

## 数字孪生技术在输电线路中的应用

刘孟禹 王前进 朱柄同 周 杨 朱圆爱

云南电网有限责任公司玉溪供电局, 云南 玉溪 653100

**[摘要]**数字孪生技术是一种基于物理系统的虚拟模型, 通过将现实世界的物理对象与数字模型相连接, 实现实时监测、分析和优化运营过程。在输电线路领域, 数字孪生技术的应用可以提供实时监控和预测能力, 改善线路的可靠性和运行效率。通过数字孪生技术, 输电线路可以实时采集、传输和分析大量的传感器数据, 进而实现对线路的全面监测。这些数据可以用于检测线路设备的状态、预测潜在故障, 并提供准确的故障定位和诊断信息。数字孪生技术还可以模拟线路在不同条件下的工作状态, 通过虚拟实验和仿真, 评估不同方案的性能和风险。这有助于优化线路的设计和规划过程, 减少投资风险和资源浪费。总之, 数字孪生技术在输电线路中的应用可以实现对线路的实时监控、预测分析和优化决策, 提升线路的可靠性、运行效率和经济性。所以本研究也具有重要的意义。

**[关键词]**数字孪生技术; 输电线路; 技术应用

DOI: 10.33142/hst.v6i8.10150

中图分类号: TM726

文献标识码: A

### Application of Digital Twin Technology in Transmission Lines

LIU Mengyu, WANG Qianjin, ZHU Bingtong, ZHOU Yang, ZHU Yuanai

Yuxi Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yuxi, Yunnan, 653100, China

**Abstract:** Digital twin technology is a virtual model based on physical systems, which connects physical objects in the real world with digital models to achieve real-time monitoring, analysis, and optimization of operational processes. In the field of transmission lines, the application of digital twin technology can provide real-time monitoring and prediction capabilities, improve the reliability and operational efficiency of lines. Through digital twin technology, transmission lines can collect, transmit, and analyze a large amount of sensor data in real-time, thereby achieving comprehensive monitoring of the line. These data can be used to detect the status of line equipment, predict potential faults, and provide accurate fault location and diagnostic information. Digital twin technology can also simulate the working status of circuits under different conditions, and evaluate the performance and risks of different schemes through virtual experiments and simulations. This helps to optimize the design and planning process of the line, reduce investment risks and resource waste. In summary, the application of digital twin technology in transmission lines can achieve real-time monitoring, predictive analysis, and optimized decision-making of the lines, improving their reliability, operational efficiency and economy, so this study also has important significance.

**Keywords:** digital twin technology; transmission lines; technology application

### 引言

在电力行业中, 输电线路的安全性和稳定性一直是重要的关注点。随着科技的发展, 数字孪生技术逐渐成为解决这一问题的新方法。数字孪生技术不仅可以将现实世界的物理对象与数字模型相连接, 还可以实现对输电线路的实时监控、分析和优化。通过将线路的物理运行和数字模型相结合, 数字孪生技术可以提供准确的故障预测和诊断信息, 帮助运营人员及时采取措施, 确保线路的稳定运行。此外, 数字孪生技术还可以利用机器学习算法对大量数据进行分析, 优化线路的运行策略和维护计划, 提高线路的可靠性和经济性。通过虚拟实验和仿真, 数字孪生技术还可以评估不同方案的性能和风险, 为线路的设计和规划提供有力支持。综上所述, 数字孪生技术在输电线路中的应用具有重要的意义, 有望为电力行业带来革命性的变革。

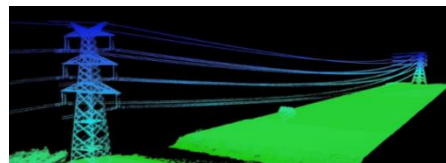


图1 110kV 线路直线塔三维点云按高程显示

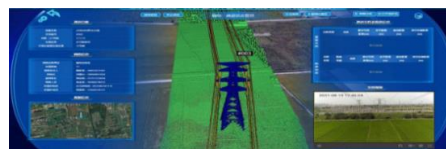


图2 耐张塔点云按高程显示



图3 耐张塔点云真彩色显示

## 1 数字孪生技术研究现状

数字孪生技术是近年来兴起的一项前沿技术,尤其在工业领域得到广泛关注和应用。研究人员对数字孪生技术的基本原理和方法进行深入探索和研究,包括数学模型、建模方法、仿真技术等。此外,还在探索如何将数字孪生技术应用于实际问题,并提出相应的算法和策略。数字孪生技术已经在多个领域得到应用,包括制造业、能源行业、交通运输、医疗健康等。尤其在工业领域,数字孪生技术已经应用于生产过程优化、设备维护、故障诊断等方面,取得了显著的效果。数字孪生技术在实际应用中面临一些挑战,包括数据采集和处理、建模精度、算法优化等方面。针对这些挑战,研究人员不断进行技术改进和创新,以提高数字孪生技术的性能和可靠性<sup>[1]</sup>。

