

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.153

引用格式: 刘明,陈雄乐,郭金根,等. 基于时序 InSAR 技术的输电设备地基稳定性监测[J]. 中国地质调查, 2025, 12(3): 108–113. (Liu M, Chen X L, Guo J G, et al. Foundation stability monitoring of transmission equipment based on time series InSAR technology[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(3): 108–113.)

基于时序 InSAR 技术的输电设备地基稳定性监测

刘明¹, 陈雄乐^{2*}, 郭金根¹, 朱文卫¹, 董晗拓¹

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东 广州 510000; 2. 广东工业大学 广东 广州 510000)

摘要: 变电站和输电杆塔是重要的输电设备,其地基或所在斜坡产生的变形可能会导致严重的后果,研究应用小基线子集干涉合成孔径雷达 (small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR) 技术对红河哈尼族彝族自治州蒙自县内变电站与杆塔所在区域进行了时序动态监测,以精确探测变电站及附近区域的地表形变动态。研究发现,变电站地表变形呈现南升北降的趋势,西北部下沉尤为严重,验证了先前设施异常报告。需特别指出, N170 与 N168 节点自 2022 年 8 月起,抬升速率出现突变, N170 南部采样点抬升量突出,凸显地表沉降不均匀性。据此,建议尽快加强变电站维护,特别是南部和西北部地基加固,以防结构失稳和停电风险,并需细致探究附近杆塔南部特殊沉降。研究不仅为该变电站提供了科学运维依据,还为同类电力设施地质稳定监控、风险预警策略及预维护规划树立了模型,有效提升了电力系统的安全韧性与灾害防御能力。

关键词: 变电站; 杆塔; SBAS-InSAR; 形变; Sentinel-1 SAR

中图分类号: P681.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2025)03-0108-06

0 引言

随着电力行业的不断发展和电力需求的增加,输电设备的安全稳定性监测变得愈发重要^[1-2]。输电设备承担着输送电能的重要任务,其安全稳定性的保障关乎电网运行的可靠性和安全性。然而,传统的监测方法存在一定局限性,导致对输电设备安全状况的评估与管理存在困难^[3-4]。干涉合成孔径雷达 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 技术作为一种先进的地表监测技术,通过对合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 数据的分析,能够实现地表形变的高精度监测^[5-6]。基于时序 InSAR 技术的输电设备安全稳定性监测具有不受天气、时间等限制、具备较高的时空分辨率和监测范围广等优势^[7-8]。通过连续性监测输电设备及其周边环境的形变情况,可以及时识别潜在风险并采取相应的管控和维护措施,以确保输电设备系统的安全稳定运行^[9]。本研究旨在利用时序 InSAR 技术

对输电设备的安全稳定性进行监测与分析,结合地理信息数据、电网运行数据等多源信息,全面评估输电设备系统的稳定性。通过对输电设备形变特征的识别与分析,旨在为电力行业提供有效的监测手段和决策支持,促进电网系统的安全稳定运营,确保电力供应的可靠性和持续性。

1 数据与方法

1.1 研究区域与数据

研究区位于云南省红河哈尼族彝族自治州蒙自县内,变电站及杆塔位于耕地周边(图1)。蒙自市位于云南省东南部红河哈尼族彝族自治州的心脏地带,其地质与地貌特色鲜明,地形多山区,变电站位于平坦处。该地区嵌于云贵高原南缘的横断山脉南段,北回归线穿越而过,具有亚热带季风气候特征。地貌由山地、丘陵及坝区组成,其中坝区约占总面积的 24.4%,成为人口集中与农业繁荣的核心。地质上,这里经历了复杂的构造运动,造就

