

电网建设项目环水保数字化智能管控技术研究

汤锦慧¹,温钱明²,伍发元¹,代小敏¹,周金泉¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096;2. 国网江西省电力有限公司,江西 南昌 330077)

摘要:为解决电网建设项目环境保护与水土保持监管效率低、覆盖不全面、风险预警滞后、数据支撑不足等问题,文中基于空地一体化多源监测技术、深度学习算法、大数据分析与微服务架构,构建一套覆盖施工全过程的环水保数字化管控体系,研制一体化智能管控平台。平台以改进YOLOv8目标检测、U-Net语义分割、Bi-LSTM时序预测、自适应阈值优化为核心算法,实现施工扰动范围、线路路径偏移、站址位移、顺坡溜渣、环水保措施落实等典型问题的自动识别、定量计算、动态跟踪与闭环管理。在500 kV某输变电工程试点应用表明,该技术体系可将问题识别周期由15~30 d压缩至7 d以内,综合识别准确率大于95%,扰动面积计量误差小于15%,显著提升电网建设环水保管控的智能化、精细化与规范化水平,可为输电工程绿色施工与生态合规管控提供系统性技术支撑。

关键词:电网建设;施工期;环境保护;水土保持;数字化;空地一体化;深度学习;智能识别;风险预警

中图分类号:X 37 文献标志码:A 文章编号:1006-348X(2026)03-0042-06

0 引言

我国生态文明建设与生态环境保护监管趋于严格,生态环境部、水利部相继出台文件,强化建设项目施工期环境监管与水土保持过程管控^[1-2]。国家电网有限公司提出推进环水保管理数字化转型,构建全过程、智能化、闭环式管控体系^[3]。电网建设项目具有线路跨度大、地形条件复杂、生态敏感区分布密集、施工扰动点多面广等特点,传统以人工现场巡检、纸质资料流转、竣工集中验收为主的管控模式,存在巡检效率低、覆盖范围有限、数据碎片化、问题发现滞后、整改跟踪困难等短板,难以满足全域覆盖、实时监测、精准识别、快速处置的监管要求。

近年来,卫星遥感、无人机航测、人工智能等技术在工程环境与水土保持领域逐步应用,数字化技术应用逐步拓展。李万智等构建了电网工程环水保空地一体化监管体系,实现了环水保信息的数字化管理^[4];姚为方等将“天地一体化”技术应用于输变电工程,验证了其在施工扰动、水保措施落实等方面的监管有效性^[5]。现有研究多聚焦监测框架构建,在复杂地形目标识别、多时序扰动定量分析、风险动态预测、

全流程业务闭环等方面仍存在精度不足、泛化性弱、与工程业务结合不紧密等问题^[6]。为此,文中以施工期全域环水保风险管控为目标,建立多源数据融合、智能识别、风险研判、节点管控、验收闭环数字化技术体系,突破高精度智能识别、动态风险预测、全流程数字化管控等关键技术,形成适用于电网建设项目的环水保数字化解决方案,对提升电网工程生态环境保护水平,保障建设项目合规落地,推动电力行业绿色低碳发展具有重要工程应用价值与现实意义。

1 平台总体设计

1.1 平台架构

平台采用“感知层-数据层-算法层-平台层-应用层”五级分层架构,基于微服务架构开发,部署于互联网大区,数据存储于管理信息大区,通过逻辑强隔离装置实现内外网数据安全交互。

1) 感知层:由高分一号、高分二号卫星,固定翼无人机、多旋翼无人机、全自动无人机机巢、现场移动终端构成,实现宏观普查、精细详查、定点监测与现场复核的数据采集。

收稿日期:2026-04-10

基金项目:江西省自然科学基金面上项目(20252BAC240322);国网公司总部科技项目(52182024000Q)。

作者简介:汤锦慧(1991),女,硕士,高级工程师,从事电网环境保护研究。

2) 数据层:采用RDS-MySQL存储结构化业务数据,OBS对象存储服务存储卫星影像、无人机影像、文档等非结构化数据,Redis组件提升高频访问数据响应速度。数据接入内容包括卫星遥感影像、无人机航测影像、工程矢量数据、环境影响评价文件、水土保持方案、监理监测报告、施工进度信息等。

