

输电线路全息状态感知关键技术研究

尹力

南网传感科技（广东）有限公司，广东 广州 510700

DOI:10.61369/EPTSM.2026070026

摘 要： 针对输电线路运行环境开放、状态变量耦合、传统监测系统分散建设导致数据难以贯通等问题，提出一种面向数字孪生的输电线路状态全息感知设计方案。系统以物理线路为对象，以多源传感、边缘计算、时空数据底座和孪生仿真模型为支撑，构建“现场感知—边缘汇聚—孪生映射—智能应用”四层协同架构。通过分布式光纤、MEMS微传感、微气象、视频图像及绝缘子在线监测等设备获取导线、杆塔、金具、绝缘子和通道环境信息，并采用时间同步、质量校验、特征提取、证据融合和模型增量更新等方法形成连续可计算的线路状态画像。试点应用表明，该系统能够在较低时延下完成状态映射、异常识别、风险预警和处置建议生成，可有效提升输电线路运维的主动性、精细化和闭环管理水平。

关 键 词： 数字孪生；输电线路；全息感知；边缘计算；多源数据融合；智能运维

Research on Key Technologies of Holographic State Perception for Transmission Lines

Yin Li

CSG Sensing Technology (Guangdong) Co.,Ltd, Guangzhou, Guangdong 510700

Abstract： To address fragmented monitoring, weak data collaboration and delayed risk identification in transmission-line operation and maintenance, a digital twin-based holistic perception system is proposed. The system builds a four-layer architecture covering field sensing, edge aggregation, twin mapping and intelligent applications. It integrates distributed optical fiber sensing, MEMS sensors, micro-meteorological devices, visual inspection and insulator monitoring, and forms a continuously computable state profile through time synchronization, data governance, feature extraction, evidence fusion and dynamic model updating. A pilot application shows that the system can support low-latency state mapping, abnormal condition recognition, risk warning and maintenance decision-making, thereby improving proactive and refined transmission-line operation and maintenance.

Keywords： digital twin; transmission line; holistic perception; edge computing; data fusion; intelligent operation and maintenance

引言

输电线路跨越区域广、运行环境复杂，是电网安全稳定运行的关键环节。随着大规模新能源接入、负荷波动增强以及极端天气事件增多，线路本体承受的机械、电气和环境扰动呈现叠加化趋势^[1]。传统状态监测通常围绕单一设备或单一风险开展布点，能够获取导线温度、杆塔倾斜、通道图像等局部信息，但难以把分散数据转化为对整条线路运行态势的系统判断。当覆冰、舞动、山火、外破、污闪和基础沉降等风险共同作用时，单阈值告警往往只能反映结果性异常，难以及时揭示状态演化过程和风险传导路径。

数字孪生强调物理对象与虚拟模型之间的实时映射、双向交互和持续优化，为输电线路由“被动监测”向“主动推演”转型提供了技术基础。在线路场景中，数字孪生并不只是三维可视化展示，而应进一步承担数据治理、状态重构、机理计算、趋势预测和运维决策支撑等功能^[2]。为此，本文围绕输电线路状态全息感知需求，重新梳理系统架构、感知体系、数据融合、孪生建模、故障预警和工程验证流程，提出一套可落地的数字孪生全息感知设计方案。该方案突出多源感知的完整性、边云协同的实时性、孪生模型的动态性以及运维应用的闭环性，力求解决现有系统“看得见但看不全、传得上但融不深、能告警但难研判”的问题。相关研究已从输电线路智能巡检、三维仿真和覆冰预警等方面开展探索，但面向多源数据闭环融合的系统化设计仍需进一步完善。

一、系统总体设计

（一）设计目标与总体思路

系统设计以输电线路全生命周期运维为主线，将现场感知、数据汇聚、模型映射、状态评估和业务处置纳入统一闭环。第一，强调全维感知，即对导线温度、弧垂、振动、覆冰、杆塔倾斜、基础沉降、绝缘子污秽、泄漏电流、金具缺陷、通道环境和微气象条件进行关联采集，避免单点数据孤立使用。第二，强调实时映射，即以线路台账、空间坐标、设备参数和在线监测数据共同驱动孪生模型，使虚拟线路能够反映物理线路的当前状态。第三，强调综合评估，即把数据驱动模型与力学、电气和气象机理模型结合起来，对风险等级、影响范围和演化趋势进行联合判断。第四，强调运维闭环，即预警结果不仅停留在提示层面，还要关联巡检任务、处置方案、备品备件和复盘记录。

