

基于北斗定位的电网施工智能围栏与生态红线监管研究

赵延文
国网山东省电力公司东营供电公司 山东省东营市 257091
DOI: 10.32629/ems.v8i8.21618

[摘 要] 针对电网施工中人员、机械越过作业边界以及施工活动临近生态保护红线时的安全与环保风险，提出一种基于北斗高精度定位、实体围栏坐标化建模和生态红线矢量叠加的协同监管方法。采用北斗 RTK 采集实体围栏立杆控制点坐标，将相邻控制点按现场连接关系生成电子边界；施工人员和机械定位终端在同一坐标系下上报位置，平台据此开展越界检测和分级告警。系统由终端感知层、网络通信层、平台决策层和预警执行层构成。东营市某 220 kV 输电线路工程的 30 天试验记录显示，RTK 固定解水平定位精度均值为±1.8 cm，围栏响应时间中位数为 780 ms；47 次告警中 45 次经人工及视频复核为真实越界事件，告警查准率为 95.7%。结果表明，该方法可为白天施工时段的作业边界管理和生态红线风险预警提供技术支持。

[关键词] 北斗定位；电子围栏；电网施工；生态红线；智能监管

1 引言

电网基础设施建设包括输电线路架设、变电站建设和电缆敷设等高风险作业。部分施工现场邻近自然保护区、水源涵养区或其他生态保护红线，人员误入危险区域、机械偏离限定路线，既可能危及施工安全，也可能扰动生态环境。传统管理主要依靠人工巡查和固定隔离设施，受现场范围、地形条件及作业点变化影响，难以及时掌握人员与机械的空间位置。随着电力建设项目的环境管理要求提高，有必要将现场实体边界、移动目标定位和生态保护红线图层纳入统一的空间监管体系。

北斗三号结合地基增强系统可开展 RTK 差分定位，为施

工现场厘米级位置获取提供技术条件^[1]。电子围栏通过坐标化边界实施非接触式空间管理，已用于车辆监管、矿山安全等场景^[2]。激光雷达、UWB 等局部定位手段能够构建高精度边界，但通常需要额外基础设施，跨区域迁移和动态调整成本较高^[3]。现有研究多将人员或车辆定位结果与预设 GIS 边界进行比较，对现场实体围栏如何形成可更新的坐标边界讨论不足。本文将实体围栏立杆作为边界控制点，采用北斗 RTK 采集其坐标并生成电子围栏，再与生态保护红线图层进行叠加；系统持续获取施工人员和机械的位置，在作业时段内完成越界判定、分级告警和事件追溯。

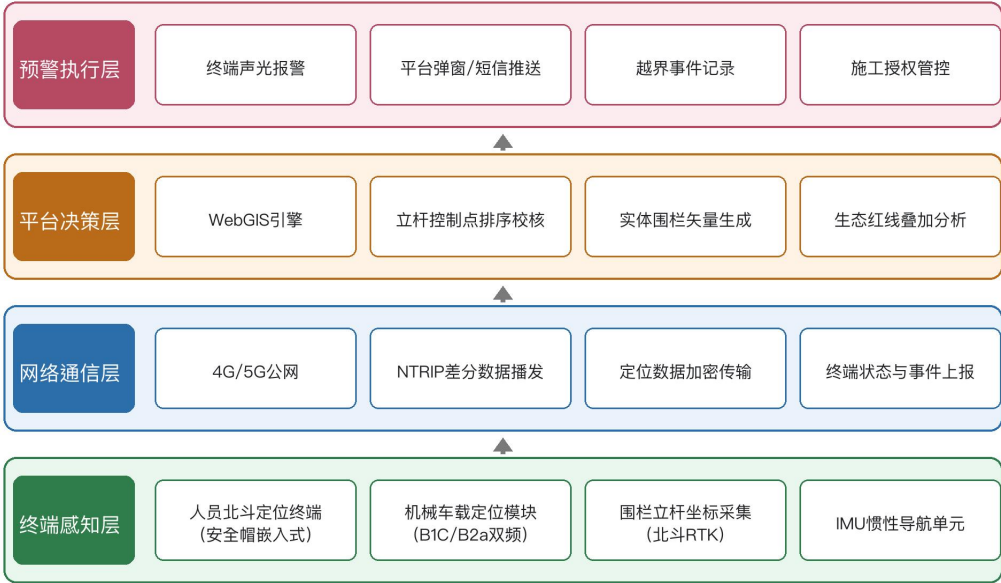


图 1 基于北斗定位的电网施工智能围栏监管系统架构

2 系统总体架构

系统采用“终端感知—网络通信—平台决策—预警执行”

四层功能架构。终端感知层包括人员安全帽定位终端、机械车载定位模块、围栏立杆坐标采集单元和 IMU 惯性导航单元。人员与机械终端采用北斗三号 B1C/B2a 双频定位，启用后以 1 Hz 频率形成经度、纬度、海拔、时间戳和设备编号等记录；围栏布设或调整后，采用北斗 RTK 采集立杆控制点坐标。网络通信层通过 4G/5G 公网传输定位和事件数据，并利用 NTRIP 协议播发差分改正信息。平台决策层在 WebGIS 中管理立杆控制点、电子围栏和生态保护红线图层，执行边界生成、空间关系判定和风险分级。预警执行层通过终端声光提示、平台弹窗、短信推送和施工授权管控形成闭环。

