中波转播台数字孪生系统的设计

刘凯莉 庄必豪
浙江省中波发射管理中心 浙江 丽水 323000

摘 要 浙江省中波发射管理中心丽水广播转播台面临迁建，技术升级势在必行。随着广播电视数字化转型的推进，传统运维与设计模式已难以适配台站的复杂业务场景需求。本文围绕数字孪生技术在转播台中的应用展开，首先分析新建转播台业务对系统稳定性、抗干扰能力等方面的需求，其次提出分层的数字孪生系统架构设计，涵盖感知、网络、平台等层级，最后阐述孪生模型的构建方法，包括初始化建模、动态更新、验证校准等，旨在通过数字孪生技术的应用，可实现新建丽水转播台的虚实映射与动态优化，助力其向数据驱动转型，提升运行效率与可靠性。

关键词 数字孪生技术；中波转播台；系统架构；模型构建

Design of a Digital Twin System for Medium-Wave Broadcasting Stations

Liu Kai-li, Zhuang Bi-hao
Zhejiang Medium-Wave Transmission Management Center, Lishui 323000, Zhejiang Province, China

Abstract The Lishui Broadcasting Relay Station of Zhejiang Medium-Wave Transmission Management Center is facing relocation, making technological upgrade imperative. With the advancement of digital transformation in radio and television, traditional operation, maintenance, and design models are no longer adequate to meet the complex business scenario requirements of the station. This paper focuses on the application of digital twin technology in broadcasting relay stations. It first analyzes the requirements of the new broadcasting station's operations concerning system stability and anti-interference capabilities. Subsequently, a layered architectural design for the digital twin system is proposed, encompassing the perception layer, network layer, and platform layer. Finally, the construction methods for the twin model are elaborated, including initialization modeling, dynamic updating, and verification and calibration. The aim is to achieve virtual-real mapping and dynamic optimization for the newly built Lishui Broadcasting Station through the application of digital twin technology, facilitating its data-driven transformation and enhancing operational efficiency and reliability.

Key words Digital Twin Technology; Medium-Wave Broadcasting Station; System Architecture; Model Construction

随着新一代信息技术与实体经济的深度融合，中波转播台作为国家重要基础设施，其设计与运维模式正面临数字化转型的迫切需求。传统中波转播台设计多依赖经验驱动的静态方案，有着运维效率低、故障响应慢、安全播出压力大、能耗高、人员依赖强等痛点，难以适应复杂电磁环境下的高效运行要求。数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟镜像，实现虚实双向映射、实时数据交互与动态仿真优化，提供了可行路径。近年来，数字孪生在智能制造、智慧城市等领域的成功应用，验证了其在复杂系统全生命周期管理中的价值，因此探索基于数字孪生技术的中波转播台模型设计方法，有助于提升台站的设计精度、运维效率及风险管控能力，升级安全播出保障能力。

1 转播台业务场景对数字孪生技术的需求

中波转播台作为承担公共广播传输的重要基础设施，其业务场景对系统稳定性、抗干扰能力提出严苛要求。当前，中波台运行面临多重挑战，比如，5G通信频段与广播频段重叠导致电磁干扰风险增加，传统监测手段难以实时捕捉干扰源并快速响应；发射机属于高能耗设备，现有静态能耗管控方案无法动态适配复杂环境与绿色台站条件；设备运维依赖定期巡检，难以提前预判故障，影响播出可靠性[1]。而数字孪生技术可针对这些需求提供支撑，如构建台站全要素虚拟模型，实现电磁环境实时仿真与干扰源定位，提升抗干扰决策效率；基于虚实映射实现能耗优化方案动态推演，优化设备运行参数；整合设备运行数据进行预测性维护，降低故障停机概率。此外，丽水转播台作为丽水片区中心台站，承担片区人才培养、技术输出等核心职责，利用数字孪生技术，搭建虚拟演练场景，构建沉浸式培训系统。这些需求推动数字孪生技术在中波台站的落地应用，助力其从经验驱动向数据驱动转型。

2 转播台数字孪生系统的架构设计

通过数字孪生技术，在虚拟空间镜像映射发射机、天馈线系统、信号源链路、供配电系统、冷却系统等核心设备，以及

机房温湿度、电磁场强度、防雷接地状态等全要素，实现运行参数、环境指标（温湿度、电磁场）的实时可视化，消除“数据孤岛”，精准掌握系统状态。基于台站业务的核心需求，本章聚焦数字孪生系统的分层架构设计，依托模块化、可扩展的架构框架，为迁建后台站实现虚实映射、实时仿真与智能管控提供底层支撑，实现全链路实时监测、故障预警与智能诊断，助力其从传统运维模式向数字化智能模式转型[2]。