## 2 面向输电线路的数字孪生架构

### 2.1 感知层

数字孪生技术在输电线路领域的应用可以通过多层架构来实现,其中感知层是其中的一层。感知层是数字孪生架构的底层,主要负责数据采集和传感器监测。在输电线路的数字孪生中,感知层的主要任务是实时收集输电线路的运行数据和状态信息。这可以通过安装传感器和监测设备来实现,例如杆塔倾斜传感器、接地电阻传感器、避雷器跳闸次数、温度传感器、湿度传感器、电流传感器等。这些传感器可以实时监测输电线路的杆塔倾斜值、接地电阻、避雷器跳闸次数、温度、湿度、电流等关键参数,并将采集到的数据传输到数字孪生系统中。感知层还可以包括监控系统和通信设备,用于监测输电线路的实时状态和故障信息,并将其传输到数字孪生系统中。这些监控系统可以包括视频监控、振动监测、红外监测等技术,用于实时监测输电线路的状态,并及时发现异常情况。感知层的数据采集和传输需要高效可靠的通信设备来支持。这可以包括无线通信、物联网技术、卫星通信等,确保数据能够及时传输到数字孪生系统中进行分析和处理<sup>[2]</sup>。

### 2.2 边缘计算层

在面向输电线路的数字孪生架构中,边缘计算层是架构的中间层,位于感知层和云计算层之间。边缘计算层主要负责数据的处理、分析和决策,以提供实时的响应和决策能力。边缘计算层的主要任务是在接近数据产生源头的位置进行数据的处理和分析,以减少数据的传输延迟和网络带宽的压力。在输电线路的数字孪生中,边缘计算层可以通过部署在输电线路附近的边缘计算设备来实现。边缘计算设备可以与感知层的传感器和监测设备进行数据交互,接收实时的数据流,并进行实时的数据处理和分析。这些数据处理和分析可以包括数据过滤、数据聚合、数据压缩、异常检测等功能。边缘计算设备还可以运行本地的数字模型和算法,以对实时数据进行预测、优化和决策,从而提供实时的线路状态评估和故障诊断<sup>[3]</sup>。

### 2.3 物联层

在面向输电线路的数字孪生架构中,物联层是架构的底层,负责连接和管理输电线路上的物联网设备和传感器,物联层的主要任务是收集、传输和管理与输电线路相关的实时数据。物联层通过与传感器和设备进行通信,获取输电线路的各种参数和状态信息。这些传感器可以包括杆塔倾斜传感器、接地电阻传感器、避雷器跳闸次数、温度传感器、湿度传感器、电流传感器、电压传感器等,用于监测线路的实时运行情况。物联层还可以与其他设备进行通信,如断路器、开关等,以实现线路的控制和操作。物联层负责将收集到的实时数据传输到边缘计算层和云计算层进行处理和分析。它使用各种通信技术,如无线传感器网络、物联网协议等,确保数据的可靠传输和实时性。同时,物联网还可以进行数据的预处理,如数据滤波、数据压缩等,以减少数据传输的压力和带宽消耗<sup>[4]</sup>。

### 2.4 数字孪生层

数字孪生层是面向输电线路的数字孪生架构中的核心层,它是数字孪生系统的核心组成部分。数字孪生层通过创建和维护一个与实际输电线路相对应的虚拟模型,实现对线路的实时监测、仿真、分析和优化。数字孪生层通过数学建模和仿真技术,将实际输电线路的物理特性、运行参数和状态信息转化为数字模型,并实时更新该模型的状态。这个模型包含了线路的拓扑结构、电气特性、电磁参数、负载情况等信息。在数字孪生平台中,添加线路的三维点云模型和无人机巡检的内容。通过三维点云模型,我们可以更加直观地展示线路的具体情况,例如线路的高低起伏、周围环境情况等,从而更加准确地进行仿真和分析。此平台的搭建,可以在三维画面内通过镜像的方式,同时看到两期不同的点云数据(如下图4所示)。通过肉眼观察距线路较近的超高危险树木,在镜像画面中的变化情况,从而能判断出线路下方树障是否得到清理。在对多期点云数据同一点位的树障查找上,比传统数据查找,更加快速直观(如下图5所示)。同时,测量功能可实现导线相间距、弧垂测量以及任意长度、面积测量(如下图6所示)。