收稿日期: 2024-03-04; 修订日期: 2025-01-05。

第一作者简介: 刘明(1982—),男,高级工程师,主要从事变形监测、地质灾害预警等地理信息测绘方面的工作。Email: 531950053@qq.com。

通信作者简介: 陈雄乐(1994—),男,工程师,主要从事 InSAR 技术开发方面的工作。Email: 769192396@qq.com。

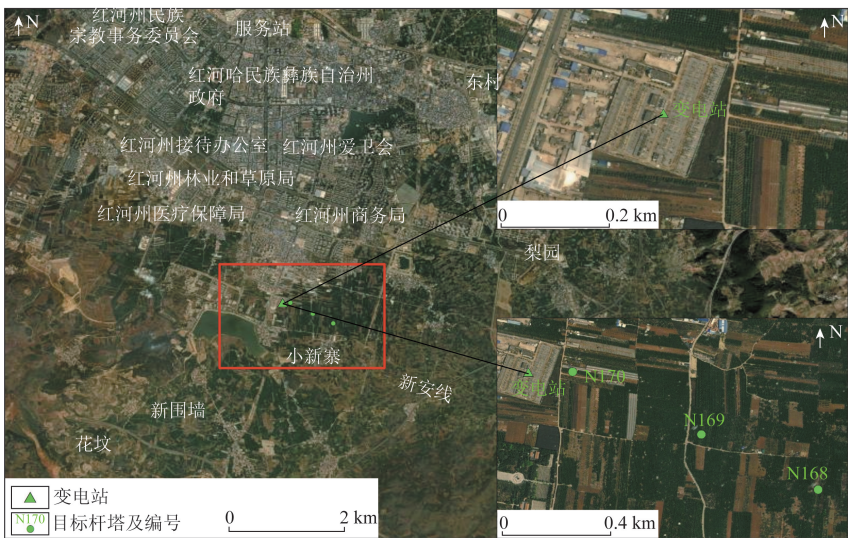


图1 变电站及周边卫星地貌图

Fig.1 Satellite geomorphological map of substation and the surroundings

了地震多发的背景,土壤类型与植被覆盖具有多样性。欧洲航天局对地卫星系列中 C 波段哨兵 1 号的距离向分辨率为 5 m、方位向分辨率为 20 m,符合我们研究的精度要求^[10-11]。而且 12 d 的卫星重访周期使得在满足监测精度的情况下获得更多的数据时间段,所以本研究使用的时间跨度为 2018 年 1 月至 2022 年 10 月。对 61 景干涉宽幅模式的 Sentinel-1 SAR 影像数据进行 SBAS-InSAR 数据处理。

1.2 数据处理技术

小基线子集干涉合成孔径雷达(small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR)技术的发展初衷是为了克服差分干涉合成孔径雷达(differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)技术在时间和空间方面存在的失相干问题。通过利用现有的 SAR 数据集,设定一定的时间空间基线阈值,筛选出多个小基线数据集,然后利用最小二乘法计算数据集内的形变速率。接着,利用奇异值分解法处理较长基线之间的变形信息,从而得到时间序列的形变量^[12-13]。这项技术有效地解决了由长基线引起的失相干问题,提高了形变数据的准确性和监测时间空间分辨率^[14]。

在这项研究中,本研究选择 61 景 Sentinel-1 SAR 影像,并设定时间间隔为 150 d 作为时间基线阈值。由于目标杆塔周围 75% 的区域被植被覆盖,导致相干性普遍较低,将相干性阈值设定为 0.35,

并对相干性低于 0.25 的干涉点进行了掩膜处理,以提高结果覆盖率。在干涉处理完成后,根据解缠图和相位图,识别并剔除质量较差的干涉图,以避免失相干和大气延迟误差较大的干涉图对后续处理造成重大影响。

2 成果分析

2.1 研究区形变结果

通过 SBAS-InSAR 技术反演获取了目标边坡区域的形变速度场,并利用自然间断点分级法将地面沉降速率值分级设色图例,绘制年平均形变速率(图 2)及其分布直方图(图 3)。

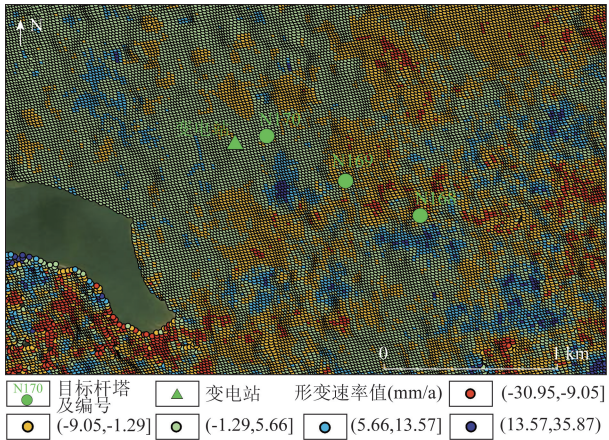


图2 2018 年 1 月至 2022 年 10 月年均形变速率
Fig.2 Average annual rate of deformation from January 2018 to October 2022