2.1 系统总体架构的分层设计框架

数字孪生系统采用分层架构设计：感知层部署电压电流、温湿度等多类型传感器采集设备状态，通过边缘计算预处理数据以减少带宽占用；网络层采用差异化传输策略，实时数据用MQTT、大容量数据用HTTP/HTTPS，辅以防火墙和入侵检测保障安全；平台层作为中枢，用Kafka缓冲高并发数据流，通过分层存储（InfluxDB存实时数据、PostgreSQL存元数据等）整合数据处理、模型管理功能，并提供仿真引擎等服务；应用层封装设备健康管理、电磁干扰分析等模块，通过标准化接口实现业务自动化；展示层用WebGL渲染三维场景，支持多终端访问、实时数据动态展示及仿真交互，各层协同实现台站虚实映射与智能管控。

2.2 多源异构数据的集成治理机制设计

中波转播台数字孪生系统涉及实时传感、静态基础、动态业务、空间地理等多类型异构数据，因来源与格式差异大，需统一集成治理机制。数据接入通过边缘计算节点本地清洗聚合传感器数据，经MQTT或OPC UA协议上传至平台层；第三方系统数据采用API接口同步，确保实时性；接入时设校验机制，拒绝或标记格式不符数据。

数据清洗与预处理是质量保障关键：异常值检测用阈值法和统计分析法识别超范围数据；缺失值填充采用线性插值或均值法；格式转换统一为UTC时间戳、标准单位、地理坐标等格式；预处理后数据存临时缓冲区待验证[3]。

数据存储采用分层策略适配需求：时序数据存InfluxDB支持高吞吐写入与时间查询；关系数据存PostgreSQL保障一致性；非结构化数据存储对象存储服务（高扩展、低成本）；孪生模型数据专用库关联几何与物理属性映射。

数据治理含三方面：标准化制定元数据规范（字段名、类型、单位、约束）；质量监控定期审计（完整性、准确性、一致性）并生成报告；安全管理通过加密传输、权限控制、数据脱敏保障安全。

2.3 台站物理实体的孪生模型分层构建

台站物理实体的孪生模型分为物理几何模型、物理属性模型、行为仿真模型和规则引擎模型4个层次，各层次相互关联形成完整的孪生体。

1.物理几何模型。物理几何模型是孪生体的基础，包含发射塔、机房、天线等实体及设备内部结构的三维模型，确保虚拟模型与物理实体的视觉一致性。

2.物理属性模型。物理属性模型为每个实体添加物理参数和状态信息，建立与传感器数据的映射关系。发射机属性包括额定功率、工作频率等；天线属性包括增益、阻抗等。属性模型用JSON格式存储，关联传感器数据点实现实时状态更新。

3.行为仿真模型。行为仿真模型基于物理规律模拟实体运行状态变化，支持虚拟环境动态推演，如模拟发射机功率调整对信号强度的影响、机房空调温度变化对设备性能的影响。

4.规则引擎模型。规则引擎模型定义运维规则，实现业务逻辑的自动化执行，运维规则包括温度告警、维护工单生成等。

2.4 人机交互界面的功能模块规划

人机交互界面采用模块化设计，集成实时监控、仿真分析、运维管理三大核心模块。实时监控模块以三维场景展示台站布局，设备状态通过颜色标识（正常绿、告警黄、故障红），电磁场强以热力图形式叠加，支持GPS轨迹回放与设备参数查询；仿真分析模块可添加虚拟干扰源、预测故障概率，支持PDF/Excel报告导出；运维管理模块整合设备维护计划（日历展示）、工单跟踪（状态管理）及设备履历记录。

3 转播台数字孪生模型的构建方法

完成数字孪生系统的分层架构设计后，针对丽水转播台迁建过程中对虚拟模型精准度、动态适配性的高要求，下面将聚焦孪生模型的具体构建方法，结合初始化建模、动态更新、验证校准及跨域集成等环节，确保虚拟模型与新建台站的物理实体实现高度协同，为迁建后台站的智能化运行提供核心支撑[4]。

3.1 基于物理实体参数的模型初始化建模

1.参数采集。参数采集需覆盖几何、物理、性能三类核心数据。几何参数利用激光扫描台站建筑与设备获取点云数据，精度控制在 ± 0.5 mm以内；物理参数从设备铭牌、CAD设计图纸中提取，包括发射机额定功率、天线阻抗等；性能参数利用传感器标定实验获得，如信号发射效率、温度耐受阈值。

2.建立参数映射规则库。将物理参数与虚拟模型属性一一对应，例如将发射机的输入电压范围映射为虚拟模型的电压阈值约束。

3.执行初始化流程。导入点云数据生成三维几何模型，绑定物理参数至模型属性字段，通过仿真引擎验证初始模型的几何一致性与参数合理性，确保虚拟模型与物理实体的静态特征偏差小于1%。