图4 线路三维数字化模型

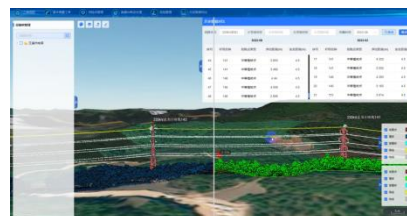


图5 不同年份的两期数据镜像分析



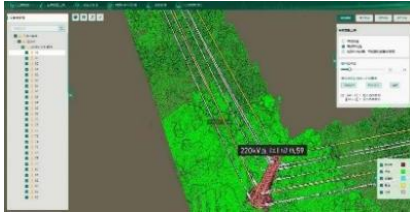


图6 具体危险点显示

### 2.5 交互层

交互层是面向输电线路的数字孪生架构中的一个重要组成部分，它通过提供人机交互界面和数据交互功能，实现与数字孪生系统的互动和操作。交互层提供输电运维界面，使线路运维人员能够直观地查看和操作数字孪生系统。输电运维界面是一个三维模拟线路界面，通过可视化的方式展示线路的三维模型、状态、数据和仿真结果，方便线路运维人员进行查看和分析。同时，输电运维界面也可以提供各种操作和配置选项，以便线路运维人员进行参数设置、仿真运行和优化调节。交互层负责与其他系统和设备进行数据交互。它可以与物联网设备、传感器、SCADA 系统等进行数据通信，实时获取线路的监测数据、状态信息和控制命令。同时，交互层也可以将模型计算结果、优化建议等反馈给其他系统和设备，以实现数字孪生与实际运行的有机衔接<sup>[5]</sup>。

## 3 基于数字孪生的输电侧数字化平台试点建设方案

### 3.1 方案必要性分析

随着信息技术的不断发展和应用，数字孪生技术在电力领域得到了广泛应用，并且在输电侧智能化建设中具有重要的作用。在输电侧数字化平台试点建设中，全面监测线路运行状态并提升运检智能化是非常必要的。传统的运检方式主要依靠人工巡检和定期维护，工作效率低下且容易出现漏检、误检等问题。而数字孪生技术可以实现对线路的实时监测和运行状态的智能分析，可以准确判断线路的健康状况，并提供故障诊断和预测等功能，大大提高了运检效率和准确性。且传统的线路运检通常需要大量的人力和物力投入，而且往往是基于定期维护的方式进行。通过数字孪生技术，可以实现对线路的精细化管理和智能化运维，减少不必要的维护和检修，降低了运维成本。数字孪生技术可以实时获取线路的监测数据和状态信息，并通过数据分析和建模等方法提供决策支持。在输电侧数字化平台试点建设中，通过数字孪生技术可以实现对线路的运行情况、潜在风险等进行全面分析，为决策者提供科学依据，提升决策的准确性和效果。

### 3.2 需求分析

需求分析是制定方案的重要步骤，通过了解线路运维人员的需求和期望，可以更好地设计和实施输电侧数字化平台试点建设方案。平台需要能够实时监测输电线路的运行情况，包括电流、电压、温度、杆塔倾斜、接地电阻、弧垂、避雷器跳闸次数等关键参数的实时采集，并能够以高精度和高频率记录数据，确保数据的准确性和及时性。

平台应该能够对采集到的线路数据进行处理和分析，包括故障诊断、线路健康评估和预测等功能，以便及时发现潜在的问题和风险，并提供相应的预警和决策支持。并且平台需要提供远程操作和控制线路的能力，例如实现远程开关操作、线路切换和故障隔离等功能，以提高操作的灵活性和效率。平台还应该具备强大的数据可视化和报表功能，能够将采集到的线路数据以图表、曲线等形式进行展示和分析，并支持自定义报表和数据导出功能，方便线路运维人员查看和评估线路的运行情况<sup>[6]</sup>。

