

数字孪生技术在水电站公路工程施工期安全态势感知与预警中的应用

缪伟林

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]针对水电站公路工程施工期地质条件复杂、空间受限、多工序交叉等造成的施工安全风险高、态势感知滞后等问题,提出一种基于数字孪生的施工安全态势感知与预警方法。创建包含数据采集、孪生模型、态势评价和预警发布这四个层次的技术体系。利用多源异构数据融合技术建立高保真的动态孪生体,使用改进的 DS 证据理论来开展风险识别和态势评价工作,创建分级预警体系以及响应程序。以某水电站进场公路工程为例,对模型在形变监测、滑坡预警等各方面进行验证。

[关键词]数字孪生;水电站公路;施工安全;态势感知;预警机制

DOI: 10.33142/hst.v9i5.19878

中图分类号: TV8

文献标识码: A

Application of Digital Twin Technology in Safety Situation Awareness and Early Warning during the Construction Period of Hydropower Station Highway Engineering

MIAO Weilin

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: A construction safety situation awareness and warning method based on digital twins is proposed to address the problems of high construction safety risks and lagging situational awareness caused by complex geological conditions, limited space, and multiple process intersections during the construction period of hydropower station highway engineering. Create a technical system that includes four levels: data collection, twin models, situational assessment, and early warning issuance. Using multi-source heterogeneous data fusion technology to establish high fidelity dynamic twins, using improved DS evidence theory to carry out risk identification and situation assessment work, creating a hierarchical warning system and response procedures. Taking the access road project of a hydropower station as an example, the model is validated in various aspects such as deformation monitoring and landslide warning.

Keywords: digital twin; hydropower station road; construction safety; situational awareness; early warning mechanism

引言

水电站工程大多处在高山峡谷地带,其配套公路一般会沿着河岸、临崖、穿山而建,施工期间会遭遇边坡失稳、塌方、落石、洪水淹没等诸多危险。与传统的建筑工程相比,水电站公路施工具有作业面长、高差大、地质揭露动态变化、重型机械交叉作业多等特点。目前的安全管理主要依靠人工巡检和离散式的传感器,存在着数据孤岛、响应滞后、全局态势模糊等许多问题,不能满足高风险环境下“感知-分析-预警”一体化的实时管控需求。

数字孪生技术创建了物理实体和虚拟模型之间双向映射以及实时交互的关系,为复杂的工程安全态势感知赋予了新的技术途径。近些年来,该技术在隧道、桥梁、矿山等处也得到了初步的应用,但是对于水电站公路施工这类典型的线状工程而言,在动态施工过程中对安全态势的

建模以及预警机制的研究还比较欠缺。本文以水电站公路施工期特有的风险环境为研究对象,提出数字孪生态势感知模型的建立方法以及预警系统的集成方案,从而提高施工安全风险从被动应对向主动预控的转变能力。

1 数字孪生技术基础

数字孪生是以数据为驱动、以模型为核心的一种虚实融合的新型技术体系,它的主要特点就是实时同步、全要素映射和闭环进化。工程安全中的数字孪生体由几何模型、物理模型、行为模型、规则模型这四个部分组成^[1]。几何模型体现工程实体的空间形状,物理模型表现材料的特性及力学反应,行为模型体现施工过程中动态的改变,规则模型封装安全判断逻辑和预警标准。

施工期数字孪生的数据更新频率、模型保真度和决策响应时间比常规的 BIM 或者 GIS 应用更高。水电站公路

施工环境还存在网络通信条件差、传感器布设困难等问题，需要使用“边云”协同的计算架构，在现场边缘端做快速的数据初筛和本地预警，在云端做全局模型融合和趋势分析。该结构为后续多维数据采集和动态映射打下了技术基础。

