

输电线路通道地质灾害体影像特征分析及隐患识别

谭建伟,程铁洪,游晋卿,万 伟

(中国电建集团江西省电力设计院有限公司,江西 南昌 330096)

摘 要:地质灾害体发生点和隐患点的排查是保障输电线路工程安全、稳定、经济运行的重要环节之一。针对无人机禁飞区以及航摄困难地区存在的影像数据采集受限和监测难度大等问题,文中采用 Landsat-9 高分辨率光学遥感影像,分析滑坡、崩塌和泥石流等灾害体影像特征并建立解译标志,识别出已建或拟建输电线路通道的已发生灾害体,结合数字高程模型(digital elevation model,DEM)数字地形计算坡度、坡向辅助判断灾害隐患点。实验结果表明,文中所述工程利用该技术,识别4处杆塔处于滑坡和泥石流隐患区,从而有效弥补了部分区域无人机无法作业的缺陷,减少了人力现场踏勘劳动强度,为地质灾害体的识别和隐患排查提供了重要的数据支持。

关键词:地质灾害体;输电线路;高分辨率光学遥感影像;数字地形

中图分类号:TM 75 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)05-0026-04

0 引言

电力行业是国家经济建设和发展的重要支柱产业之一^[1]。我国是世界上地质灾害较为严重的国家之一。根据第一次全国自然灾害综合风险普查的调查数据显示,截至2023年12月底,全国共登记在册滑坡隐患点达13.2万余处、崩塌隐患点达8.2万余处、泥石流隐患点达3.3万余处。近年来,地质灾害频发,不仅威胁到人民群众的经济财产安全,也给电力工程建设和安全生产带来了严峻考验。当前,我国输电线路地质灾害防治形势主要表现在以下几方面:1)防治难度大,输电线路传输距离长,沿途地质条件复杂,灾害种类多、分布广、诱发因素多,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害时有发生,仅采用人力对整个线路的地质进行踏勘,耗时费力;2)防治要求高,属于线性串联工程,任何一个塔位的故障都会直接影响到整条线路的安全稳定运行;3)治理成本高,山区施工运输条件恶劣,缺少监测数据,难以准确掌握地质灾害风险状态,事后治理代价大^[2]。

文中利用 LandSat-9 高分辨率卫星影像,结合地质基础资料,对滑坡、崩塌、泥石流等主要自然灾害体进行影像特征分析并建立解译标志,通过计算植被、

水体指数,同时基于数字高程模型(digital elevation model,DEM)数据的坡度和坡向分析,对拟建或已建输电线路通道及周边环境的地质灾害情况进行解译分析。该方法适用于无人机禁飞区或航摄困难地区的线路通道灾害体识别工作,包括已发生灾害体的快速调查和潜在灾害体的早期识别,有效节省外业人员现场踏勘巡视的劳动强度,为输电线路通道地质灾害防灾减灾工作提供数据支撑。

1 研究方法

1.1 灾害体影像特征及解译标志

现阶段,遥感解译主要有目视解译、人机交互解译和智能解译三种方法^[2-4]。考虑到目视解译效率较低,而智能解译需要的样本数据较多且尚未成熟,文中的解译工作采用人机交互解译方法,识别地质灾害区域。输电线路工程沿线涉及的灾害体主要包括滑坡、泥石流、崩塌以及不稳定斜坡等,主要通过计算机对遥感影像进行彩色渲染和数字图像增强等技术手段调整,高效提取图像信息,快速识别灾害发生区或隐患区域。具体判别方式如下:

1) 识别滑坡影像特征及解译标志。文中对滑坡

收稿日期:2024-10-21

作者简介:谭建伟(1994),男,硕士,工程师,研究方向为多源遥感数据处理与应用。

的解译主要通过识别高分辨率影像中滑坡的形态、色调、纹理以及与周围地物的差异进行。在遥感图像上,典型的滑坡具有明显的地貌特征,一般呈现为簸箕形、马蹄形、舌形或不规则形状等平面形态^[5],主要以不规则形状的地貌形状出现。如图1所示,在真彩色遥感影像上,滑坡体的色调与周围地物,特别是植被的色调差别明显。通常情况下,滑坡体呈现深色调,滑坡壁在图像上则表现为浅色调。由于斜坡地形破碎、地表起伏不平,各部位地物的反射光谱能力不同,在影像上活动滑坡的纹理表现比较粗,纹理较为明显,而岩石因裸露在外,纹理较为明显,其表面在影像上平滑细腻。