图 2 可知,该边坡区域在 2018 年 1 月至 2022

年 10 月期间,年均形变速率范围为 (- 30.95, 35.87) mm/a,从图中可以看出研究区明显存在多个尺寸大小不同、沉降快慢不一的沉降区域。尤其在 N168 及 N169 杆塔点处,其形变沉降现象比变电站还要严重。经过统计,研究区内 90% 以上的点形变速率在 ± 10 mm/a 之内(图 3)。

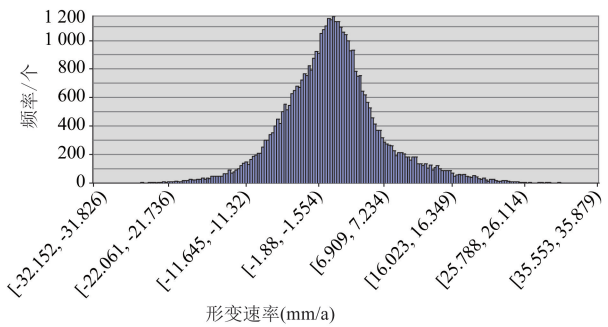


图 3 2018 年 1 月至 2022 年 10 月形变速率分布直方图
Fig. 3 Deformation rate distribution histogram from January 2018 to October 2022

2.2 N170 及周边采样点形变规律分析

N170 位置如图 4 所示,在 N170 附近选取 4 个采样点 P1—P4,对采样点和杆塔点进行时序分析,得到其时序形变规律如图 5 所示。



图 4 N170 及周边采样点位置

Fig. 4 Location of N170 and its surrounding sampling points

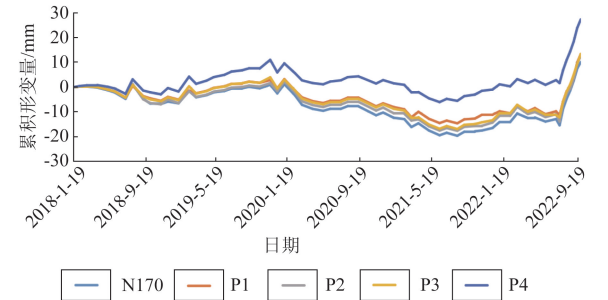


图 5 N170 及周边采样点时序形变图

Fig. 5 Temporal deformation of N170 and its surrounding sampling points

图 5 显示,N170 及周边采样点在形变趋势上呈现高度一致性,2019 年 1 月—2020 年 1 月,整体趋势均为抬升。在后续的 1 a 时间里,均表现为缓慢沉降,在 2021 年 7 月之后趋于稳定,但在 2022 年 8 月抬升速率发生突变,目标区域急速抬升。

从上述形变规律可以看出:在 2022 年 8 月前,目标点的抬升、下沉速率较低,且在任意 1 a 时间内累积抬升、下沉量均不超过 30 mm;而 2022 年 8—9 月的两个月时间内,目标点共抬升 25 mm。相比较 2022 年 8 月前目标点的形变规律,本次分析认为该点开始出现不稳定的抬升现象,且根据最终监测结果显示,N170 仍然会保持抬升趋势。另外,杆塔周边的 P1—P4 仅有位于南边的 P4 抬升量较其他采样点高 10 mm,因此判断 N170 存在逐渐向北偏移的水平位移趋势。

2.3 N169 及周边采样点形变规律分析

N169 位置如图 6 所示,同样在 N169 附近选取最近的 4 个矢量点作为采样点,对此区域进行小范围时序研究分析。目标杆塔和相邻采样点的时序形变规律如图 7 所示。