3) 算法层:包含目标检测、语义分割、时序变化检测、风险预测、阈值优化、数据融合等核心模型,为智能识别与风险研判提供算法支撑。

4) 平台层:提供数据汇聚、算法调度、权限管理、消息告警、接口网关、流程引擎、文件服务、日志审计等通用能力,支撑上层业务应用。

5) 应用层:面向建设、监理、施工、管理单位提供基础信息管理、智能问题核查、项目节点管控、竣工验收管理、风险态势可视化等功能。

总体架构图如图1所示。



图1 总体架构图

1.2 数据管理与信息安全

平台实现多源异构数据统一接入、标准化处理、分类存储与权限管理功能。系统遵循网络安全等级保护二级要求,采用国密SM2算法,实现非对称加密、SM4算法实现对称加密,敏感数据采用加密传输与存储;身份认证采用口令与CA证书双重认证,连续登录失败自动锁定;数据采用异机物理与逻辑双重备份,每日导出核心数据,备份保留周期满足管理要求。

2 关键技术与算法

2.1 技术路线

平台依托卫星遥感、无人机航测与现场核查手段

构建空天地一体化数据采集链路,对建设工程开展施工前、施工期多时序影像获取;通过改进型YOLOv8与U-Net模型,对影像进行目标检测与语义分割,提取施工扰动范围、顺坡溜渣区域、临时苫盖及挡土墙等环水保关键要素,结合时序变化检测与Bi-LSTM风险预测模型,实现扰动超标判别、问题点位定位及风险趋势预判;然后,将智能识别结果推送至问题监管模块,生成整改通知单并纳入管控流程,实现“问题发现-整改派发-过程跟踪-问题复核”的闭环管理;同时,验收阶段文档经由自然语言大模型及环评审查智能体进行错字检查、逻辑审查与要点完整性校验,形成“智能初审-专家复核-意见落实”一体化评审体系;最终,通过问题清单统计与成效评估反向优化模型阈值与样本库,形成持续迭代的智能管控闭环。

2.2 空天地一体化多源协同监测技术

卫星遥感用于全线宏观普查,获取施工扰动范围、线路偏移、站址位移、生态敏感区交叉等信息,全色分辨率0.81~2 m,多光谱3.24~8 m。

无人机用于重点区域的详查,固定翼无人机实现长距离快速巡查,多旋翼无人机实现厘米级成像,分辨率优于0.1 m,可识别防护设施缺失、顺坡溜渣、地表裸露等细节问题。

在生态敏感区与高风险工点部署全自动无人机机巢,实现自动起降、自主航线作业、影像实时回传与高频次监测,弥补卫星重访周期长、人工航飞效率低的不足,提升重点区域实时监管能力。

现场核查用于对算法识别结果进行验证与补充,形成“卫星普查-无人机详查-现场核查”的闭环机制。

2.3 核心算法

2.3.1 基于改进YOLOv8的环水保目标检测算法

针对塔基扰动、施工道路、堆渣、防护设施缺失等目标,对YOLOv8进行改进,提升小目标与复杂场景检测精度。

1) 损失函数采用CIoU作为边界框回归损失:

$$L_{CIoU} = 1 - IoU + \frac{\rho^2(b, b^{gt})}{c^2} + \alpha v \quad (1)$$

式中: L_{CIoU} 为CIoU边界框回归损失; IoU 为预测框与真实框的交并比; $\rho(b, b^{gt})$ 为预测框与真实框中心点距离,其中 b 为预测框中心点坐标, b^{gt} 为真实框中心点坐标; c 为最小外接矩形对角线长度; α 为权重系