图1 滑坡影像特征

2) 识别崩塌影像特征及解译标志。崩塌地质灾害多分布在沟谷、河流、铁路、公路等陡峭边坡地段,一般在 $55^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 的陡坡前易发生崩塌。在遥感影像上,阳坡为浅色调区块、阴坡呈浓重的阴影区带,在崩塌危岩体上部外围,有时可见到张节理形成的裂缝影像,这些裂缝通常是由于岩石受到重力作用而产生的,是崩塌前的先兆之一^[6]。由于崩塌规模较小,形态特征不明显,在遥感解译中应用较少。

3) 识别泥石流影像特征及解译标志。泥石流的三大区分别为形成区、流通区和堆积区。如图2所示,泥石流的形成区岩石破碎、物源丰富,在遥感图像上冲沟发育,植被不发育,形成区影像颜色表现为亮白色;流通区往往有陡坡地,形成新鲜的碎屑流,细沟和坡面侵蚀严重,流通区影像颜色较周围地物相比呈现深色特征;堆积区为沟谷下游出口,地形突变为平缓、呈扇形,有较强的浮雕凸起感,整体色调、纹理与周围植被或基岩处差异明显,堆积区的形态在遥感图像上轮廓比较清晰,容易辨别,是识别泥石流的重要标志,同时也是评估灾害程度的重要指标^[7]。

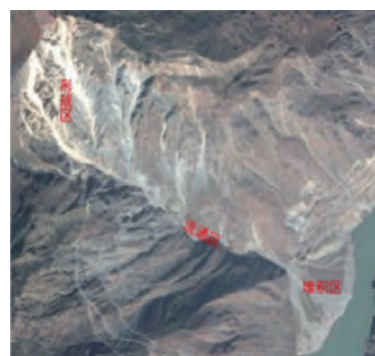


图2 泥石流影像特征

1.2 植被、水体指数计算与集成

归一化差分植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)能够反映植物冠层的背景影响,通过计算近红外波段和红光波段的反射率差异,是分析植物生长状态和空间分布密度的最常用的植被指数,常用该指数来反映植被的生长规律^[8]。当NDVI值为正时,NDVI值越大,植被覆盖度越大。该指数计算方法如式(1)所示:

$$NDVI = \frac{B_{NIR} - B_{Red}}{B_{NIR} + B_{Red}} \quad (1)$$

式中: B_{NIR} 和 B_{Red} 分别是遥感数据近红外波段和红光波段的地表反射率。

归一化差分水体指数(normalized difference water index, NDWI)用遥感影像的特定波段,进行归一化差值处理,通过绿光波段和近红外波段的反射率计算,以凸显影像中的水体信息^[9]。滑坡的发生常和水的作有密切的关系,为此,文中通过水体指数提取区域内水域范围加以解译。该指数计算方法如式(2)所示:

$$NDWI = \frac{B_{Green} - B_{NIR}}{B_{Green} + B_{NIR}} \quad (2)$$

式中: B_{Green} 和 B_{NIR} 分别是遥感数据绿光波段和近红外波段的地表反射率。

1.3 数字地形分析

DEM数据的应用包括计算坡度、坡向、等高线提取、可视性分析、地形剖面和水文分析等^[10]。数字地形辅助分析主要以DEM数据为载体,通过提取输电线路的高程和等高线特征、计算分析输电线路塔位选点的坡度和坡向等信息,辅助解译已发生或具有大型滑坡和泥石流等地质灾害风险区域,并以此判断现场地形条件是否会增大后续现场施工作业难度。因现阶段DEM精度和空间分辨率有限,故该方法更适用

于宏观、小比例尺、大尺度的分析。

文中主要以研究区域内的输电线路塔位的高程信息、坡度、坡向作为辅助信息。需计算的区域坡度是指过地面任意一点的切平面与水平面之间的夹角，用来计算任一像元与邻域像元间变化的最大比率^[11]。坡度计算公式如式(3)所示：