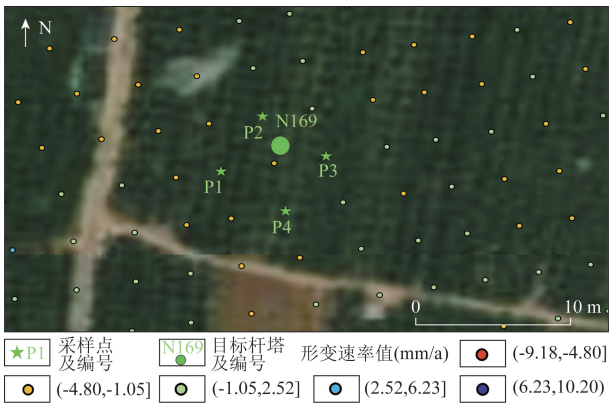


图 6 N169 及周边采样点位置

Fig. 6 Location of N169 and its surrounding sampling points

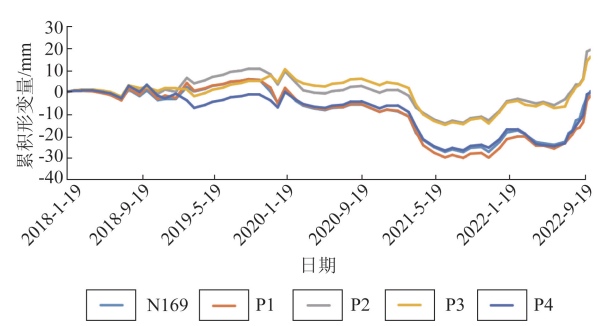


图 7 N169 及周边采样点时序形变图

Fig. 7 Temporal deformation of N169 and surrounding sampling points

图 7 显示,N169 和采样点在 2018 年 1 月—2021 年 1 月间整体形变趋于平稳,累积形变量较小,均未超过 $\pm 10\text{ mm}$ 。而 2021 年 1 月急速下沉,在 2022 年 8 月又呈现急速抬升,考虑是由于此地人为活动原因造成的突变,累积形变量在 2021 年 4—10 月期间稳定在 $-30\sim 27\text{ mm}$ 。

从上述形变规律可以看出:在 2021 年 1 月前,目标点较为平稳;2021 年 1 月—2022 年 6 月,目标点出现较之前更为明显的形变规律的波动,目标杆塔已经出现不稳定变化;2022 年 6 月之后,该点开始出现抬升速率的骤变,在自 2022 年 6—9 月的时间内,目标杆塔和采样点共计抬升 25 mm。因此,本次分析判断目标杆塔开始出现异常抬升现象,且据截止日期监测趋势所示,目标杆塔仍然会保持加速抬升状态。此外,P2 和 P3 的累积抬升量比另外两个采样点的累积抬升量大 20 mm,因此根据 N169 周边采样点 P1—P4 的时序分析结果推断,目标杆塔有向西南方向偏移的趋势。

2.4 N168 及周边采样点形变规律分析

N168 形变速率及位置如图 8 所示,同时,本次分析在 N168 的四个不同方向分别选取 P1—P4 共计 4 个采样点,相邻采样点间距离 20 m,目标通过对 N168 和 P1—P4 的时序形变分析得出杆塔在垂直方向上的时序形变规律和在水平方向上的偏移规律。N168 及 P1—P4 的形变规律如图 9 所示。

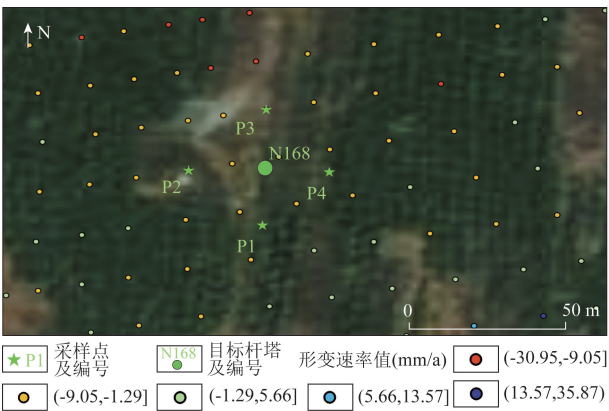


图 8 N168 及周边采样点为位置

Fig. 8 Location of N168 and its surrounding sampling points

图 9 显示,2018 年 1 月—2020 年 1 月,各点均较为稳定,2021 年 1 月—2022 年 8 月,各点都保持下沉趋势,但累积下沉量有所差异,其中以 P3 沉降量为最大,达到 -73 mm 。2022 年 8—9 月,各点都开始出现不同程度的抬升,并一直维持抬升趋势。