数; v 为长宽比一致性度量。

2) 小目标增强引入加权特征金字塔,增强浅层特征权重 F_{out} :

$$F_{out} = \sum_{i=1}^n \omega_i F_i \quad (2)$$

式中: ω_i 为各层特征权重; F_i 为不同尺度特征图; n 为特征金字塔总层数; i 为特征金字塔层索引。

3) 输出算法输出目标类别、置信度、包围框坐标,实现超范围扰动、顺坡溜渣、防护措施未落实等目标精准定位。

2.3.2 基于U-Net的施工扰动语义分割算法

采用U-Net算法实现施工扰动区、裸露地表、临时占地像素级分割,用于扰动面积定量计算。

1) 编码-解码结构编码层下采样提取特征,解码层上采样恢复尺寸并融合高分辨率信息。

2) 交叉熵损失 L_{seg} :

$$L_{seg} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C y_{ij} \log(p_{ij}) \quad (3)$$

式中: C 为类别数; N 为总像素数; y_{ij} 为第 i 个像素属于第 j 类的真实标签; p_{ij} 为第 i 个像素属于第 j 类的预测概率。

3) 面积计算对分割结果进行像素统计并结合影像分辨率换算实际面积 S :

$$S = N_{pixel} \cdot S_{pixel} \quad (4)$$

式中: N_{pixel} 为扰动区域像素总数; S_{pixel} 为单像素对应实际面积。

经测算,扰动面积定量误差控制在15%以内。

2.3.3 多时序影像变化检测算法

通过多期影像配准、差分、二值化、形态学处理提取变化区域,识别扰动新增、扩大、恢复滞后等动态变化。

1) 影像差 D :

$$D = |I_2 - I_1| \quad (5)$$

式中: I_1 、 I_2 分别为前、后两期影像灰度/反射率。

2) 自适应阈值提取变化 T :

$$T = \mu + k\sigma \quad (6)$$

式中: μ 、 σ 分别为局部窗口像素的均值与标准差; k 为阈值调节系数。

2.3.4 基于Bi-LSTM的环水保风险预测模型

以施工扰动时序数据、地形坡度、气象降雨、施工进度为输入值,构建双向长短期记忆网络(Bi-

LSTM),预测水土流失与扰动超标风险。

1) 前向隐状态 $\vec{h}_t$ 与后向隐状态 $\overleftarrow{h}_t$:

$$\begin{aligned} \vec{h}_t &= \overrightarrow{\text{LSTM}}(x_t, \vec{h}_{t-1}) \\ \overleftarrow{h}_t &= \overleftarrow{\text{LSTM}}(x_t, \overleftarrow{h}_{t+1}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: x_t 为 t 时刻输入特征; $\overrightarrow{\text{LSTM}}$ 为前向LSTM单元,代表正向传播长短记忆单元,沿时间递增方向提取时序特征; $\overleftarrow{\text{LSTM}}$ 为后向LSTM单元,代表反向传播长短记忆单元,沿时间递减方向提取时序特征; $\vec{h}_{t-1}$ 为前向 $t-1$ 时刻隐状态; $\overleftarrow{h}_{t+1}$ 为后向 $t+1$ 时刻隐状态。

2) 输出融合 H_t :

$$H_t = \omega_h \vec{h}_t + \mu_h \overleftarrow{h}_t + b_h \quad (8)$$

式中: ω_h 为前向隐状态权重; μ_h 为后向隐状态权重; b_h 为偏置顶。

模型可实现提前7天以上风险预警。

2.3.5 面向电网建设工程的自适应阈值优化算法

根据电压等级、地形类型、生态敏感等级动态调整识别阈值,降低漏判与误判。

$$\tau = \tau_0 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \quad (9)$$

式中: τ 为最终识别阈值; τ_0 为基础阈值; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为地形、敏感区、工程类型修正系数。

2.4 智能模型样本库构建及训练

2.4.1 样本库内容

样本库构建聚焦环水保典型地物与问题特征,覆盖影像、特征、问题、措施及文本五大类:

1) 遥感影像样本:塔基、施工便道、牵张场、临时堆土区等多期次影像。

2) 环水保特征样本:标注地物纹理粗糙度、形状指数(紧凑度、矩形度)、光谱反射率、地形坡度及空间分布格局等量化特征。

3) 问题样本:顺坡溜渣、扰动超标、苫盖缺失、挡土墙破损等违规场景。

4) 措施样本:挡土墙、截排水沟、临时苫盖、植被恢复区等落实/未落实对照样本。

5) 文本样本:基于大模型与环评审查智能体架构,构建验收报告、标准规范、评审意见等文档库。

2.4.2 样本库训练

使模型能够基于地物多维特征实现施工扰动像素级精准分割、顺坡溜渣自动判别、措施落实定性定量评估;同时,通过大模型对验收文档的语义理解与

逻辑推理,实现错字检测、要点完整性校验及前后文一致性审查,支撑智能评审自动化与可追溯输出。

3 平台管控功能

3.1 基础信息管理

整合项目可研、初设、施工图、招投标、环评、水保等阶段资料,建立统一电子档案,实现法规标准、技术文件、工程信息集中管理与查询,为全过程管控提供统一依据。基础信息管理功能模块见表1。

表1 基础信息管理功能模块

功能项目	功能描述
影像数据	实现多源影像集中接入、分类储存与增删改等编辑服务。
工程矢量数据	支持环保水保问题分析结果、线路及塔位矢量数据批量上传。
工程信息数据	用于创建工程项目,上传工程名称、电压等级、计划开工日期等基础工程信息。根据项目名称实现对影像数据及工程矢量数据的检索查询。

3.2 过程问题智能核查

以空天地一体化监测与智能算法为核心,自动识别水保重大变更、环保重大变动、路径偏移、施工扰动面积超标、新增临时施工道路超标、顺坡溜渣、房屋未拆迁、设施/措施未落实、扰动未恢复等九类环保水保问题(见表2)。系统完成定位、计量、判定、清单生成,支持在线复核与闭环处置(见表3)。

表2 环保水保问题列表

环保水保问题类型	问题描述/判据
水保重大变更	①水土流失防治责任范围增加30%以上; ②工程山区、丘陵区部分横向位移超过300 m的长度累计达到该部分线路长度的30%以上; ③施工道路或者伴行道路等长度增加20%以上。
环保重大变动	①输电线路路径长度增加超过原路径长度的30%; ②变电站、换流站、开关站、串补站站址位移超过500 m; ③输电线路横向位移超出500 m的累计长度超过原路径长度的30%。
路径偏移	①施工线路路径相对设计线路路径横向位移情况; ②点位偏移位置、方向,进入生态敏感区变化情况; ③站址位移情况; ④路径长度变化情况。
施工扰动面积超标	①输变电工程整体,以及包括的输电工程、变电工程施工扰动面积超标情况; ②工程塔基区、施工道路区、临时工程施工扰动面积超标情况; ③每处及工程扰动面积未恢复情况。
新增临时施工道路超标	①每条临时施工道路宽度超标情况; ②工程临时施工道路长度超标情况; ③每条临时施工道路未恢复情况。
顺坡溜渣	①点位、站区、临时工程顺坡溜渣情况; ②临时施工道路顺坡溜渣情况; ③顺坡溜渣整改情况。
房屋未拆迁	①每处房屋未拆迁情况; ②每处房屋已拆迁未恢复情况。
设施/措施未落实	程措施未落实; ①未按照要求建设环保水保设施的具体位置及数量; ②水保工程措施,包括拦挡、截排水、工程护坡、土地整治等落实不及时、不到位。 临时措施未落实; ①水保临时防护措施,包括临时拦挡、排水、苦盖、植草、限定扰动范围等落实不及时、不到位; ②施工场地未落实工地周边围挡、材料堆放覆盖、扬尘措施、路面硬化要求。 垃圾未清运; ①施工场地生活垃圾、建筑垃圾、施工余料未分类收集和及时清运; ②施工过程中产生的土石方、建筑垃圾、生活垃圾未分类集中收集。
扰动未恢复	植物措施未落实或者已落实的成活率、覆盖率不达标。

