang L, Wang Y, et al. Digital twin-driven online anomaly detection for an automation system based on edge intelligence. J Manuf Syst, 2021, 59: 138–150

38 Abdullahi I, Longo S, Samie M. Towards a distributed digital twin framework for predictive maintenance in industrial internet of things (IIoT). Sensors, 2024, 24: 2663

39 Qian H, Chen D, Fan F, et al. Evaluation of solar temperature field under different wind speeds for Shanghai 65 m radio telescope. Int J Steel Struct, 2016, 16: 383–393

40 Wang C S, Liu X, Wang W, et al. Analysis method for temperature distribution characteristic and thermal distortion of large reflector antennas (in Chinese). J Astron, 2013, 34: 1523–1528 [王从思, 刘鑫, 王伟, 等. 大型反射面天线温度分布规律及变形影响分析. 宇航学报, 2013, 34: 1523–1528]

41 Hachenberg O, Grahl B H, Wielebinski R. The 100-meter radio telescope at effelsberg. Proc IEEE, 1973, 61: 1288–1295

42 Ambrosini R, Grueff G, Morsiani M, et al. Analysis of the alidade temperature behaviour of the medicina VLBI radiotelescope. Astrophys Space Sci, 1996, 239: 247–258

43 Doyle K B. Antenna performance predictions of a radio telescope subject to thermal perturbations. In: Proceedings of the SPIE Optical Engineering + Applications. San Diego: SPIE, 2009

44 Buffa F, Causin A, Cazzani A, et al. The Sardinia Radio Telescope: A comparison between close-range photogrammetry and finite element models. Math Mech Solids, 2017, 22: 1005–1026

45 Payne J, Parker D. The Laser Ranging System for the GBT. Green Bank: National Radio Astronomy Observatory (NRAO), 1990: GBT Memo No.57

46 Hunter T R, Schwab F R, White S D, et al. Holographic measurement and improvement of the green bank telescope surface. Publ Astron Soc Pac, 2011, 123: 1087–1099

47 Subrahmanyan R. Photogrammetric measurement of the gravity deformation in a Cassegrain antenna. IEEE Trans Antennas Propagat, 2005, 53:

2590–2596
48 Konyakhin I A, Kopylova T V, Konyakhin A I. Optic-electronic autocollimation sensor for measurement of the three-axis angular deformation of industry objects. In: Proceedings of the Optical Sensing and Detection II. Brussels, 2012. 424–430
49 Konyakhin I A, Timofeev A N, Usik A A, et al. Optic-electronic systems for measuring the angle deformations and line shifts of the reflecting elements at the rotateable radio-telescope. In: Proceedings of the Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII. Munich, 2011. 1127–1132
50 Konyakhin I, Stepashkin I, Petrochenko A. System of the optic-electronic sensors for control position of the radio telescope elements. In: Proceedings of the Optical Sensing and Detection IV. Brussels, 2016. 688–693
51 Ban Y, Liu Y J, Wang N, et al. Review of measurement methods for the main reflection surface of radio telescope antennas (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 219503 [班友, 刘源杰, 王娜, 等. 射电望远镜天线主反射面面形测量方法综述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024: 5: 219503]
52 Wang Z, Kong D Q, Chen Z P. A review of surface accuracy measurement methods for large radio telescopes (in Chinese). Astron Res Technol, 2020, 17: 52–59 [汪赞, 孔德庆, 陈志平. 大型射电望远镜面形精度测量方法研究综述. 天文研究与技术, 2020, 17: 52–59]
53 Duan B Y, Wang C S. Reflector antenna distortion analysis using MEFCM. IEEE Trans Antennas Propagat, 2009, 57: 3409–3413
54 Imbriale W A, Britcliffe M J, Brenner M. Gravity Deformation Measurements of NASA's Deep Space Network 70 Meter Reflector Antennas. Technical Report. Interplanetary Network Progress Report. 2001
55 Griffith P. Thermal Design of The Large Millimeter Telescope (LMT) and Expected Accuracy of Temperatures from Measurements. Technical Report. Simpson Gumpertz and Heger Inc. 1997
56 Wang M, Wang W, Wang C S, et al. A practical approach to evaluate the effects of machining errors on the electrical performance of reflector antennas based on paneled forms. Antennas Wirel Propag Lett, 2014, 13: 1341–1344
57 Lin S M, Zhang X, Jin Y, et al. Development of large-aperture antenna subreflector pose measurement technology (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 219504 [林上民, 张璇, 金玉, 等. 大口径天线副面姿态测量技术研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 219504]
58 Lin S M. Research on Pose Measurement Technology for Large-Aperture Antenna Sub-Reflectors Based on Stereo Structured Light (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2025 [林上民. 基于立体结构光的大口径天线副面位姿测量技术研究. 博士学位论文. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2025]
59 Buffa F, Pinna A, Sanna G. A simulation tool assisting the design of a close range photogrammetry system for the sardinia radio telescope. ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci, 2016, III-5: 113–120
60 Lyne A, Morison I. The Lovell Telescope and its role in pulsar astronomy. Nat Astron, 2017, 1: 835–840
61 Hanbury Brown R, Lovell A C B. Large radio telescopes and their use in radio astronomy. Vistas Astron, 1955, 1: 542–560
62 Burnside R G, Herrero F A, Meriwether Jr. J W, et al. Optical observations of thermospheric dynamics at Arecibo. J Geophys Res, 1981, 86: 5532–5540
63 Cardoso A I R. Estudo da viabilidade de tornar um atelier de componentes têxteis 100% renovável em termos energéticos até 2025. Dissertation for Master's Degree. Guimarães: Universidade do Minho, 2021
64 Ding N. Research on the Development and Model Updating of the Digital Twin System for the FAST Cable Net (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2023 [丁宁. FAST索网数字孪生系统研发及模型修正研究. 硕士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2023]
65 Li Q W, Jiang P, Li H. Prognostics and health management of FAST cable-net structure based on digital twin technology. Res Astron Astrophys, 2020, 20: 067
66 Li B Y, Huo L S. FAST health management system based on digital twinning. In: Proceedings of CIBv 2024. Cham: Springer, 2025. 814–825
67 Wei S, Kong D, Wang B, et al. Estimation of pointing errors of large radio telescopes under solar radiation based on digital twin. Symmetry, 2024, 16: 668
68 Wang B, Ye Q, Meng G. Radio telescope surface measurement via deep learning. J Phys-Conf Ser, 2023, 2650: 012024
69 Cui H, Xiang B, Mo S, et al. Real-time state evaluation system of antenna structures in radio telescopes based on a digital twin. Appl Sci, 2025, 15: 3325

70 Cui H, Xiang B, Wang W, et al. Digital twin system for reflector antenna structure performance evaluation based on surrogate model. In: Proceedings of the 2024 IEEE 7th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). Xi'an: IEEE, 2024. 263–266

71 Witze A. Renowned Arecibo telescope won't be rebuilt—and astronomers are heartbroken. Nature, 2022, 610: 618–619

72 Wen J, Liu Z, Song Y, et al. Rapid modeling method for the digital twin of five-hundred-meter aperture spherical radio telescope. 2022, 49: IJCS_49_2_22

73 Jia W, Wang W, Zhang Z. From simple digital twin to complex digital twin part I: A novel modeling method for multi-scale and multi-scenario digital twin. Adv Eng Inf, 2022, 53: 101706

74 Zhang Z, Ye Q, Wang N, et al. A multi-scale deformation measurement method for large parabolic antenna surfaces based on shape sensing and ray tracing. Measurement, 2025, 256: 118036

75 Zhang Y, Li G, Zhou G, et al. Real-time closed-loop active surface technology of a large radio telescope. Publ Astron Soc Pac, 2022, 134: 015003

76 Orfei A, Morsiani M, Zacchiroll G, et al. An active surface for large reflector antennas. IEEE Antennas Propag Mag, 2004, 46: 11–19

77 Attoli A, Stochino F, Buffa F, et al. Sardinia radio telescope structural behavior under solar thermal load. Structures, 2022, 39: 901–916

