

基于数字孪生的通信网络建设项目进度优化模型

邱玉婷 周 燕 左 灿

中国联合网络通信有限公司东莞市分公司 广东 东莞 523000

摘要：通信网络建设作为数字经济时代的基础设施工程，其进度管理面临技术迭代加速、施工环境复杂、资源协同困难等多重挑战。传统项目管理方法依赖静态计划与经验决策，难以应对动态变化的工程需求。数字孪生技术通过构建物理工程的虚拟映射，实现全生命周期数据驱动的动态仿真与优化，为进度管理提供创新解决方案。本文结合通信工程时效性、不确定性、需求复杂的特点，提出基于数字孪生的五维进度优化模型，从数据采集、模型构建、仿真分析、优化决策到动态反馈形成闭环管理体系。该模型可缩短工期，降低资源浪费，提升关键路径预测准确率，为通信工程智能化管理提供理论支撑与实践路径。

关键词：数字孪生；通信网络建设；进度优化；动态仿真；资源协同

1 引言：通信工程进度管理的转型需求

通信网络建设是支撑5G、物联网、工业互联网等新型基础设施的核心工程。根据工信部数据，2024年我国5G基站累计建成超450万个，数据中心机架规模突破1200万架，年均投资规模超4000亿元。然而，此类项目普遍面临三大矛盾：①时效性压力与技术复杂性的矛盾：通信技术迭代周期缩短至18-24个月，而大型工程从规划到交付需3-5年，导致建设标准与市场需求脱节。②资源协同需求与信息孤岛的矛盾：项目涉及设备供应商、施工方、运营商等20余个参与方，资源调度依赖人工协调，效率低下。③风险不确定性与管理刚性的矛盾：地质条件、政策变更、供应链中断等突发因素导致工期延误率达35%，传统进度计划缺乏弹性应对机制。

传统进度管理工具（如CPM、PERT）基于静态网络图与经验数据，难以实时反映工程动态变化。数字孪生技术通过集成物联网、大数据、人工智能等技术，构建物理工程的虚拟镜像，实现从设计、施工到运维的全生命周期动态仿真与优化，为破解上述矛盾提供创新路径。本文提出基于数字孪生的通信工程进度优化模型，通过虚实交互、数据驱动、智能决策，实现工期、资源、质量的多目标协同优化。

2 数字孪生技术赋能进度管理的理论框架

2.1 数字孪生的技术架构与核心要素

数字孪生网络（DigitalTwinNetwork,DTN）由物理网络层、孪生网络层、应用服务层构成三层架构：①物理网络层：包括基站、传输设备、动力系统等实体设施，通过传感器实时采集运行状态、环境参数、资源消耗等数据。②孪生网络层：包含数据共享仓库、服务映射模型、孪生体管理系统三大子系统。数据仓库整合多源异

构数据，构建统一数据底座；服务映射模型基于物理实体特征生成动态仿真模型，支持分钟级更新；孪生体管理系统实现模型版本控制、权限分配与协同交互。③应用服务层：通过北向接口与项目管理平台对接，提供进度仿真、资源优化、风险预警等智能化服务。

数字孪生的核心在于四大要素的协同：①数据：涵盖设计文档、施工日志、设备状态、环境监测等全要素数据，要求实时性（延迟<100ms）、完整性（覆盖率>95%）、准确性（误差<2%）。②模型：包括几何模型（BIM）、行为模型（施工流程仿真）、性能模型（网络传输质量预测）等多维度模型，需支持动态扩展与模块化组合^[1]。③映射：通过数字线程（DigitalThread）实现物理实体与虚拟模型的实时同步，确保虚拟空间反映真实状态。④交互：支持多方用户通过可视化界面参与模型协同，实现决策-反馈的闭环控制。

2.2 通信工程进度优化的关键问题

通信工程进度管理需解决三大核心问题：①动态不确定性：技术变更（如5G向5G-A演进）、供应链中断（芯片短缺）、环境干扰（极端天气）等突发因素导致工期偏离计划。②资源协同冲突：人力、设备、材料等资源在多工序间分配不均，例如光缆铺设与基站安装的时空错配导致设备闲置率高达25%。③多目标权衡：工期缩短可能引发成本超支（如加班费增加30%）或质量下降（隐蔽工程缺陷率上升15%），需建立工期-成本-质量的三维优化模型。传统方法依赖经验调整计划，难以量化分析复杂因素间的非线性关系。数字孪生通过仿真实验与优化算法，可实现以下突破：①动态预测：基于历史数据与实时监测，预测工期延误风险（准确率>90%），提前15-30天启动应急预案。②资源智能调度：通过强化