系统主要具有四项功能。第一，依据实体围栏立杆控制点自动生成施工边界；围栏调整后重新采集变动立杆的坐标，平台据此更新电子边界，也可导入经现场校核的 CAD 边界数据。第二，显示人员和设备实时位置并提供历史轨迹回放，为越界事件核查提供依据。第三，按照目标与边界的空间关系实施分级告警：目标进入预警缓冲区时发出黄色预警，越过施工边界 0~10 m 时发出橙色告警，越界超过 10 m 或进入禁入区时发出红色告警。第四，对生态保护红线敏感区内的预警和处置过程进行记录，形成包含时间、位置、持续时长和处置结果的事件日志。

3 关键技术

3.1 北斗 RTK 高精度定位

本系统使用了北斗三号 RTK 差分定位的方法，在施工现场设立基准站，利用 NTRIP 协议将差分改正信息传送给移动设备上，可以达到约 15 公里的距离。移动设备接收 B1C/B2a 两路信号，应用扩展卡尔曼滤波对载波相位观测值求得整周模糊度，在有固定解的情况下，水平方向上的精度小于等于 2 厘米，竖直方向上的精度小于等于 5 厘米^[1]。由于山地或者峡谷等地形造成的卫星信号丢失的情况发生时，移动设备内建有六轴惯性测量装置 (IMU)，即三个加速度传感器以及三个陀螺仪。当信号中断或者浮点解时，系统转到松耦合组合导航方式，用 IMU 递推计算出的位置增量与 GNSS 伪距进行融合，使得定位漂移速度在 0.5m/min 以下，可以满足短时遮挡（小于 30s）要求，在终端整机功耗小于 1.5W 情况下，带内置锂电池可以实现超过 12 小时工作的能力，满足一个班次的要求。

3.2 实体围栏坐标化建模与越界检测算法

现场实体围栏的立杆作为边界控制点。围栏布设或调整后，采用北斗 RTK 采集各立杆的 WGS-84 坐标，并按现场连接

顺序导入 WebGIS 平台；平台校核重复点和异常点后连接相邻控制点，形成与实体围栏一致的矢量多边形。北斗定位在此用于确定围栏控制点及移动目标的位置，并非以纯人工绘制的虚拟边界替代现场围栏。越界判断采用射线法：由待判定点向东作射线，射线与多边形边界交点数为奇数时，目标位于围栏内；交点数为偶数时，目标位于围栏外。对凹多边形和内部岛状区域分别进行边界方向与环结构识别。为降低边界附近定位波动造成的误告警，普通作业区设置 50 cm 判定缓冲带，并采用连续 3 帧确认；高风险区域将缓冲带缩小至 20 cm，同时采用连续 5 帧确认，在控制漏检风险的同时抑制瞬时坐标波动。

3.3 生态红线矢量叠加与协同管控

将自然资源主管部门发布的生态保护红线矢量数据以 GeoJSON 格式导入 WebGIS 平台，并与施工边界叠加显示。系统通过空间缓冲分析计算施工围栏边缘至生态保护红线的最短距离；距离小于 50 m 的作业区被标记为生态红线敏感区，并执行更严格的预警和授权管理。人员或机械进入预警缓冲区时，平台向项目负责人和环保管理人员推送告警，同时在现场终端发出语音提示。系统记录相关终端编号、进入与离开时间、进入缓冲区的最大距离以及停留时长，形成处置台账。发现未经授权的越界事件后，平台暂停相关施工授权，待现场负责人提交核查和处置记录后恢复。

表 1 系统主要技术指标

技术指标	设计值	实测值
水平定位精度 (RTK 固定解)	≤±5 cm	±1.8 cm
高程定位精度	≤±10 cm	±3.2 cm
定位更新频率	1 Hz	1 Hz
围栏响应时间	≤1 000 ms	780 ms
样本内误告警占比	≤2%	4.3%
通信时延 (4G 网络)	≤500 ms	320 ms

4 试验验证

选择山东省东营市某 220 kV 输电线路新建工程开展试验。线路长度 30 余 km，部分塔基作业区邻近省级生态保护红线。工程包括塔基开挖、立塔和放线等工序，高峰期现场有 30 名工作人员和 3 套机械设备。现场布置 1 座北斗基准站，配置人员定位终端 15 台、机械车载终端 3 台。实体围栏覆盖 2 个工作区，平台加载的项目周边生态保护红线图层面积约 0.85 万 m²，并设置 50 m 预警缓冲区。项目仅在白天核定作