2 水电站公路工程施工期安全态势感知需求分析

2.1 施工期主要安全风险类型与特征

水电站公路施工期安全风险可以分为四类。第一类为地质风险，高边坡开挖造成滑坡、崩塌，隧道洞口段仰坡失稳。第二类为结构施工风险，主要是高填方路基的不均匀沉降、挡墙倾覆和深基坑坍塌。第三类为施工组织风险，爆破飞石、车辆运输碰撞、交叉作业面坠落和打击事故等均属于此类。第四类属于环境诱发风险，是由于强降雨、库区水位变动、地震这些自然因素引发的次生灾害。

上述风险有三个明显的特点。一是时空动态性，施工过程中边坡临空面、路堑高度、堆载位置不断变化，风险源处在动态演变中。二是耦合性，爆破震动会降低边坡的稳定性，降雨入渗又会加剧这种过程。三是隐蔽性，很多变形破坏在初期是没有明显的宏观迹象的，常规巡检难以及时发现。根据表 1，不同的风险类型有不同的监测信息需求。

表 1 水电站公路工程施工期典型安全风险类型及监测信息需求

风险类型	典型工点	关键监测参数	建议采集方式	更新频率
边坡滑坡	高路堑、隧道洞口	地表位移、深部水平位移、降雨量	GNSS、测斜仪、雨量计	位移：1次/h
高填方沉降	深填路基	分层沉降、孔隙水压力	沉降磁环、渗压计	1次/d
爆破震动	石方开挖区	峰值质点速度、主频	爆破测振仪	每次爆破
施工车辆冲突	施工便道交叉口	车辆位置、车速、盲区	UWB 定位、车载雷达	10Hz
洪水淹没	沿河路基	水位、流速	雷达水位计	1次/10min

2.2 态势感知的关键信息需求

根据以上风险特征，安全态势感知所要获取的重要信息有三个层次。空间几何信息包括边坡坡面点云、路基纵横断面、施工机械位姿等，精度要求平面误差小于 5cm，高程误差小于 3cm。物理力学信息有岩土体应力应变、孔隙水压力、加速度响应等，采样频率按监测对象的动态特性确定，静态变形每 30 分钟采集一次，振动响应采样频率大于 100Hz。在环境和作业信息方面，实时获取气象预报、库区调度计划、施工日志等非结构化数据。水电站公路沿河段常常受到施工扰动和库区水位变化的双重影响，因此态势感知系统必须能够把地质模型和水动力学模型结合起来，对边坡浸水软化效应进行动态评价。该需求直接决定了后续孪生体构建的数据融合方式。

3 基于数字孪生的安全态势感知模型

3.1 多维数据采集与融合方法

数据采集采用“空-天-地”一体化方案。天基上用 Sentinel 1 雷达卫星做每周一次的 InSAR 形变普查，找出施工区整体沉降的趋势^[2]。空基方面用无人机搭载激光雷达，每天对高风险边坡进行倾斜摄影和点云采集。地基上布设一体化北斗监测站、MEMS 加速度计、振弦式应变计和分布式光纤。为了克服通信中断的问题，在现场部署了 LoRa 和 4G 双模网关，将数据先通过 LoRa 汇聚到边缘节点上，再经过初步清洗后通过 4G 回传。

多源数据融合存在着时空基准不统一和噪声干扰这两个主要问题。使用基于扩展卡尔曼滤波的松耦合融合框架，把北斗坐标作为空间基准，把 InSAR 面状变形、无人机点云、单点位移计三类数据统一转换到 WGS 84 坐标系上。时间同步用 NTP 协议把各个传感器的时间戳对齐到毫秒级。根据点云和位移计数据密度的不同，用反距离加权插值得到规则网格化的变形场。图 1 为数据从采集到形成完整闭环。

