

地下光缆精准监测数字孪生应急预警系统 平台设计

刘思娴, 常佳丽, 承真

(南京熊猫电子股份有限公司)

【摘要】利用智能传感、数字孪生、人工智能等先进技术打破光缆运维中“看不见、测不准、管不好”的瓶颈,采用智能监管+状态预测+智能预警的运行模式,实现地下光缆从建设到拆除整个生命周期的数据全面在线采集和管控,实现数字孪生等技术在城市基础设施管理的创新应用。

【关键词】光缆状态监测;数字孪生;智能预警

中图分类号:TN913.33;TP399

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.129

Platform Design of Digital Twin Emergency Early Warning System for Accurate Monitoring of Underground Optical Cables

LIU Si-xian, CHANG Jia-li, CHENG Zhen

(Nanjing Panda Electronics Co., Ltd.)

【Abstract】Advanced technologies such as intelligent sensing, digital twin, and artificial intelligence are utilized to break through the bottlenecks of "invisibility, inaccurate measurement, and poor management" in optical cable operation and maintenance. The operational model of intelligent supervision + status prediction + intelligent warning is adopted to achieve comprehensive online data collection and control throughout the entire lifecycle of underground optical cables from construction to removal. This enables innovative applications of digital twin and other technologies in urban infrastructure management.

【Keywords】optical cable status monitoring; digital twin; intelligent warning

1 引言

随着对光缆通信质量的要求持续提升,光缆基础设施建设规模不断扩大,由此形成的光网线路等资源体系日趋复杂,这给光缆状态监测及维护管理带来巨大挑战。传统人工管理模式逐渐暴露出管理效率低下、监测结果精准度不足等问题,严重制约光网传输事业的高质量发展。

为保障光缆资源安全、平稳、高效运行,亟需构建一套契合光缆通信发展需求的光缆线路信息采集与管理系统,实现光缆线路资源实时化、精准化、无损化、智能化、可视化、预测化的维护管理^[1]。将数字孪生技术与数据可视化、大数据分析处理、人工智能等技术融合,应用于光缆故障定位及光缆全线路全生命周期管理,是将光缆安装后检测难度大的特性与数字孪生技术应用优势有机结合的创新性实践,具有重要的研究价值与应用前景。

2 系统框架

系统通过物理世界地下光缆线路数据的精准采集,得到亚米级精度的光缆故障点位置,对光缆线路

进行数字化映射、可视化表达和多源数据分析处理,并结合北斗差分定位技术,构建完整的地下光缆智能数字孪生系统。依托多源数据搭建地下光缆评估分析决策和应急处理平台,实现光缆线路的精准性维护与预测性维护。通过技术创新引领、数字化治理赋能,实现“光路状态实时可视、资源变化动态感知、故障快速精准定责定位”的数智化(架构见图1)。

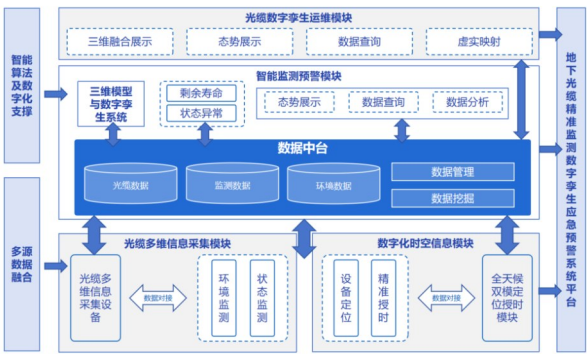


图1 系统架构图

3 平台功能描述

3.1 数字化时空信息模块

基于“差分北斗+GIS+模型测绘”融合定位技术

构建核心支撑系统,为智能数字孪生系统提供高精度时空基准、多维数据融合分析及可视化决策支持。整合定位数据、地理信息、光缆状态等多源信息,实现从“静态坐标”到“动态孪生”的全生命周期管理。

1)多源数据融合

通过集成卫星遥感、无人机航拍、物联网传感器、GIS等多源数据,构建光缆网络全域数字孪生模型^[2]。通过移动终端实时采集现场光缆节点的经纬度、埋深等数据,并同步至云平台进行标准化处理,解决了传统手工记录效率低、易出错的问题。