基于上述目标，系统采用“感知对象全覆盖、数据流程可追溯、模型更新可持续、预警处置可闭环”的设计原则。现场端尽可能完成数据清洗、异常初筛和特征压缩，平台端负责多源融合、仿真计算、趋势预测和综合展示。通过统一编码规则将杆塔、导线区段、绝缘子串、金具和通道环境绑定到同一空间拓扑中，使不同来源数据能够按设备、区段、时间和风险类型进行检索与计算。

（二）四层协同架构

系统总体架构由现场感知层、边缘汇聚层、数字孪生层和智慧应用层组成。现场感知层面面向输电线路本体与周边环境部署设备，在线路关键区段布设分布式光纤测温与振动监测装置，采集导线温度、应变和振动特征；在杆塔侧部署倾角传感器、GNSS定位终端、微气象站和高清球机，采集杆塔姿态、风速风向、温湿度、降雨量和通道图像；在绝缘子串和金具部位配置污秽、泄漏电流和局部放电监测单元，识别绝缘劣化、放电异常和连接部件隐患。各类终端按照统一设备编码接入平台，形成可定位、可关联、可追溯的基础数据来源。

边缘汇聚层主要由边缘网关、通信模块和轻量化计算组件构成。边缘网关承担协议转换、缓存续传、数据加密、质量校验和异常初筛功能。对于振动、电流、倾斜等实时性较强的数据，优先通过5G或电力专网低时延通道上传；对于视频、图片和历史曲线等大容量数据，采用事件触发与分级上传策略，降低带宽占用。数字孪生层建设数据中台、模型引擎、仿真引擎和规则库，负责数据清洗、时间对齐、空间匹配、模型更新和风险推演。智慧应用层面面向运维人员提供三维展示、状态监测、隐患预警、故障定位、巡检派单、检修评估和应急辅助决策等功能，并支持PC端、移动端和大屏端协同使用^[3]。

（三）数据闭环与安全机制

输电线路状态全息感知不是简单的数据堆叠，而是从采集、传输、治理、建模、分析到处置的闭环过程。系统在数据进入平台前设置完整性校验、异常值标识和时间戳校准，避免无效数据直接进入模型造成误判；在数据入库后按照设备对象、空间区段、监测类型和业务场景建立索引，使同一风险事件能够关联不

同设备和不同时间尺度的信息；在预警输出后，系统记录处置过程、现场核实结果和故障原因，并将复盘信息反向写入知识库和模型训练样本，实现模型持续优化。

考虑到电力生产数据的安全要求，系统采用分区分域部署与分级授权访问策略^[4]。现场感知终端与边缘网关之间进行身份认证和加密传输，平台侧对原始数据、模型参数、告警记录和运维工单设置不同权限。对于涉及线路拓扑、设备台账和运行状态的敏感数据，系统保留操作日志和版本记录，支持审计追溯^[5]。通过安全机制与业务机制同步设计，保证数字孪生平台在开放协同的同时具备可靠的数据边界。

二、关键技术实现

（一）多源感知与边缘智能

全息感知的基础在于多源传感体系的合理组合。分布式光纤适合对长距离导线温度、应变和振动进行连续监测，可弥补点式传感器覆盖不足的问题；MEMS微传感单元体积小、功耗低，适合部署在杆塔、金具和导线重点位置，用于获取倾角、加速度、温湿度和局部振动等数据；微气象站能够反映风速、风向、温度、湿度、降雨和覆冰条件，为风险评估提供环境边界；图像和视频设备则用于识别外破、异物悬挂、绝缘子破损、金具脱落和通道侵入等可视化缺陷。不同类型设备并不是简单叠加，而应按照风险类型和空间分布进行组合布设。该组合方式有助于覆盖电气、机械、环境和外观等多维状态信息^[6]。

为降低数据传输压力并提升响应速度，系统在边缘端配置轻量化智能算法。对于高频振动数据，边缘端先进行滤波、分段和特征提取，只上传主频、幅值、能量分布和异常片段；对于图像数据，边缘端采用轻量化目标检测模型识别典型缺陷，并上传缺陷类别、置信度、截图和空间位置；对于气象与绝缘监测数据，边缘端执行阈值初筛和趋势计算，发现连续恶化时立即触发事件上传。通过这种“原始数据本地留存、关键特征优先上传、异常事件快速上报”的模式，系统兼顾了实时性、完整性和经济性。