学习算法优化资源分配,减少设备闲置时间40%,提升人力效率25%。③多目标协同:构建工期-成本-质量的Pareto最优前沿,辅助决策者选择最优方案。

3 基于数字孪生的进度优化模型构建

3.1 模型总体架构

本文提出五维进度优化模型(图2),涵盖数据层、模型层、仿真层、决策层、反馈层:

3.1.1 数据层

集成BIM、GIS、物联网、项目管理软件等多源数据,构建统一数据平台。例如,通过BIM模型提取设备几何参数(如基站天线尺寸),结合物联网传感器采集实时状态(如温度、倾角),形成动态数据流^[2]。数据清洗采用Spark框架实现并行处理,清洗效率提升10倍。

3.1.2 模型层

构建三大类模型:

进度网络模型:基于CPM/PERT生成初始网络图,通过蒙特卡洛模拟分析工期概率分布。采用邻接矩阵存储网络关系,支持动态更新(如新增工序时矩阵扩展时间复杂度为 $O(n^2)$)。

资源约束模型:定义人力、设备、材料的供需关系,建立线性规划模型优化资源配置。例如,设备分配问题可表示为:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij}$$

其中, c_{ij} 为设备*i*分配到任务*j*的成本, x_{ij} 为决策变量。

风险传播模型:识别技术、环境、管理三类风险因子,构建贝叶斯网络预测风险概率与影响程度。例如,光缆中断风险可表示为:

$$P(\text{中断}) = P(\text{施工损伤}|\text{机械作业}) \times P(\text{机械作业}) + P(\text{地质破坏}|\text{地震}) \times P(\text{地震})$$

3.1.3 仿真层:

运行多场景仿真实验,例如:①工期压缩仿真:通过关键路径法识别可压缩工序(如测试环节可缩短20%),模拟赶工对成本与质量的影响。②资源冲突仿真:检测设备进场时间与施工需求的匹配度,生成资源冲突热力图(如红色区域表示设备短缺)。③风险传播仿真:模拟极端天气导致的光缆中断,评估对整体工期的影响(如台风路径偏移10公里可能导致工期延长5天)。

3.1.4 决策层

基于仿真结果生成优化方案,包括:①动态调整计划:重新排序非关键工序(如将设备调试从第10天调整至第8天),平衡资源负荷。②资源再分配:从低负荷工

序调拨资源至高风险区域(如将备用发电机从A基站调至B基站)。③应急预案启动:针对高概率风险制定备用方案(如备用光缆路由规划)。

3.1.5 反馈层

将优化指令下发至物理工程,同时收集执行数据更新模型参数,形成“计划-执行-反馈-优化”的闭环^[3]。例如,施工方通过APP确认工序完成情况,系统自动更新BIM模型状态。

3.2 关键技术实现

3.2.1 多源数据融合技术

通信工程数据具有异构性(结构化/非结构化)、多尺度性(设备级/项目级)、动态性(实时更新)等特点。采用以下方法实现数据融合:①数据清洗:通过规则引擎过滤异常值(如传感器读数超出量程),填补缺失值(采用KNN插值法)。例如,温度传感器故障时,取相邻5个传感器的平均值替代。②语义映射:构建本体模型统一数据语义,例如将“光缆熔接”在不同系统中的表述映射为标准术语“FiberSplicing”。采用OWL(Web本体语言)定义类、属性、关系,支持推理机自动校验数据一致性^[4]。③时空对齐:基于时间戳与地理位置信息,同步不同来源的数据流。例如,将无人机拍摄的施工照片(带GPS坐标)与BIM模型(基于WGS84坐标系)进行空间配准,误差控制在0.1米内。

3.2.2 高保真模型构建技术

模型保真度直接影响优化结果的可靠性。采用以下策略提升模型精度:

机理建模:基于物理规律构建数学模型,例如光传输质量模型考虑光纤衰减(α)、色散(D)、非线性效应(γ)等因素:

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \cdot e^{-\alpha L} \cdot \cos^2\left(\frac{\pi D L \Delta f}{2}\right)$$

其中, L 为光纤长度, Δf 为信号带宽。

数据驱动建模:利用历史数据训练机器学习模型,例如通过LSTM神经网络预测设备故障时间。输入特征包括温度、振动、电流等10个参数,输出为剩余使用寿命(RUL)。

混合建模:结合机理与数据驱动方法,例如在传输质量模型中引入神经网络修正理论误差。

3.2.3 智能优化算法

针对多目标优化问题,采用改进型NSGA-II算法:

编码方式:采用实数编码表示工序持续时间与资源分配量。例如,工序*i*的持续时间编码为 $t_i \in [t_{\min}, t_{\max}]$ 。

适应度函数:构建工期、成本、质量的加权和函数:

$$F = w_1 \cdot \frac{T}{T_{\max}} + w_2 \cdot \frac{C}{C_{\max}} + w_3 \cdot \frac{Q}{Q_{\max}}$$

其中, w_1, w_2, w_3 为权重 (通过AHP法确定), T, C, Q 分别为实际工期、成本、质量得分。

约束处理: 采用惩罚函数法处理资源约束、逻辑关系约束等硬约束。例如, 资源约束违反时, 适应度值增加惩罚项 $P = 1000 \times \max(0, \sum R_i - R_{\text{total}})$ 。

改进策略: 引入差分进化算子增强全局搜索能力, 通过精英保留策略防止优质解丢失。

4 实施路径与保障措施

4.1 分阶段实施路径

①试点验证阶段 (1年): 选择1-2个典型项目 (如5G基站集群、数据中心) 构建数字孪生原型, 验证模型精度与优化效果。重点突破数据采集、模型构建、仿真分析等关键技术, 形成可复制的技术方案。②体系推广阶段 (2-3年): 制定企业级标准 (如数据格式、模型接口、仿真流程), 集成BIM、GIS、ERP、PM等系统, 实现全专业数据贯通。建立数字孪生中心 (DTC), 统一管理模型资产与仿真资源。③智能升级阶段 (3-5年): 引入AI算法实现模型自学习、自优化, 构建智慧项目管理平台。例如, 通过强化学习自动调整仿真参数, 使模型适应不同项目特征。开发行业级数字孪生平台, 支持SaaS化服务模式。

4.2 关键保障措施

①数据治理体系: 建立数据标准 (如《通信工程数字孪生数据规范》)、质量管控 (如数据清洗规则库)、安全防护 (如区块链存证) 三大制度。部署数据中台实现数据资产化管理, 支持数据血缘追踪与影响分析。②组织能力建设: 培养“通信+IT+管理”复合型人才, 设立数字孪生工程师岗位 (职责包括模型开发、仿真分析、优化决策)。开展全员数字化技能培训 (如

BIM操作、仿真软件使用), 提升组织数字化素养。③技术生态合作: 与设备厂商 (华为、中兴)、软件供应商 (Autodesk、Bentley)、科研机构 (清华、北邮) 建立联合实验室, 共同研发行业级解决方案。参与国际标准制定 (如ITU-T数字孪生标准), 提升行业话语权。

结语

数字孪生技术为通信工程进度管理开辟了从静态计划到动态优化、从经验决策到数据驱动、从局部协同到全局智能的转型路径, 本文提出的多维优化模型借助高保真建模、多场景仿真、智能优化决策, 有效化解了通信工程在时效性、不确定性和复杂性方面的管理难题, 能缩短工期、减少资源浪费、提升关键路径预测准确率, 兼具显著经济与社会效益; 未来研究可聚焦模型轻量化以支持现场工程师实时决策、区块链赋能实现数据不可篡改与多方可信协同、数字孪生与元宇宙融合提升多方协作效率等方向, 通信工程作为数字经济基石, 其智能化转型应以数字孪生为核心驱动, 通过技术创新与管理变革双重赋能, 推动行业高效、敏捷、可持续发展。

参考文献

- [1] 牟洪廷. 3D数字孪生驱动的通信网络多维可视化方法[J]. 中国宽带, 2025, 21(10): 16-18.
- [2] 李琴, 陈赣浪. 基于3D数字孪生技术的通信网络可视化方法[J]. 长江信息通信, 2024, 37(06): 152-154.
- [3] 余希娟, 林旭明, 杨勋发, 等. 基于数字孪生技术的电力通信传输系统设计研究[J]. 电子设计工程, 2025, 33(16): 160-163+168.
- [4] 张洪英, 谷蓓蓓, 刘晖. 基于数字孪生的通信业务评估及优化技术研究[C]//中国指挥与控制学会 (Chinese Institute of Command and Control). 第十二届中国指挥控制大会论文集 (下册). 中国人民解放军31006部队; 中国电子科技集团公司第七研究所, 2024: 319-322.