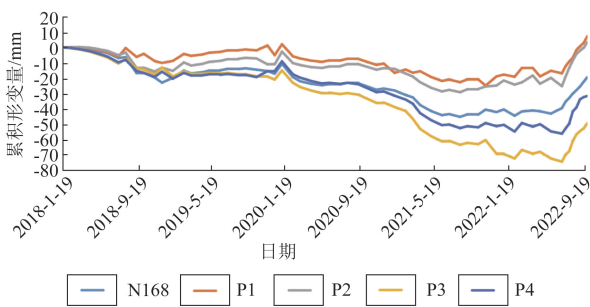


图 9 N168 及周边采样点时序形变图

Fig. 9 Temporal deformation of N168 and surrounding sampling points

从上述形变规律可以看出:2021 年 1 月前,采样点和目标杆塔较为平稳;2021 年 1 月—2022 年 6 月,目标点出现较之前更为明显的形变规律的波动,P1—P4 已经开始陆续出现不稳定的形变波动,而 N168 则维持在稳定状态中;自 2022 年 6 月起,采样点和目标杆塔都开始转变为抬升趋势,并且从图 10 中可以看出,除 P4 外,采样点和目标杆塔在 2022 年 8 月后均没有抬升速率放缓的迹象。因此判断 N168、P1—P4 在监测时间结束后仍然会保持抬升状态。

2.5 相邻变电站采样点时序形变分析

为研究变电站整体形变特征,我们在变电站四周拐角处选取采样点 P1—P6,采样点分布如图 10 所示,采样点位于变电站内,各点间距离最大为 175 m。本次分析通过对目标点时序形变规律分析模拟变电站的整体形变趋势。对采样点进行时序分析,形变趋势如图 11 所示。

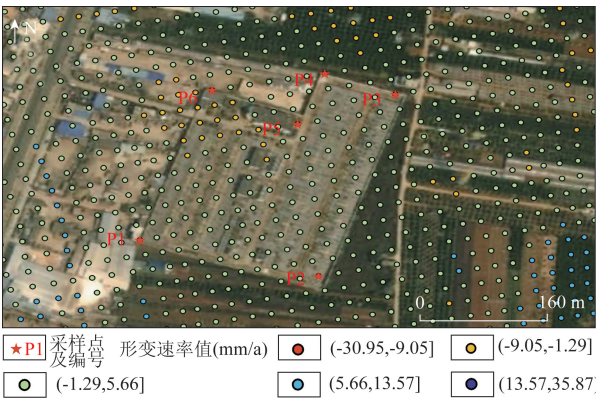


图 10 变电站采样点位置

Fig. 10 Location of sampling points in substation

从图 11 中可以看出:采样点 P1—P6 的累积形变量分别为 $+3\text{ mm}$ 、 -3 mm 、 $+9\text{ mm}$ 、 $+4\text{ mm}$ 、 -6 mm 、 -20 mm ,各目标点间的形变趋势高度一

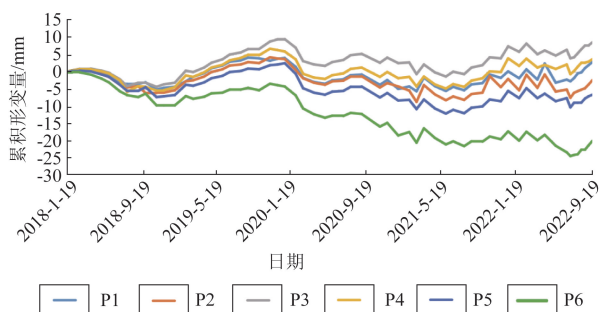


图 11 变电站采样点时序形变图

Fig. 11 Temporal deformation diagram of substation sampling points

致,唯有 P6 采样点呈现较大的沉降。2018 年 1 月—2022 年 9 月,P1—P5 形变均在小范围内波动,最大形变量保持在 ± 10 mm 之内,而 P6 在 2018 年 9 月即在沉降量上表现出差别性,这可能是由于此处的地质原因造成的。