（二）多源异构数据治理与融合

输电线路监测数据具有明显的异构特征。分布式光纤和振动传感器产生毫秒级或秒级时序数据，微气象站多为分钟级数据，视频图像属于非结构化数据，设备台账和检修记录则属于低频静态数据。如果不进行统一治理，不同系统之间会形成新的数据孤岛。系统首先建立统一数据模型，对设备编号、空间坐标、采样时间、数据类型、质量标签和业务含义进行规范化描述；其次采用时间重采样、线性插值、缺失标识和事件对齐方法，解决采样频率不一致的问题；再次通过小波去噪、异常值剔除、重复数据清理和单位标准化提升数据可用性。

在融合方法上，系统采用“数据级、特征级、决策级”三级融合。数据级融合强调同类数据的时空对齐和质量控制，例如对相邻杆塔倾角、导线温度和微气象数据进行区段化处理。特征级融合强调跨模态关联，例如将风速变化率、导线振动主频、温度梯度、泄漏电流波动和图像缺陷类别转化为统一特征向量。决策

级融合面向风险判断，可采用带可靠度权重的证据理论、模糊综合评价或贝叶斯更新方法，对多源证据存在冲突的情况进行修正。当图像识别结果与传感数据不一致时，系统根据数据质量、设备状态和历史可信度自动调整权重，避免单一数据源主导结论。

（三）动态数字孪生建模与更新

输电线路数字孪生模型由几何模型、物理模型、行为模型和规则模型共同构成。几何模型基于线路台账、无人机倾斜摄影、激光点云和地理信息数据，重建杆塔、导线、绝缘子、金具、地形和通道环境。物理模型在几何模型基础上赋予导线截面积、弹性模量、电阻率、杆塔材料、基础类型和绝缘参数等属性，并通过力学、电热和绝缘计算描述不同工况下的响应。行为模型利用历史监测数据建立覆冰增长、导线舞动、杆塔倾斜变化和绝缘子污秽积累等状态演化规律。规则模型则将运行规程、告警阈值、检修策略和专家经验转化为可执行的判断逻辑。模型构建过程中可借鉴无人机巡检数据聚合、设备识别和平行控制等研究成果^[7]。

模型更新分为实时增量更新和周期全量校正。实时更新主要针对导线温度、负荷、风速、振动、倾斜和泄漏电流等动态变量，平台按照设定周期刷新孪生状态；全量校正主要发生在设备更换、检修消缺、地形变化或通道环境发生显著变化之后，由运维记录、无人机巡检数据和现场核验信息共同触发。为避免模型长期运行后出现漂移，系统设置模型可信度评价指标，包括数据覆盖率、状态一致性、仿真误差和预警核实率。当模型输出与现场核实结果偏差较大时，平台自动标记需要校准的对象和参数，形成持续优化机制^[8]。

三、状态评估与故障预警方法

（一）状态评估指标体系

系统围绕“线路本体、支撑结构、绝缘系统、通道环境和运行负荷”五类对象建立状态评估指标体系。线路本体侧重点包括导线温度、弧垂、张力、振动幅值、舞动频率和覆冰厚度；支撑结构侧重点包括杆塔倾斜、基础沉降、构件应力和螺栓松动风险；绝缘系统侧重点包括泄漏电流、污秽等级、局部放电、绝缘子破损和闪络风险；通道环境侧重点包括风速风向、降雨、山火、树障、施工机械和异物悬挂；运行负荷侧重点包括电流、电压、潮流变化和温升裕度。各指标既可独立反映局部状态，也可通过空间拓扑形成线路区段综合风险值。

评估过程中，系统按照正常、关注、预警和严重四个等级输出状态结论。正常状态表示监测值处于合理区间且趋势稳定；关注状态表示部分指标出现波动或恶化趋势，需要增加观测频率；预警状态表示多项指标共同指向潜在隐患，应安排现场巡检或采取预防性措施；严重状态表示风险已接近或超过安全边界，需要立即处置。通过分级评价，系统能够避免告警信息过多造成运维人员疲劳，也能让不同等级的风险对应不同的响应流程^[9]。