表3 过程问题自动核查功能模块

一级功能	二级功能	功能描述
统计看板	监管电网在建项目统计	以公司维度对所监管电网在建项目进行环保水保问题分类统计。支持项目名称检索与底图联动,可通过选择项目名称实现线路位置跳转。
	项目预警	通过不同颜色形式对工程线路环保水保问题进行分级预警,支持项目名称查询预警结果并以图表形式统计,列表形式导出。
问题分析	扰动定量分析	支持实际施工扰动面积与设计面积对比,通过施工扰动面积对比定量分析施工扰动超标情况。
	顺坡溜渣分析	结合地形地貌定性分析工程点位、临时施工道路顺坡溜渣情况。
	环保措施落实分析	结合影像通过对对挡土墙、临时苦盖、植被覆盖等措施落实情况完成对工程措施、临时措施落实、植物措施的定性分析。
	影像比对	通过工程施工前、施工期的多期影像对比,完成扰动超标、顺坡溜渣等各类环保水保问题分析。
问题清单	问题清单	根据选中工程、问题类型、影像类型自动生成相应整改通知单。

3.3 项目节点管控

按设计、建设、验收三阶段,设置管控节点(见表4),对文档上传、报告提交、方案审查进行时限提醒与超期告警,防止流程倒置与资料缺失,实现环保水保要求嵌入工程全过程。

表4 项目节点管控功能模块

一级功能	二级功能	功能描述
设计阶段管理	规划可研	管理项目可行性研究及初步设计文件。设置可行性研究报告及设计方案上传节点时间对项目进行节点提醒。设计阶段默认提醒时间设定在项目创建后6个月内,可根据项目实际需求调整。临期或逾期将会触发平台提醒功能。
	环境影响评价	管理项目环境影响评价文件如环境影响报告书、环境影响报告书(表)批复文件等。设计阶段默认提醒时间设定在项目创建后6个月内,预期或临期会触发提醒告警。
	水土保持方案	管理水土保持方案文件如水土保持方案报告书、内审文件、批复文件等可通过设置工作节点时间与上传文件时间对项目进行过程监督。设计阶段默认提醒时间设定在项目创建后6个月内,可根据项目实际需求调整。临期或逾期将会触发平台提醒功能。
建设阶段管理	环境保护	管理建设阶段环境保护文件如环境监理季报、环境监理工作方案、环境保护施工图设计等。可通过设置工作节点时间与上传文件时间对项目人员进行提醒。默认在项目开工时间后12个月内,对临期或超期未上传文件进行提醒。
	水土保持	管理建设阶段水土保持文件如施工图设计、水土保持监测方案、水土保持监测报告等。默认提醒时间设定在项目开工时间后12个月内。未完成文件上传将对相关人员进行提醒。
验收阶段管理	环保验收	对验收阶段环保验收文件如环保验收申请文件、电网建设项目变动分析报告、内审报告等进行监督管理。在项目竣工时间后12个月内未完成文件上传将对相关人员进行提醒。时间节点可根据项目情况设定。
	水保验收	对验收阶段水保验收文件如水保验收申请文件、水保监理总结报告、水保监测总结报告等文件进行监督管理。在项目竣工时间后12个月内未完成文件上传将对相关人员进行提醒。时间节点可根据项目情况设定。