通过上述规律分析认为:①变电站地表变形呈现南升北降的趋势,变电站内部目标点存在时序形变差异,其中,西北部下沉尤为严重,位于西北侧的 P6 采样点与其他点之间差距较大,因此判断变电站存在逐渐向西北方向下沉的趋势;②与 N168、N169、N170 及其周边共 12 个采样点的时序形变规律相比较,2022 年 6 月以来,变电站形变规律较为平稳,因此出现了变电站和目标杆塔在形变速率上的差异,这也使得目标杆塔与变电站之间存在相对抬升变化,并且认为两个目标杆塔与变电站间仍然存在相对抬升的趋势。

3 结论及建议

(1)研究通过 SBAS-InSAR 技术,揭示了红河哈尼族彝族自治州某变电站存在的复杂地表形变特征,包括南部抬升与北部下沉的显著趋势,以及 N170、N168 等关键节点的抬升速率突变现象。特别指出,变电站整体呈现向西北方向的下沉趋势,杆塔南部区域的抬升量明显大于其他方向,这些发现揭示了变电站地基稳定性方面的规律与潜在风险。

(2)研究成果解决了运维中对变电站地基稳定性监测的迫切需求,为识别潜在安全隐患、及时采取预防性维修措施提供了科学依据。提出 N170、N168、N169 等地的差异化加固建议,有助于针对性地强化地基稳固,降低因地基不均匀沉降导致的结构失稳与供电中断风险,从而保障电力设施安全运行。

(3)尽管本研究成功揭示了变电站的局部地表形变规律,但在以下几个方面仍有待进一步探索和完善:一是对地表形变原因的深入探究,如地质构造活动、地下水动态等因素的影响分析;二是优化监测频率与精度,以便更及时捕捉突发性形变事件;三是结合现场勘查与其他监测手段,构建多元信息融合的综合风险评估模型。未来研究应继续聚焦于提升电力设施地质稳定性监测的精细化程度,开发智能化预警系统,以及完善基于监测数据的预防性维护策略,为我国乃至全球范围内的电力基础设施安全保障提供更为有力的科技支撑。

参考文献 (References):

- [1] 李瑞峰,常乐,秦海. InSAR 技术在超高层建筑变形监测的应用研究[J]. 工程质量,2021,39(4):70-73.
Li R F, Chang L, Qin H. Application of InSAR technology in deformation monitoring of super high rise buildings[J]. Construction Quality, 2021, 39(4): 70-73.
- [2] 陈翔,刘庆元. 赛格广场大厦工程变形监测与分析[J]. 工程建设,2006,38(1):41-45.
Chen X, Liu Q Y. Deformation monitoring and analysis of Saige square building project [J]. Engineering Construction, 2006, 38(1): 41-45.
- [3] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1717-1733.
Zhu J J, Li Z W, Hu J. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733.
- [4] 唐尧,王立娟,廖军,等. 基于 InSAR 技术的川西高山峡谷区地质灾害早期识别研究——以小金川河流域为例[J]. 中国地质调查,2022,9(2):119-128.
Tang Y, Wang L J, Liao J, et al. Research on early identification of geological hazards in high mountain and valley areas of western Sichuan province based on InSAR technology: A case study of Xiaojinchuan River Basin [J]. Geological Survey of China, 2022, 9(2): 119-128.
- [5] 刘斌,葛大庆,李曼,等. 地基 InSAR 技术及其典型边坡监测应用[J]. 中国地质调查,2018,5(1):73-81.
Liu B, Ge D Q, Li M, et al. Ground-based interferometric synthetic aperture radar and its application in monitoring typical slopes[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(1): 73-81.
- [6] 刘国祥,丁晓利,陈永奇,等. 极具潜力的空间对地观测新技术——合成孔径雷达干涉[J]. 地球科学进展,2000,15(6):734-740.
Liu G X, Ding X L, Chen Y Q, et al. New and potential technology for observation of earth from space: Synthetic aperture radar interferometry[J]. Advances in Earth Science, 2000, 15(6): 734-740.