（二）数据驱动与机理仿真协同预警

单纯依赖历史数据训练的模型容易受到样本分布影响，而单

纯依赖机理模型又难以覆盖复杂现场条件。因此，系统采用数据驱动与机理仿真协同的预警方法。首先，利用历史监测数据训练时序预测模型，对未来若干小时内的温度、风速、振动、倾斜和泄漏电流变化趋势进行预测；其次，将预测结果输入数字孪生物理模型，计算导线张力、弧垂、杆塔受力和绝缘裕度等关键响应；最后，将仿真结果与多源融合状态、告警规则和专家知识共同输入风险判别模块，输出风险等级、可能原因、影响范围和建议措施。

以覆冰风险为例，系统同时利用微气象数据、导线温度、历史覆冰记录和图像识别结果估计覆冰厚度变化。当预测覆冰厚度持续增加时，孪生模型进一步计算导线张力与弧垂变化，并结合杆塔受力裕度判断是否存在断线、倒塔或安全距离不足风险。以导线舞动风险为例，系统融合风速风向、振动主频、导线张力和历史舞动工况，识别低频大幅振动趋势，并在孪生空间中推演相邻相间距离变化。该方法能够从“某个监测值超限”提升到“风险是否会继续发展、会影响哪些设备、应采取何种处置”的综合研判。

（三）运维决策与业务闭环

预警结果只有转化为业务动作，才能体现数字孪生平台的应用价值。系统根据风险类别自动匹配处置策略。例如，覆冰风险可关联人工观冰、无人机复核、融冰装置准备和负荷调整建议；杆塔倾斜风险可关联基础排查、地质勘测和加固方案；绝缘子异常可关联带电检测、清扫维护和更换计划；通道外破风险可关联视频复核、现场制止和属地协同处置。平台将预警信息、空间位置、历史曲线、仿真结果和推荐措施统一推送给运维人员，使巡检任务从经验驱动转向数据驱动。针对覆冰、污闪和外破等风险，已有研究为预警规则和处置策略提供了参考^[10]。

系统还设置闭环反馈机制。运维人员完成现场核实后，需要记录隐患类型、实际原因、处置措施和处理效果。平台将核实结果与预警结论进行比对，形成准确预警、误报、漏报和待观察等标签。这些标签一方面用于优化算法阈值和模型参数，另一方面用于沉淀线路风险知识库。随着运行时间延长，系统能够逐步形成面向不同地形、气象条件和设备类型的差异化预警策略，减少无效巡检，提高检修计划的针对性。

四、工程应用与验证

（一）试点工程部署

为验证方案的工程适用性，选取某省电网一条220 kV输电线路作为试点对象。该线路全长68.5 km，共172基杆塔，穿越山区、丘陵和平原等多种地形，历史上曾出现覆冰、舞动和通道外破等风险。试点建设遵循“重点区段增强感知、一般区段基础覆盖、风险区段模型校准”的原则，在沿线部署分布式光纤测温系统、杆塔倾斜传感器、微气象站、高清球机、绝缘子污秽监测单元和MEMS智能微传感单元，并在变电站侧配置边缘计算网关，在省级数据中心部署数字孪生平台。

试点部署过程中，首先完成线路台账、杆塔坐标、设备参数

和历史缺陷记录的整理，建立孪生模型基础数据；随后开展传感设备安装和通信联调，将不同厂家、不同协议的数据接入统一网关；最后通过无人机巡检和现场核验修正三维模型、通道环境和设备位置。系统投运后，运维人员可以在平台中查看每一基杆塔及相邻导线区段的实时状态，也可以按风险类型查看覆冰、舞动、倾斜、污闪和外破等专题图层。

（二）系统性能测试

系统连续试运行6个月后，从实时性、准确性、稳定性和业务支撑效果等方面开展测试。数据传输方面，实时状态数据平均传输延迟为32 ms，最大延迟不超过48 ms，满足状态感知和预警联动需求。数据质量方面，经过边缘预处理、缺失补偿和融合校验后，关键监测数据综合准确率达到99.7%，感知数据有效率提高至98.2%。故障预警方面，系统共发出12次风险预警，其中11次经现场核实为真实隐患，预警准确率为91.7%，平均提前预警时间为18 h。故障定位方面，3次模拟故障的定位误差分别为62 m、75 m和58 m，均小于80 m。