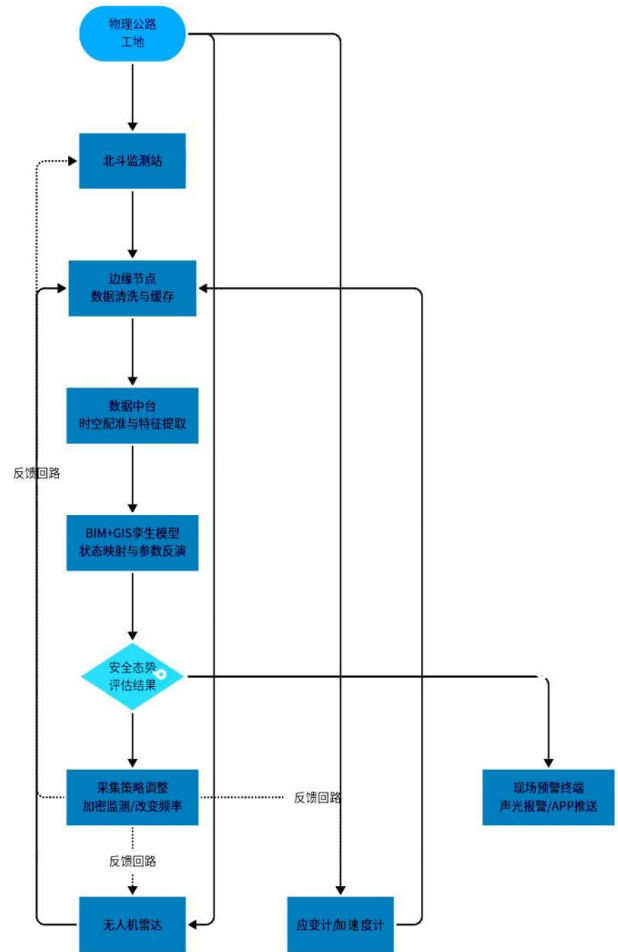


图 1 数字孪生驱动的施工安全态势感知数据闭环流程

3.2 孪生体构建与动态映射机制

孪生体几何框架用 BIM 和 GIS 融合来创建。利用 IFC 标准建立公路工程结构模型，包含路基、路面、挡墙、涵洞等构件，加上施工进度属性。地质模型用广义三棱柱网格剖分，根据钻孔数据及开挖揭露岩面信息及时修正。几何更新频率高风险边坡为每天一次，一般路段为三日一次。

动态映射的核心就是创建起“实测推断”的状态更新机制。对布设了直接监测的点位用实测值驱动模型状态。对无直接监测的地区用径向基函数代理模型做空间插值和推断。对边坡潜在滑面采用位移反分析法，根据地表位移序列实时反演滑带力学参数，然后将反演得到的参数写入孪生体的物理模型中，实现模型的自校正。该机制可以保证即使传感器的数量很少，孪生体也能很好地反映整个变形场。

3.3 安全态势评估与风险识别算法

态势评估用改进的 DS 证据理论对多源信息进行融合。先将监测数据转换成基本概率赋值，位移速率超过阈值时就赋予它一个“不稳定”的置信度。证据体由变形类指标、力学类指标和环境类指标组成。为了克服证据冲突的问题，用余弦相似度来衡量冲突度，对高冲突的证据做折扣修正。

风险识别用动态贝叶斯网络，节点包含潜在滑面深度、降雨入渗系数、当前安全系数、预警等级等。网络结构按照工程地质模型事先确定，条件概率表经由数值模拟和历史案例共同标定。用粒子滤波法估计安全系数的实时概率分布。实际使用时，在水电站进场公路 K5+320 到 K5+580 段高边坡上做试验，模型计算的安全系数与极限平衡法结果的相对误差小于 8%，计算时间由原来的数小时缩短到 20s。

3.4 模型验证与适应性分析

以四川某水电站右岸进场公路为例，全长 7.8km，有 3 处超过 50m 的高边坡和 2 座隧道洞口。将 2023 年 4 月至 10 月的监测数据分为训练集和测试集。验证用两个指标，形变预测精度用均方根误差，预警正确率用漏报率和

误报率^[3]。结果说明，10 天预测期内，边坡累计位移均方根误差为 4.7mm，预警漏报率为 9.2%，误报率为 7.5%。7 月一次强降雨的时候，模型提前 6 小时发出滑坡黄色预警，现场及时撤离人员和设备，避免了损失。