3.4 竣工验收管理

实现验收资料线上提交、智能审查、专家在线评审、整改跟踪、归档备案(见表5)。系统依据标准规范库进行完整性、逻辑性、合规性检查,提升验收效率与规范性。

表5 竣工验收管理功能模块

一级功能	二级功能	功能描述
智能初审	标准规范知识库	收集相关国家、行业、地方标准规范,构建标准规范知识库。
	错字检查	对文档内错别字进行检查。
	完整性审查	对文档的章节目录完整性、内容完整性等报告完整性进行检查。
	逻辑审查	对文档前后文逻辑性进行检查。
	要点审查	抽取文档中要点指标,如项目概况、影响评价、措施类型、水土流失防治指标等,在全文核对数据一致性。
专家审查	查看初审问题清单	支持专家查看智能初审问题清单。
	专家审查	支持专家在智能初审问题清单的基础上核查初审结果,并对审查结果进行修改、完善,形成专家审查意见。
	意见生成	所有专家都审查完毕后汇总生成最终专家评审意见。
意见落实 复核	错字检查	对按专家评审意见修改后的文档进行错别字检查。
	逻辑审查	对按专家评审意见修改后的文档进行前后文逻辑审查。
	意见落实复核	基于按专家评审意见修改后的文档及审查意见反馈表,逐条复核确认是否落实审查意见。
	意见生成	对修改后文档及审查意见反馈表复核完毕后生成复核意见。
文档管理	验收文档	按项目名称、验收文档类型、文档版本存储文档。
	审查意见	按项目名称存储经专家评审过后,依据专家评审意见以及修改情况生成的审查意见反馈表。
	初审问题清单	按项目名称、文档版本存储经智能初审后的初审问题清单。
	专家评审意见	存储经所有专家评审过后生成的最终专家评审意见。
	复核意见清单	存储意见落实复核后的复核意见清单。

4 工程应用与成效分析

文中选取江西 500 kV 某输变电工程开展试点应用,依托平台基础信息管理、过程问题智能核查、项目节点管控、竣工验收管理四大核心功能,构建“卫星普查+无人机详查+人工抽查”的空天地一体化环水保全过程监管体系,验证数字化技术体系在电网建设环水保管控中的实用性与先进性。

4.1 核心功能应用情况

1) 基础信息管理:全域数据统一归集,管控依据精准高效。平台完成试点工程可研、初设、环评、水保等全阶段资料电子化归档,整合卫星/无人机影像、工程矢量、施工进度等多源数据,实现数据统一接入、标准化管理、一键检索。彻底解决传统模式资料分散、查询低效、版本混乱问题,为智能核查、节点管控、竣工验收提供统一、准确的数据支撑,资料管理效率提升80%以上。

2) 过程问题智能核查:智能识别精准高效,问题处置闭环可控。依托改进YOLOv8、U-Net等核心算法,自动完成典型环水保问题的定位、定量、判定、清单生成。综合识别准确率 $\geq 95\%$,无人机细节识别精度 $\geq 97\%$,施工扰动面积计量误差 $\leq 15\%$;问题识别周期由传统15~30 d压缩至7 d以内,现场核查人力投入降低60%以上,实现问题早发现、早预警、早处置。

3) 项目节点管控:全流程节点预警,流程合规无遗漏。平台按设计、建设、验收三阶段设置管控节点,对环评、水保、监理等文档上传与方案审查进行时限提醒、超期告警,实现环水保要求嵌入工程建设全流程。试点期间未出现流程倒置、资料缺失等问题,节点合规率100%,有效规避因流程滞后导致的环水保合规风险。

4) 竣工验收管理:线上评审智能审查,验收规范高。效平台实现验收资料线上提交、智能初审、专家在线评审、整改跟踪、归档备案全流程线上化。依托标准规范知识库,自动完成报告完整性、逻辑性、合规性检查,验收审查效率提升60%,有效降低人为误差,推动竣工验收标准化、规范化。如图2所示。

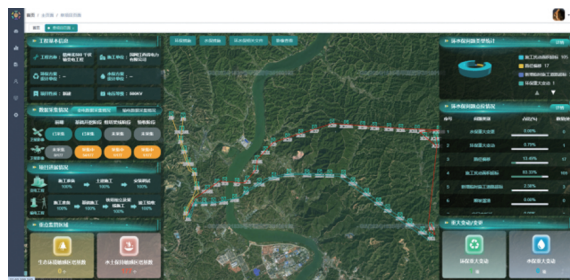


图2 500 kV某输变电工程管控主页面

4.2 应用发现的典型问题及措施

1) 站址位移超标。环评报告中站址与实际站址位移478.4 m,水保方案中站址与实际站址位移589.3 m,存在合规风险。经与建设管理单位、设计单位、报告编制单位、施工单位多方核实后,证实环评报告中的站址有误。如图3所示。