与传统分散监测方式相比，试点系统在三个方面表现更明显。其一，风险识别由单设备告警转变为多源证据联合判断，误报率有所降低。其二，运维人员能够在孪生空间中直接查看异常位置、影响区段和历史演化曲线，缩短了故障研判时间。其三，平台能够根据风险等级自动生成巡检任务和处置建议，减少人工筛查工作量。测试结果说明，数字孪生全息感知方案具备较好的工程可实施性，但其效果仍依赖于传感设备可靠性、通信稳定性和模型持续校准。

（三）典型应用案例

在一次连续降雨过程中，系统对128号杆塔发出橙色倾斜预警。监测数据显示，该杆塔倾斜角在24 h内由0.3°增至0.8°，同时附近微气象站记录到持续降雨和土壤含水量升高趋势。平台将倾斜数据、降雨过程、地形信息和历史缺陷记录进行关联，并在孪生模型中模拟杆塔基础受力变化，判断该杆塔可能存在基础

沉降风险。运维人员接到预警后及时到场复核，发现基础周边排水不畅并存在局部沉陷，随后完成排水疏导和基础加固处理，避免了风险进一步扩大。

该案例表明，数字孪生系统的价值不在于替代现场检查，而在于提前发现风险线索并提高现场处置效率。如果仅依靠单一倾角阈值，系统可能在倾斜值达到更高水平时才发出告警；而通过多源数据关联和孪生仿真，平台能够识别倾斜变化背后的环境诱因和发展趋势，为运维人员争取处置时间。案例也说明，预警模型需要与现场反馈持续闭环，只有将核实结果纳入模型更新，才能提高后续同类场景下的判断能力。

五、结论

本文围绕输电线路状态感知分散、数据协同不足和复杂风险预警滞后的问题，提出了基于数字孪生的输电线路状态全息感知设计方案。系统采用现场感知、边缘汇聚、数字孪生和智能应用四层架构，融合分布式光纤、MEMS微传感、微气象、图像识别和绝缘在线监测等多源信息，构建面向线路本体、支撑结构、绝缘系统和通道环境的统一状态画像。通过数据治理、多级融合、动态孪生建模、机理仿真和数据驱动预测协同，系统能够实现状态实时映射、风险分级预警、故障辅助定位和运维业务闭环。

试点结果表明，该方案在传输时延、数据质量、预警准确率和故障定位精度方面能够满足工程应用要求，并可提升输电线路运维的主动性和精细化水平。后续研究仍需在三个方向继续深化：一是增强极端天气、复杂地形和多故障耦合条件下的模型泛化能力；二是完善跨区域线路孪生模型的协同更新机制，提升大范围灾害场景下的态势推演能力；三是探索大语言模型与电力知识库结合的运维辅助方式，使故障原因分析、检修方案生成和经验复盘更加智能化、标准化和可追溯。

参考文献

[1] 张剑新, 王驰, 刘颖. 基于数字孪生的输电线路装备故障预警与维护策略研究 [J]. 信息与电脑, 2026, 38(6): 105–107.
[2] 黄欢, 吴建蓉, 张义钊, 等. 基于数字孪生技术的绝缘子状态检测方法的研究 [J]. 电力设备管理, 2024, (16): 169–171.
[3] 严波, 孙飞, 马俊杰, 等. 基于数字孪生的输电线路智能运检系统设计 [J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(5): 177–181.
[4] 陈震远. 基于数字孪生技术的输电线路三维仿真系统设计 [J]. 电子技术, 2025, 54(12): 262–263.
[5] 张世良, 郭彤彤, 郑立华. 数字孪生技术下的输电线路无人机巡检数据聚合模型 [J]. 电子设计工程, 2024, 32(17): 102–106.
[6] 蔡杰, 张凌乐, 贺兰菲, 等. 面向数字孪生的输电线路设备识别方法 [J]. 智慧电力, 2025, 53(4): 45–52.
[7] 黄荣正. 基于数字孪生技术的架空输电线路运维应用 [J]. 电子元器件与信息技术, 2025, 9(9): 183–185.
[8] 黄欢, 姜睿, 张义钊, 等. 基于数字孪生的架空输电线路覆冰灾害预警研究 [J]. 电力大数据, 2025, 28(6): 1–8.
[9] 陈然, 周鑫, 刘万方, 等. 面向数字孪生的输电线路设备平行控制方法 [J]. 智慧电力, 2025, 53(1): 1–8+23.
[10] 刘丹丹, 赵健, 王浩舟, 等. 基于数字孪生的输电线路覆冰动态监测预警系统 [J]. 电工技术, 2024, (23): 130–133.