78 Dong J, Zhong W, Wang J, et al. Correcting gravitational deformation at the Tianma radio telescope. IEEE Trans Antennas Propagat, 2018, 66: 2044–2048

79 Zhang D, Zhao R B, Yan Z, et al. Distributed control software for the active surface system of Tian-ma radio telescope. Res Astron Astrophys, 2023, 23: 115024

80 Ban Y, Shi S, Wang N, et al. The adjustment analysis method of the active surface antenna based on convolutional neural network. Res Astron Astrophys, 2024, 24: 065024

81 Xu Q, Lian P Y. Application of laser tracker in online surface adjustment of large dual-reflector antennas (in Chinese). Geomat Inf Sci Wuhan Univ, 2022, 47: 396–404 [许谦, 连培园. 激光跟踪仪在大型双反射面天线形面在线调整中的应用. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47: 396–404]

82 Rasha A, Natusch T, Granet C, et al. Conversion of a telecommunications antenna into a radio telescope: Laser scanner measurements of optics and dish surface quality of a cassegrain antenna. J Astron Instrum, 2019, 08: 1950010

83 Keshtkar S, Hernandez E, Oropeza A, et al. Orientation of radio-telescope secondary mirror via adaptive sliding mode control. Neurocomputing, 2017, 233: 43–51

84 Kazezkhan G, Xiang B, Wang N, et al. Dynamic modeling of the stewart platform for the NanShan radio telescope. Adv Mech Eng, 2020, 12: 1687814020940072

85 Wang W, Wang C, Duan B, et al. Compensation for gravity deformation via subreflector motion of 65 m shaped cassegrain antenna. IET Microw Antenna Prop, 2014, 8: 158–164

86 Liu Y. Research on non-uniform temperature field and its effects on the structure of the shanghai 65-meter radio telescope (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 [柳叶. 上海65米射电望远镜结构非均匀温度场及其效应研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013]

87 Qian H L, Zhong J, Fan F. Non-uniform solar-induced temperature field in the antenna structure of the Shanghai 65 m radio telescope (in Chinese). China Civil Eng J, 2014, 47: 39–46 [钱宏亮, 钟杰, 范峰. 上海65 m射电望远镜天线结构日照非均匀温度场. 土木工程学报, 2014, 47: 39–46]

88 Zhong J. Research on non-uniform temperature fields in the structure of giant radio telescopes (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 [钟杰. 巨型射电望远镜结构非均匀温度场研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012]

89 Song S, Zhang Z, Wang G, et al. Investigations of thermal deformation based on the monitoring system of Tianma 13.2 m VGOS telescope. Res Astron Astrophys, 2022, 22: 095003

90 Dong J, Fu L, Liu Q, et al. Measuring and analyzing thermal deformations of the primary reflector of the Tianma radio telescope. Exp Astron, 2018, 45: 397–410

91 Zhang S J, Xu Q, Wang H, et al. Prediction of temperature field distribution on the back frame of a radio telescope based on EVSC unsupervised feature selection and MIMO-BP neural network (in Chinese). Acta Astron Sin, 2025, 66: 11–21 [张世交, 许谦, 王惠, 等. 基于EVSC无监督特