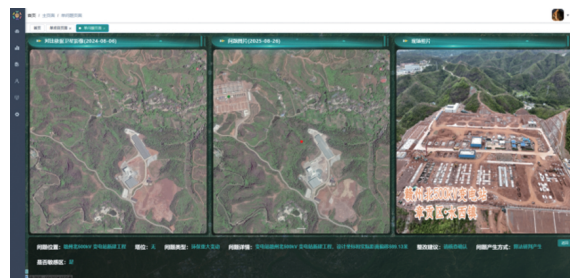


图3 卫星遥感和无人机拍摄的变电站站址图

2) 塔基施工扰动面积超标。ZE6、ZE7、JE8、JE8-1等塔基施工扰动范围超出设计值,扰动面积超标,违反水土流失防治管控要求。现场核查并分析原因:施工单位未严格按设计范围管控施工,现场作业随意性大,超范围开挖、堆料。解决措施:立即对超标塔基进行范围整改、植被恢复;通过平台设置扰动

面积阈值预警,实现实时监测、超标告警,严格约束施工范围。如图4所示。



图4 卫星遥感和无人机拍摄的塔基图

3) 水土保持临时措施未按方案落实。JE6、ZE5G1、ZE7、JE8等塔基,其临时拦挡、排水、苫盖、土地整治等水保临时措施未按批复方案实施,水土流失防护不到位。现场核查并分析原因为:施工单位环保水保意识薄弱,重进度、轻防护,未按方案同步实施水保临时措施;监理单位现场监管不到位,未能及时督促整改。解决措施:督促施工单位限期补做水保临时措施,监理单位全程旁站监督;平台将水保措施落实情况纳入智能核查重点,未落实自动预警、闭环销号。

4.3 应用成效

试点应用表明,该数字化技术体系实现电网建设环水保管控由事后整改向事前预防、事中管控转变,全面提升管控的智能化、精细化与规范化水平,为输电工程绿色施工与生态合规管控提供技术支撑。

5 结语

文中构建电网建设项目施工期环水保数字化技

术体系,融合空天地一体化监测、深度学习、时序分析与全流程闭环管控技术,形成数据统一接入、智能精准识别、风险动态预警、过程节点管控、验收标准化的数字化能力。该体系有效解决传统模式效率低、覆盖不全、预警滞后、数据支撑不足等问题,显著提升环水保管控智能化与精细化水平。

后续将进一步优化复杂地形与恶劣气象下算法鲁棒性,提升风险预测精度;深化多源数据挖掘,完善跨部门协同机制;推动技术在不同电压等级、不同地形与生态敏感区工程中应用,持续支撑电网建设绿色化、合规化、数字化发展。

参考文献:

- [1] 生态环境部.生态环境部关于进一步完善建设项目环境保护“三同时”及竣工环境保护自主验收监管工作机制的意见(环执法〔2021〕70号)[Z].2021.
- [2] 水利部办公厅.水利部办公厅关于加强铁路建设项目水土保持工作的通知(办水保〔2023〕3号)[Z].2023.
- [3] 国家电网有限公司.国家电网有限公司关于进一步加强电网建设运行环境保护和水土保持过程管控的意见(国家电网办〔2021〕407号)[Z].2021.
- [4] 李万智,李阳,谭荣荣,等.电网工程环水保空天地一体化应用研究[J].电力勘测设计,2020(增刊1):194-199.
- [5] 姚为方,华雪莹,李雷娟,等.“天地一体化”技术在输变电工程环水保监管核查中可靠性分析[J].矿产勘查,2021,12(09):1964-1970.
- [6] 王大鹏,李呈,吉奕康,等.铁路建设项目施工期环境保护与水土保持信息化技术研究[J].铁路节能环保与安全卫生,2024,14(02):11-17.