### 3.3 平台建设方案及场景实现

#### 3.3.1 感知层

在基于数字孪生的输电侧数字化平台试点建设中，感知层是实现数据采集和监测的关键组成部分。感知层主要负责获取输电线路的实时运行数据，并将数据传输给上层的数字孪生平台进行分析和处理。在输电线路上布设各类传感器，包括电流传感器、电压传感器、温度传感器、杆塔倾斜传感器、接地电阻传感器等。这些传感器可以实时感知线路的运行状态和环境参数，并将数据采集下来。采集的数据需要经过采集设备进行处理和转换，然后通过通信网络传输到数字孪生平台。通过这样的方式构建一个完整的面向输电线路的数字孪生架构（如图4所示）。可以采用无线通信技术（如物联网技术）或有线通信技术（如光纤通信）进行数据传输。为了降低数据传输的带宽需求和延迟，可以在感知层部署边缘计算设备。边缘计算设备可以在接近传感器的地方进行数据处理和分析，减少数据传输到云端的数量和频率。在感知层需要考虑数据的安全性和隐私保护。可以采用加密技术、访问控制和身份认证等手段保护数据的安全性，同时遵循相关隐私法规和政策保护线路运维人员的隐私。

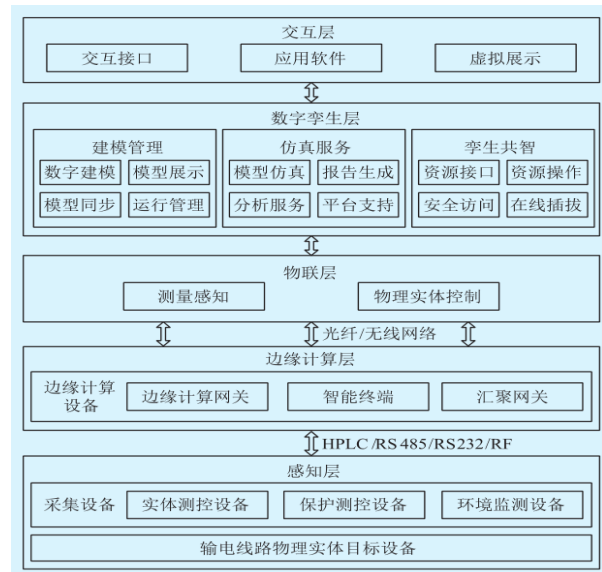


图7 面向输电线路的数字孪生架构

#### 3.3.2 边缘计算层

边缘计算层在基于数字孪生的输电侧数字化平台试

点建设中扮演着重要角色,它可以在感知层接近传感器的位置进行数据处理和分析,以减少数据传输到云端的数据量和延迟。边缘计算设备通常位于离传感器较近的位置,可以是专门的硬件设备,也可以是已有的网络设备或服务器,这些设备需要具备足够的计算和存储能力,以支持实时数据处理和分析。边缘计算设备在接收到感知层采集到的数据后,进行实时的数据处理和分析,这包括数据清洗、聚合、特征提取、模型运算等操作,以获取有用的信息和指标。边缘计算层可以根据本地处理的结果,进行本地的决策和控制。例如,根据实时数据分析结果,对线路参数进行调整,或者触发警报和报警等操作。由于边缘计算设备的计算和存储资源有限,可以对采集到的数据进行过滤和压缩,只传输必要的数据到云端,这样可以减少数据传输的带宽需求,提高数据传输效率。

### 3.3.3 物联网

平台建设方案中的物联网主要负责连接和管理输电侧各类设备,将它们与数字孪生平台进行实时数据交互和控制操作。物联网负责接入并管理各类传感器、智能设备和执行器等设备,它可以通过不同的通信协议和接口,实现设备与平台之间的连接和通信。物联网通过与设备进行数据交互,获取实时数据并将其传输到数字孪生平台,包括采集传感器数据、设备状态、工作参数等信息,并以规定的格式传输到平台。物联网可以对采集到的数据进行必要的处理和预处理。例如,对数据进行清洗、聚合、降噪、校正等操作,以提高数据质量和准确性。物联网还可以实时监测和控制接入设备的状态和行为,它可以通过指令控制设备的运行、参数调整和故障处理等操作,以实现远程监控和控制。