征选择与MIMO-BP神经网络预测射电望远镜背架温度场分布. 天文学报, 2025, 66: 11–21]
92 Fu L, Yu L F, Tang J S, et al. Thermal analysis of the backup structure of the Tianma telescope. Res Astron Astrophys, 2022, 22: 105011
93 Kaidanovskiy M N, Belousov N Y, Bykov V Y, et al. The RT-32 radio telescope pointing system. Instrum Exp Tech, 2012, 55: 357–367
94 Li P, Bao H, Wei S T, et al. The design of two degree of freedom compound controller for 110 m radio telescope (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 059510 [李鹏, 保宏, 尉胜腾, 等. 110 m大射电望远镜的两自由度复合控制器设计. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 059510]
95 Li N, Wang N, Liu Z, et al. Active disturbance rejection-based double-loop control design for large antenna's servo system. Publ Astron Soc Pac, 2023, 135: 115001
96 Phuong T H, Belov M P, Lanh N V. Dry friction compensation for radio telescope servo drive based on the model predictive control. In: Proceedings of the 2019 XXII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)). St. Petersburg: IEEE, 2019. 77–80
97 Phuong T H, Belov M P, Dang Khoa T. Model predictive controller based on Laguerre functions for large radio telescope servo control system. In: Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Moscow: IEEE, 2018. 1003–1007
98 Yang L, Wang N, Liu Z, et al. Tracking and disturbance suppression of the radio telescope servo system based on the equivalent-input-disturbance approach. Adv Astron, 2024, 2024: 1–13
99 Li N, Xu Q, Wang N, et al. Re-optimized design for the ADR-based dual-loop controller of 100 m class aperture radio telescope. Machines, 2024, 12: 448
100 Shi H Q, Xu Q, Wang N, et al. Finite element analysis of wheel-rail rolling contact for large-aperture radio telescopes (in Chinese). Astron Techn Instrum, 2022, 19: 95–102 [师洪强, 许谦, 王娜, 等. 大口径射电望远镜轮轨滚动接触有限元分析. 天文技术与仪器, 2022, 19: 95–102]
101 Wang S G, Kong D Q, Chen Z P, et al. A review of wheel-rail contact research for large antennas (in Chinese). Astron Res Technol, 2014, 11: 27–33 [王松根, 孔德庆, 陈志平, 等. 大型天线轮轨接触研究综述. 天文研究与技术, 2014, 11: 27–33]
102 Jin C, Ban Y, Feng S. A method for damage detecting of large reflector antennas wheel-rail based on electromagnetic ultrasonic technology. IEEE Access, 2024, 12: 54073–54086
103 Yin R, Lan H, Xu Q. Thermomechanical analysis in wheel-rail contact at the heat-affected zone for large radio telescope tracks. J Therm Stresses, 2025, 48: 1189–1208
104 Li N, Duan B, Li X, et al. A reverse-design strategy for the track error of the Qi Tai telescope based on pointing accuracy. Engineering, 2022, 13: 209–216
105 Xue S, Ma K, Wang C, et al. A conceptual investigation of a large radio telescope support point number effect on its pointing accuracy. Int J Antennas Propag, 2020, 2020: 1–16
106 Sinha S, Lee Y M. Challenges with developing and deploying AI models and applications in industrial systems. Discov Artif Intell, 2024, 4: 55
107 Bhatti G, Mohan H, Raja Singh R. Towards the future of smart electric vehicles: Digital twin technology. Renew Sustain Energy Rev, 2021, 141: 110801

Challenges of digital twin applications for radio telescopes

FENG Chen[1], LIU Yuanjie[1], CHENG Anyu[1*] & CHEN Yong[2]

[1] *School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China*
[2] *School of Vehicle Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China*
**Corresponding author (email: chengay@cqupt.edu.cn)*

Large-aperture, high-frequency radio telescopes are prone to structural deformation under the influence of gravity, temperature, wind load and other environmental factors, which in turn affects the shape of the main reflector and pointing accuracy. Therefore, this paper systematically reviews the virtual-real fusion diagnosis mechanism and application progress of digital twins in radio telescopes. Firstly, the differences and boundaries between digital twins and traditional digital simulation and state monitoring are clarified. Then, the methods in FAST, QTT, and other projects are summarized, and the current main challenges such as multi-source heterogeneous and multi-scale fusion, robust prediction under model uncertainty and real-time constraints, as well as communication delay and system complexity in engineering implementation are summarized. Looking to the future, in order to improve environmental adaptability and high-frequency observation capabilities, combined with deep learning, a mechanism-data deeply coupled digital twin model is constructed to provide new ideas and paths for the robust operation and performance improvement of the next generation of radio telescopes.

radio telescope, digital twin, deep learning, mechanism-data fusion

PACS: 07.05.Tp, 84.40.Ba, 95.55.Jz

doi: 10.1360/SSPMA-2025-0491