业时段组织施工，人员和机械定位终端随作业工序启用。

30天试验期内，系统数据库形成定位记录约216万条。RTK固定解占比为92.7%，水平定位精度均值为 ± 1.8 cm，高程定位精度均值为 ± 3.2 cm；围栏响应时间中位数为780 ms，95%分位数为950 ms。系统共发出47次围栏越界告警，其中人员越界39次、机械越界8次。经人工核查和视频比对，45次被确认为真实越界事件，2次被认定为误告警。按误告警次数占全部告警次数计算，样本内误告警占比为4.3%，相应的告警查准率为95.7%。该结果未达到原定误告警占比不高于2%的设计目标，说明边界缓冲带和连续帧判定参数仍需结合现场定位波动进一步校准。

试验期间共记录3次生态保护红线预警缓冲区告警，均与施工车辆偏离预定路线有关。第一次为运输车辆进入预警缓冲区，系统在2 s内发出声光提示，驾驶员随即修正方向，车辆进入缓冲区1.2 m并停留8 s后返回规定路线；第二、第三次由挖掘机作业半径接近缓冲区边界触发，现场人员收到平台提示后调整机械位置，均未进入生态保护红线。30天试验期内未记录人员或机械进入生态保护红线的事件，也未记录由越界引起的安全事故或生态破坏。由于试验未设置同期对照工程，现有结果只能说明系统完成了现场预警和处置记录，不能单独据此量化事故率或生态风险降幅。

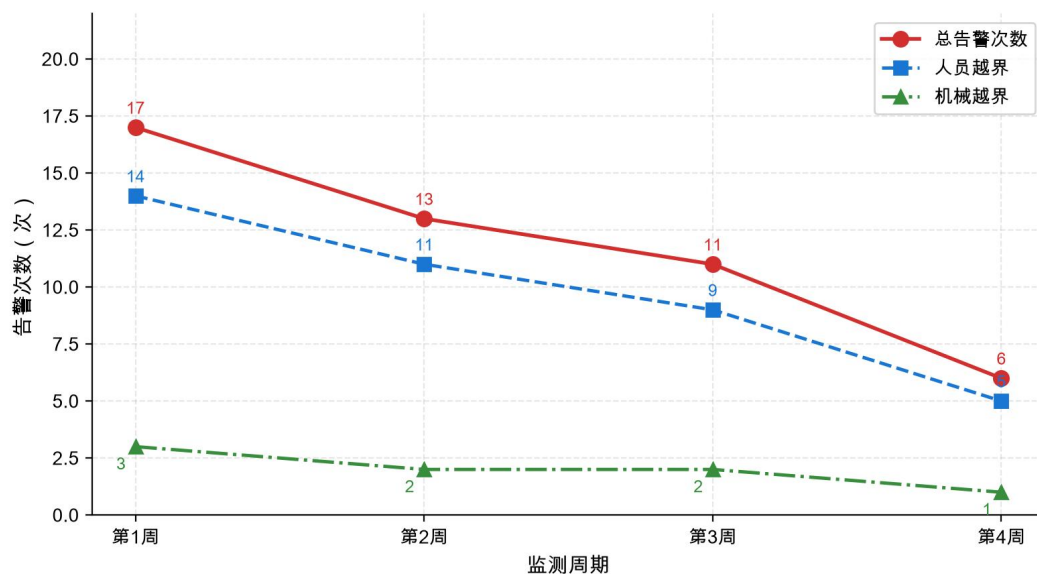


图2 试验期间围栏越界告警次数统计

5 结论

本文构建了基于北斗高精度定位、实体围栏坐标化建模和生态保护红线图层叠加的电网施工监管方法。采用北斗RTK采集围栏立杆控制点坐标，可使平台电子边界与现场实体围栏保持对应；人员和机械终端在同一坐标系下上报位置，支持作业时段内的越界判定、分级告警和事件追溯。东营市某220 kV输电线路工程试验中，系统水平定位精度均值为 ± 1.8 cm，围栏响应时间中位数为780 ms；47次告警中45次经复核为真实越界事件，告警查准率为95.7%。试验期间未记录人员或机械进入生态保护红线的事件。样本内误告警占比为4.3%，高于2%的设计目标，后续应根据不同作业区的定位波动、围栏形态和机械作业半径优化缓冲带与连续帧参数，并进一步评估复杂遮挡条件下的边界稳定性。

[参考文献]

- [1] 邝石, 靳巍, 贺云鹏. 基于北斗卫星导航系统的输电线路导线弧垂差分定位研究[J]. 电力与能源, 2026, 47(3): 252-258.
- [2] 张俊明, 曲昊文, 尚建璋, 等. 基于北斗高精度定位的运煤车辆监控系统研究[J]. 能源科技, 2026, 24(3): 1-5.
- [3] 郭金政, 朱军, 李奕贤. 基于激光雷达的电子围栏设计与研究[J]. 电气技术, 2026, 27(6): 10-16.
- [4] 周佳卉. 基于作业风险评估与分级预警的电力安全督查技术分析[J]. 电气技术与经济, 2026, (6): 337-339+347.
- [5] 徐佳明. 物联网感知技术在铁路通信施工现场设备管理中的应用研究[J]. 信息与电脑, 2026, 38(12): 168-170.