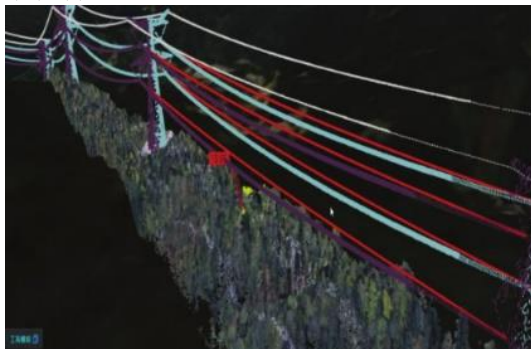


图8 山火处置下的数字孪生



图9 大风、高温、覆冰等情况下的导线模拟矢量图

### 3.3.4 输电线路全链路数字孪生应用的场景实现

数字孪生技术在输电侧的应用可以涵盖输电线路的全链路,实现以下场景和功能:第一,通过对输电线路的物理结构进行建模,包括线路的杆塔、导线、绝缘子等元件的位置、类型和连接关系。数字孪生平台可以将感知层采集到的数据与线路虚拟模型进行关联,形成3D模型,并将其可视化呈现。通过3D模型,可以直观地展示线路的杆塔高度、导线路径、绝缘子位置等信息。第二,通过数字孪生平台连接监测设备,实时获取输电线路的状态信息。例如,在数字孪生模型中,可以看到安装在杆塔上的传感器实时反馈的数据,包括线路的振动、温度、湿度、电流、接地电阻、弧垂、避雷器跳闸次数等参数,同时还可以查看无人机巡检照片等具体数据。第三,数字孪生平台可以集成气象数据和模型,对输电线路所处的区域进行天气条件的模拟和预测。与此同时,在3D模型中呈现的线路将考虑这些气象特性,例如是否有积雪、风速等,从而更加真实地模拟线路的实际情况。第四,基于数字孪生平台,可以模拟和分析输电线路的负荷情况。通过将负荷数据和参数输入到虚拟模型中,可以评估线路的负荷承受能力。在3D模型中,可以直观地看到线路的负荷分布情况和负荷变化趋势,从而提前做好负荷调整和优化,确保线路的安全运行。这些数字孪生技术的应用,将为输电行业提供更加先进、高效的线路监测和管理手段,促进输电行业数字化、智能化转型。

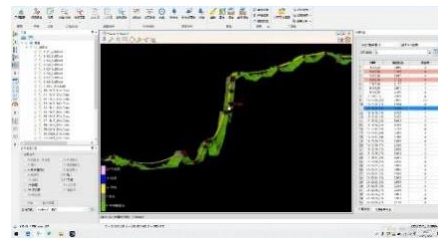


图10 全线点云模型展示

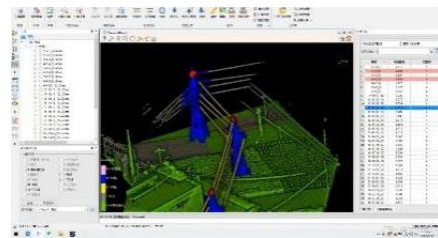


图11 三维数字化模型分类后

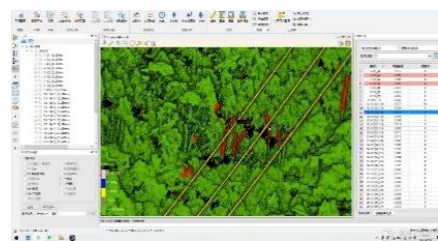


图12 自动测算通道危险点距离

#### 4 结语

通过数字孪生技术在输电线路中的应用,我们可以实现对线路的实时监测、故障预测和优化策略的精确分析。这将为电力行业带来重大的改变和提升。数字孪生技术的应用将极大地提高线路的安全性、稳定性和可靠性,减少故障发生的风险和时间成本。同时,通过对大数据的分析和机器学习的应用,我们可以优化线路的运行策略和维护计划,提高线路的经济性和效率。数字孪生技术还可以为线路的设计和规划提供重要的支持,通过虚拟实验和仿真评估不同方案的性能和风险。因此,数字孪生技术在输电线路中的应用具有巨大的潜力,有望为电力行业带来革命性的变革,推动电力行业向智能化、高效化的新阶段发展。

#### [参考文献]

[1] 易雪琴. 国内外数字孪生城市建设的经验及启示[J]. 信息通信技术与政策, 2023, 49(8): 25-30.

[2] 张颖伟, 高鸿瑞, 张鼎森等. 基于多智能体的数字孪生及其在工业中应用的综述[J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2168-2182.

[3]. 公共安全领域数字孪生技术应用实践探析[J]. 警察技术, 2023(4): 3.

[4] 刘小枫, 高嘉怡. 智慧安防赋能数字孪生城市建设[J]. 警察技术, 2023(4): 31-35.

[5] 邓王博, 马婷婷. 基于数字孪生技术的输电线路智慧巡视体系探讨[J]. 大众用电, 2023, 38(3): 61-62.

[6] 石文芳. 信息化数字行波故障测距技术在 500kV 输电线路中的应用[J]. 数字技术与应用, 2016(6): 116-117.

作者简介: 刘孟禹 (1995.5—), 毕业院校: 北京交通大学, 所学专业: 电气工程及其自动化, 当前就职单位: 云南电网有限责任公司玉溪供电局输电管理所, 职务: 高级线路运维工, 职称级别: 目前技师。