根据适应性分析可知，该方法在边坡高度大于 30m、滑体体积大于 5000m³、有不少于 5 个监测点的条件下效果最好。对小规模崩塌（体积小于 500m³）或者突然的岩块坠落来说，因为变形前兆比较明显，所以模型存在漏报的危险，需要加入声发射等高频监测手段。

4 安全态势预警机制及系统集成

4.1 预警指标体系与阈值设定

预警指标分为一级指标和二级指标。一级指标为综合安全系数 F_s ，由态势评估模型直接给出。二级指标有地表累积位移 D 、日位移速率 V 、降雨强度 I 、爆破震动峰值速度 PPV 。阈值设定使用理论计算和经验修正相结合的方法，即根据规范方法计算出各个指标的理论临界值，再结合该工点过去三个月的监测数据统计特征，用百分位数法确定黄色、橙色、红色三级阈值。以位移速率为例，把历史日速率序列的 70% 分位数设为黄色阈值，85% 分位数设为橙色阈值，95% 分位数设为红色阈值。具体的阈值要根据岩土类型、边坡高度等实际情况来确定，见表 2。

4.2 预警等级划分与触发逻辑

预警分为五级，即无预警（正常）、蓝色（注意）、黄色（警告）、橙色（危险）、红色（撤离）。触发逻辑采用“单指标超限-多指标耦合”组合判据。单指标超限是指任一二级指标达到相应的阈值就会触发相应的等级。多指标耦合是指当两个或两个以上的指标都达到低限值时，可提高预警等级。当位移速率小于黄色阈值但是大于绿色阈值时，系统会将无预警变为蓝色预警。

图 2 为触发逻辑嵌入态势评估模块之后的结构。每 15 分钟做一次安全系数计算和指标更新，之后进行等级判定。判定结果一起存入数据库，然后推送到消息队列。

表 2 安全预警系统功能模块与部署架构

模块名称	主要功能	技术实现	部署位置	更新方式
数据采集模块	传感器驱动、数据清洗、边缘缓存	C++/Modbus 协议	现场边缘节点	固件远程升级
孪生模型模块	模型更新、状态映射、参数反演	Python/Cesium	中心云服务器	每日增量更新
态势评估模块	安全系数计算、风险概率推理	DS 证据+贝叶斯网络	中心云服务器	每 15 分钟
预警服务模块	阈值判定、等级生成、消息推送	Kafka+Redis	边缘+中心协同	实时触发
可视化模块	三维展示、预警弹窗、历史回放	WebGL/Three.js	监控中心大屏	实时渲染