2)高精度定位与时间同步

融合卫星导航、传感器网络和先进算法,实现对空间位置和时间基准的精准掌控,实现厘米级甚至毫米级的精度以确定目标的地理坐标,适用于复杂环境下的精准导航与位置服务,通过高稳定性时钟源和同步协议,确保平台内所有设备与系统在统一时间基准下运行,时间误差可控制在毫秒级别。

3)运维管理与智能分析

当光缆发生断纤或信号衰减时,平台通过时空大数据分析快速定位故障点生成修复方案。结合光缆运行状态数据和外部环境信息,平台可预测光缆老化趋势并提前规划维护周期,降低突发故障风险。

3.2 智能监测预警模块

以采集的多源数据为基础,对现有地下光缆做精准高效的健康管理和预测性维护。在孪生系统中,构建光缆线路模型,分析采集存储的基础数据、损耗数据、时间数据、环境数据、振动数据、历史数据等信息。经相应的线路状态预警算法运算处理,实现光缆线路状态可视化表达及预测性评估预警。

1)基础信息运维管理

实时记录并更新光缆的铺设路径、光缆类型、传输性能等基础信息,确保数据的准确性和时效性。

2)智能分析

通过集成大数据分析 with 人工智能技术,实现对光缆运行状态的实时监测与深度评估。系统利用多维信息采集设备获取光缆的损耗、温度、应力等关键参数,结合历史数据与算法模型,智能识别光缆的健康状况与剩余寿命。

3)风险预警

通过机器学习,系统能够预测潜在故障并提前发出预警,帮助运维人员采取预防性维护措施。同时,系统支持对光缆性能的长期趋势分析,生成可视

化报告,为网络优化和资源规划提供科学依据。该功能不仅提升了光缆运维的智能化水平,还显著降低了故障发生率,保障了通信网络的高效稳定运行。

3.3 光缆数字孪生运维模块

平台依托GIS地图及BIM模型,通过对物理世界的光缆线路系统进行数字化映射、可视化表达^[3-4],生成一套由数据和模型构建的数字孪生体,实现更高效地运营管理,满足管理、展示、规划等多方面需求。其对物理场景进行1:1还原,实现从宏观城市市场到光缆线路精细局部的微观细节模型展现;实现物理数据融合其他多维数据的可视化表达;实现光缆状态的实时监控;实现故障点、受灾区域的判断,同时为未来光缆线路建设规划提供数字化参考。

系统平台根据采集的检测数据参数,绘制地下光缆三维模型,并参考历史数据和理论数据判定光缆工作状态。显示系统将绘制的光缆线路进行可视化展示,结合GIS系统中的环境信息,可模拟仿真光缆的工作状态。当实时数据与经验值、参考值对比超出可控范围,管理平台会根据不同参数的波动提示相应故障点以及参考解决方案,为后期决策提供理论和数据基础;若实时数据在可控范围内,管理平台也可向管理员给出工作状态建议和运维参考,通过全生命周期管理为后期运维工作提供技术保障。

1)光缆数字孪生体映射

以光缆线路GIS数据、IoT数据、BIM数据等多源异构数据为数据源,为光缆线路赋予数字身份信息,实现光缆实体在数字世界的精准映射,确保物理实体的状态变化实时反映在数字对象中,达到物理实体的要素数字化和虚拟化、状态实时化和可视化。

2)光缆态势可视化

通过直观的图形化界面,将复杂的光缆网络状态以多维度方式呈现;通过颜色、图标和动画等形式直观标识异常状态或故障点,支持历史数据对比与趋势分析,辅助运维决策。

3)剩余寿命管理

通过综合监测光缆的运行状态与环境因素,结合大数据分析 with 预测模型,精准评估光缆的使用寿命与健康状态。系统实时采集光缆的损耗、温度、应力、老化程度等关键数据,结合历史运维记录与外部环境,利用机器学习算法预测光缆的剩余寿命。