- [7] 吴一戎,朱敏慧.合成孔径雷达技术的发展现状与趋势[J].遥感技术与应用,2000,15(2):121-123.
Wu Y R,Zhu M H. The developing status and trends of synthetic aperture radar[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2000,15(2):121-123.
- [8] 何敏,何秀凤.利用D-InSAR技术监测盐城地区地表形变[J].测绘通报,2010(11):1-3.
He M,He X F. Monitoring ground deformation of yancheng using D-InSAR[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2010(11):1-3.
- [9] 周志伟,鄢子平,刘苏,等.永久散射体与短基线雷达干涉测量在城市地表形变中的应用[J].武汉大学学报:信息科学版,2011,36(8):928-931.
Zhou Z W,Yan Z P,Liu S,et al. Persistent scatterers and small baseline SAR interferometry for city subsidence mapping: a case study in Panjin, China[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2011,36(8):928-931.
- [10] 杨魁,杨建兵,江冰茹. Sentinel-1 卫星综述[J]. 城市勘测, 2015(2):24-27.
Yang K,Yang J B,Jiang B R. Sentinel-1 satellite overview[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2015(2):24-27.
- [11] 张艳梅,王萍,罗想,等.利用 Sentinel-1 数据和 SBAS-InSAR 技术监测西安地表沉降[J]. 测绘通报,2017(4):93-97.
Zhang Y M,Wang P,Luo X,et al. Monitoring Xi'an land subsidence using sentinel-1 images and SBAS-InSAR technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2017(4):93-97.
- [12] 李国华,薛继群.基于短基线集技术的矿区开采沉降监测研究[J]. 测绘与空间地理信息,2013,36(3):191-193,196.
Li G H,Xue J Q. Monitoring the surface subsidence of mining areas based on SBAS method[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013,36(3):191-193,196.
- [13] 张金盈,崔靓,刘增琨,等.利用 Sentinel-1 SAR 数据及 SBAS 技术的大区域地表形变监测[J]. 测绘通报,2020(7):125-129.
Zhang J Y,Cui L,Liu Z M,et al. Large-area surface deformation monitoring using sentinel-1 SAR data and SBAS technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2020(7):125-129.
- [14] 高海英,赵争,章彭.时序 InSAR 的贵州地质灾害监测[J]. 测绘科学,2020,45(7):91-99.
Gao H Y,Zhao Z,Zhang P. Geological hazards in Guizhou by using time series SAR interferometry[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020,45(7):91-99.

Foundation stability monitoring of transmission equipment based on time series InSAR technology

LIU Ming¹, CHEN Xiong², GUO Jing¹, ZHU Wenwei¹, DONG Hantuo¹

(1. Guangdong Power Grid Limited Liability Company Grid Planning Research Center, Guangzhou Guangdong, 510000, China;

2. Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510000, China)

Abstract: Substations and transmission towers are important transmission equipment, and the possible deformation of their foundations or slopes may lead to serious consequences. The time series dynamic monitoring of Mengzi substations and towers in Honghe Hani of Yi Autonomous Prefecture was studied with the method of Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR) to accurately detect the surface deformation dynamics of substations and nearby areas. The study found that the substation surface deformation showed a trend of rising in the south and falling in the north, and the subsidence in the northwest was particularly serious, which verified the previous report of facility anomalies. In particular, the uplift rate of N170 and N168 nodes has changed abruptly since August 2022. The uplift of the sampling point in the south of N170 is prominent, highlighting the unevenness of surface subsidence. Accordingly, it is recommended to strengthen the maintenance of the substation as soon as possible, especially the foundation reinforcement in the south and northwest. So structural instability and power outage risks were prevented, and the special settlement in the south of the nearby towers need to be carefully explored. This study could not only provide scientific basis for the operation and maintenance of the substation, but also establish a model for the geological stability monitoring, risk early warning strategy and pre-maintenance planning of similar power facilities, which could effectively improve the safety resilience and disaster prevention ability of the power system.

Keywords: substation; tower; SBAS-InSAR; deformation; Sentinel-1SAR

(责任编辑: 刘丹)