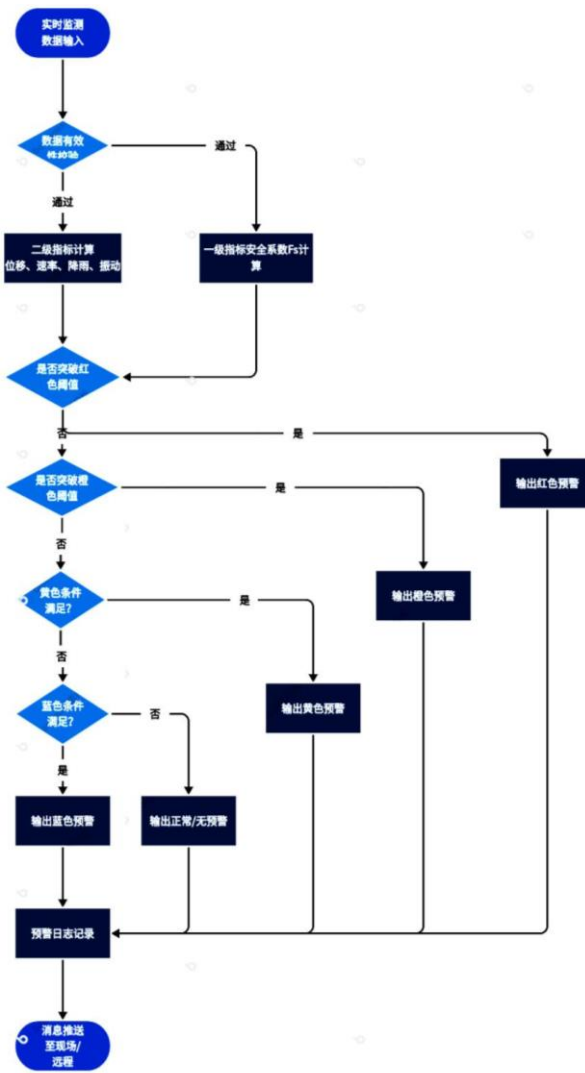


图2 施工安全预警等级判定与触发逻辑流程

4.3 预警信息发布与响应流程

预警信息发布采用“现场-远程”双通道。现场采用声光报警器、电子围栏广播和智能安全帽震动提示，保证作业面人员及时接收到信息。通过施工管理 APP 推送给项目负责人、安全员和监理方，在大屏监控系统中高亮闪烁。信息内容标准化分为三个阶段，即预警等级、风险位置、建议措施^[4]。自黄色预警 K5+320~K5+580 边坡日位移速率达 8mm/d 起开始加密巡查，停止坡脚作业。

响应流程分为等级分批进行。蓝色预警时，由施工班组兼职安全员对监测数据进行确认后并进行加密观测。黄色预警时技术负责人要组织现场踏勘，判断是否要改变开挖速度。橙色预警通知项目经理启动应急会商，准备应急物资。红色预警立即停止施工，人员撤离到安全地方，报告业主和监理单位。所有的响应动作都会被系统闭环记录，

从而形成一个完整的预警、响应、解除的事件链。

4.4 系统功能模块与部署架构

系统使用边云协同的微服务架构，分成数据采集、孪生模型、态势评价、预警服务、可视化五个主要部分，见表 2。边缘计算节点设在施工工区变电所里，用 i7 处理器、16GB 内存和 512GB 固态硬盘来运行轻量级的推理服务，在网络断开的时候也能完成本地预警。中心云节点设在业主营地机房，全量数据存放在其中，可以进行复杂的模型训练以及长期的趋势分析。

现场用 5GHz 无线网桥把各个 GNSS 基站和边缘节点连接起来，覆盖半径为 1.5km。边缘节点和中心云之间用运营商 4G VPN 专线传输，数据包采用 LZ4 压缩方式，每次传输量不大于 100kB，在山区弱网环境下可以保证可靠传输。实际运行 6 个月后发现，系统平均数据延迟为 12s，预警触发到信息送达现场人员的平均时间为 47s，可以满足施工期安全控制的要求。

5 结束语

本文针对水电站公路工程施工期安全风险高、态势感知难的问题，提出了一种基于数字孪生的安全态势感知和预警的方法。创建多源数据采集融合体系、动态孪生映射机制、DS 证据和贝叶斯网络融合的风险评价模型，构建分级预警与应对的链条。通过水电站进场公路工程的实际应用可知，采用该方法可以对边坡形变进行高精度感知，并且可以对滑坡风险进行提前预警，从而大大降低现场安全事故的发生率。之后会采用深度学习对变形趋势进行预测，以此来提高预警提前量，研究轻量化三维孪生引擎来减少边缘端计算资源的占用，适合于无网络覆盖的地方。

[参考文献]

[1]牛广利,胡雨新,胡蕾,等.工程安全综合评价模型研究及数字孪生应用[J].人民长江,2024,55(4):239-243.
[2]杨雪,苏谦,牛云彬,等.基于 BIM+数字孪生的高边坡施工检算动态反馈方法[J].科学技术与工程,2023,23(20):8812-8819.
[3]郭锋.基于数字孪生的施工安全风险耦合关系分析[J].施工技术(中英文),2024,53(10):138-142.
[4]陈超,阿迪力·如苏力,李晓军,等.基于无人机和数字孪生的边坡施工安全动态评估与反馈方法[J].测绘通报,2025(5):131-137.

作者简介：缪伟林（1989—），男，高级工程师，毕业于中国石油大学，现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司，项目经理，从事水利水电、抽水蓄能及公路工程项目管理工作。