4)异常状态报警

通过实时监测光缆的关键性指标,结合智能分

析算法,快速识别并预警光缆网络的异常状态。一旦检测到异常,系统会立即触发多级报警机制,通过语音、弹窗等方式通知运维人员,并提供详细的故障位置与原因分析。

4 关键技术

4.1 基于网格化管理的地下光缆状态预测方法及仿真技术

综合考虑不同环境下施工产生的应力及形变影响,通过网格化划分将复杂场景区域划分为小立方体,对每个立方体进行详细模拟和分析,结合LSTM网络的时间序列预测与kNN算法结合,计算出每个网格立方体对应的预测状态,最终以立方体映射方式实现完整光缆的状态预测^[5-6],实现光缆状态的准确分析及精准定位,原理框图如图2。

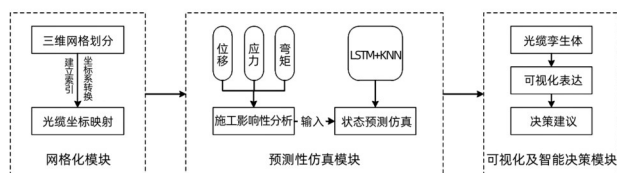


图2 原理框图

4.2 基于数字孪生的地下空间管网三维建模偏差分析技术

通过采集目标地下空间管网的三维扫描数据和采集设备的位姿数据,构建局部地图与初始位姿图,并获取点云数据,利用投影法将点云数据从三维平面投射至二维平面,针对三维点云在二维平面上的投影进行图像比对的差异化分析,根据分析结果,为地下管网的实景三维重建提供分析决策^[7](见图3)。

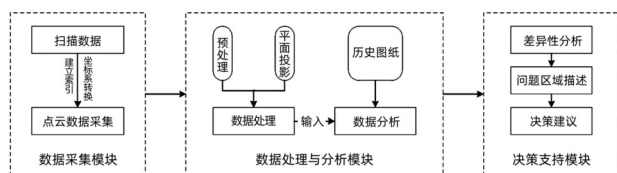


图3 原理框图

4.3 基于时序预测的光缆状态预测性评估及预警技术

面向光缆设施的预测性维护与健康管理工作,根据光缆衰耗数据、运行时间数据、环境温湿度/振动数据及历史数据等多种数据源数据,经数据资源库积

累后,通过基于人工智能机器学习的数据分析,结合数据资源库的叠加复用,形成一套设备设施健康状态预警算法,提供精准、高效的健康管理及预测性维护服务,缩短应急响应时间,助力分析决策^[8]。

5 结语

数字智能时代,数字孪生、数据可视化、人工智能等技术与DICT领域深度融合,成为众多行业数字化转型的核心创新技术。

通过光缆设施的数字化映射,能实时监测光缆线路状态、预测故障,精准定位受灾点并预判范围,在应急救援中价值显著。光缆网络虚拟镜像可实时监测分析物理网络并智能优化,提前预警故障并生成维修方案,降低通信中断时长与运维成本。自动化监测与智能化管理可降低人工巡检维护成本,优化资源配置,提升光纤线路运营效益。

研究成果可指导构建高效运营模式,推动光缆运维从被动监控向主动预测转型,为城市决策与地下基础设施运维提供支撑。

参考文献

- [1] 任军江, 朱源, 陈钱龙, 周姬旻. 温度对光纤强度特性影响的初步研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2014 (1): 13-16.
- [2] 陈龙. 探地雷达在城市地下管道和病害探测中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022 (8): 136-138.
- [3] 董飞飞, 许懿娜, 孙越乔. 多源影像实景三维融合建模及关键问题研究[J]. 现代测绘, 2022, 45 (5): 9-13.
- [4] 管斌. 大面积的倾斜摄影实景三维建模技术探讨[J]. 江西测绘, 2021 (3): 20-22.
- [5] 王宇阳, 牛志伟, 卢建华, 齐慧君, 晁阳. 基于web技术的有限元模型和成果可视化方法研究[J/OL]. 水力发电. <https://link.cnki.net/urlid/11.1845.TV.20240229.1552.004>.
- [6] 韩仲慧, 王梅. 浅埋矩形顶管施工对临近管线与地表的影响研究[J]. 都市快轨交通, 2024, 37 (1): 135-142.
- [7] 陈方吾. 边坡三维地质体快速建模及可视化系统研发[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [8] 马远浩, 曾卫明, 石玉虎, 等. 基于加权词向量和LSTM-CNN的微博文本分类研究[J]. 现代计算机: 下半月版, 2018 (17): 18-22.