3.2 实时数据驱动的模型动态更新优化

边缘节点通过MQTT协议采集传感器实时数据，预处理后仅上传异常数据或关键指标（如温度超过阈值的发射机数据）；云端接收数据后，触发模型更新机制。更新触发分为三类，定时更新（每5 min同步设备运行状态）、阈值触发（当信号强度波动超过5 dB时更新天线模型）、事件驱动（设备维修后更新参数）[5]。

参数优化采用卡尔曼滤波算法，实时修正模型预测值与实际数据的偏差，例如根据天线实时电流数据调整虚拟模型的阻抗参数，使模型输出的信号强度与实际测量值误差控制在±2 dB以内。每月对模型更新效果进行评估，保留优化效果最佳的参数版本。

3.3 多维度仿真场景下的模型验证校准

设计三类仿真场景开展验证，其中正常运行场景模拟台站日常工作状态，验证模型输出的设备温度、信号覆盖范围与实际数据的一致性；干扰场景添加虚拟5G干扰源，验证模型对干扰信号的识别准确率与响应速度；故障场景模拟发射机功率模块故障，验证模型的故障预测时间与实际故障发生时间的偏差。验证指标包括模型准确率（≥95%）、响应延迟（≤100 ms）、预测偏差（≤3%）。校准方法采用虚实对标法，即将模型输出与物理实体数据对比，通过最小二乘法修正模型参数，例如调整天线模型的增益系数，使仿真覆盖范围与实际场强测试结果的重合度提升至90%以上。

3.4 数字孪生驱动的能耗优化

1.建立能耗基线模型。基于台站近3年历史运行数据（发射机工作时长、功率曲线、冷却能耗、链路损耗等）与核心设备技术参数（能效等级、天线匹配度），利用大数据分析工具进行趋势拟合与异常剔除，结合行业能耗评定标准，精准确定各模块能耗基准阈值，为后续优化提供量化依据。

2.动态功率调整。实时接入电网峰谷平时段数据与孪生模型监测的场强分布，利用仿真引擎构建功率优化模型，模拟不同功率下的覆盖效果与能耗关系，在保障覆盖质量达标率≥98%前提下，实现发射机功率动态调节。

3.设备负荷均衡。通过数字孪生模型实时模拟多台设备组合运行状态，综合考虑能效等级（优先二级以上）、老化程度与负载率，采用智能算法将高优先级信号分配给主力设备，低优先级信号由备用设备承担，避免单台设备长期满负荷运行导致能效下降。

4.能效分析模块。每周生成能耗周报、每月生成能耗月报，涵盖各设备能耗占比、与基线偏差率、高耗能时段分析，通过可视化图表直观呈现能耗趋势，并针对高耗能环节提出可落地的优化建议。

3.5 沉浸式培训系统的构建与应用

沉浸式培训系统基于数字孪生模型构建虚拟台站场景，实现实操训练与应急演练的沉浸式体验。系统构建包括三维场景还原、交互功能开发、场景库建设。培训实施采用虚实结合模式，学员佩戴VR设备进入虚拟场景，完成设备操作训练、故障排查演练、应急预案执行等任务，系统实时反馈操作结果与评分。效果评估通过对比培训前后的实操能力提升情况，优化培训内容与场景设计，提升培训效率与质量。

4 结束语

数字孪生技术为发射台站的设计与运维注入了新的活力，其分层架构与动态模型构建方法，有效破解了传统台站在复杂场景下的运行难题。通过虚实映射与实时仿真，台站实现了从被动响应到主动预判的转变，运维效率与系统可靠性得到显著提升。未来，随着技术的持续演进，数字孪生将进一步深化跨域协同能力，推动发射台站与应急指挥、能源调度等系统的深度融合，构建更加智能、高效的广播传输生态。这一技术的应用不仅为发射台站的数字化转型提供了可行路径，也为其他基础设施的智能化升级提供了有益借鉴。

参考文献

[1]黄靖,刘中华.广播电视发射台站安全播出运维监管平台方案设计[J].广播电视网络,2023,30(12):93-95.

[2]杨雷,陈利鹏,高瑞华.广播电视发射台站智慧化“数字孪生”平台建设实例[J].广播与电视技术,2022,49(12):21-25.

[3]金晶.智慧台站数字孪生实景融合系统设计及应用[J].电视技术,2025,49(4):4-7.

[4]詹泊诚,姜畔,孟宪国.广播电视发射台站智慧安播保障系统的研究与设计——以承德广播电视发射台为例[J].西部广播电视,2025,46(4):168-171.

[5]李炜煦.基于超融合架构的广电发射台站智慧运维平台设计[J].广播与电视技术,2025,52(9):88-93.

（本文编辑 杜宇琪）