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\Delta h}{\Delta s} \right)$$

(3)

式中： α 是坡度； Δh 和 Δs 分别是两点的高程差与其水平距离。

坡向是地形坡面的法线在水平面上的投影与正北方向的夹角值^[11]。基于DEM数据来确定每个像元位置处表面的下坡坡度所面对的方向，栅格中像元的值可指示出其位置处表面所朝向的罗盘方向，从正北方向开始，按照顺时针方向进行测量，角度范围介于0~360°完整圆形之间，法线铅锤的平坦区域将赋值为-1。

2 试验结果与分析

2.1 研究区域概况与数据

文中以某500 kV输电线路拟建工程为研究对象，研究区域地势较为平坦，以平地 and 丘陵为主，地形、地貌较为丰富，包含高山、丘陵、平地、河流、村落、高速公路和铁路等，具有一定的代表性。研究区域地理位置如图3所示。



图3 研究区域

文中采用Landsat 9卫星遥感数据、DEM数字高程模型数据两种遥感数据集，综合运用土地利用类型数据、坡向和坡度等基本地理要素资料，对输电线路通过的地质灾害情况进行分析评估。遥感解译属于定性遥感分析，其对色调、纹理上的要求较高，几何精度次之。文中将获取的原始数据均进行几何校正、大气校正、去云处理以及影像裁剪等预处理工作，从而更好地进行解译工作。获取的数据产品信息如表1所示。

表1 研究数据信息

数据产品	传感器	分辨率/m	应用领域
Landsat-9	二代陆地成像仪(OLI-2)	30	地表观测、环境监测、城市规划 and 气候研究等领域
ALOS DEM	相控阵型L波段合成孔径雷达(PALSAR)	12.5	地形分析、灾害风险评估和地形变化监测等领域

2.2 输电线路遥感解译结果与分析

真彩色显示下的影像数据最适应人眼视觉，Landsat 9真彩色合成的波段组合为4(R)3(G)2(B)，融合后的高分辨率真彩色影像如图4(a)所示，在真彩色影像中，山体、河流和城镇等地物地貌清晰可见。文中以影像数据为底图，采用人工目视解译，结合计算机相辅助方法，完成输电线路通道内的地质灾害体光学遥感解译识别。经检查，该工程的全线通道内已发生的地质灾害区域为0处，并合理避让了村庄、铁路和矿区等敏感地带，减少房屋拆迁次数，节约项目投资。

如图4(b)所示，标准假彩色显示比真彩色更便于识别地物类型、范围大小等。假彩色波段组合为5(R)4(G)3(B)，绿色植物在绿波段具有高反射率，在近红外波段具有最高的反射率；同时，在标准假彩色合成中，绿波段赋蓝，红波段赋绿，红外波段赋红的波段组合，绿色与红色相加为品红，但红多绿少，因此品红偏红，植被在影像中会呈现红色，这有利于区分森林覆盖区域以及非植被区域(裸地)，合理避让森林区域，减少林木资源的占用和砍伐。

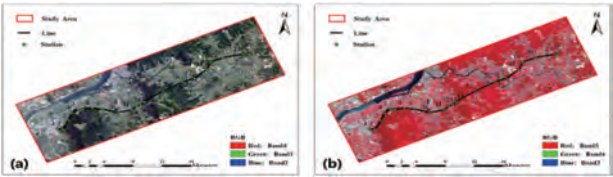


图4 研究区域真彩色(a)、假彩色(b)合成影像结果图

如图5(a)所示，根据研究区域的NDVI计算结果，输电线路路径转角轨迹点中的2到8号点、15和16号点都位于植被覆盖茂密的边缘区域，图中多呈现黄绿色，而该路线总体左右两侧趋势也处于植被覆盖茂盛的过渡区，较好地规避了森林覆盖过密的山体位置。除此之外，江河等水体也会对两岸山体上的输电线路产生一定的影响。在图5(b)的研究区域NDWI结果中，除10号点位于水源较丰富的区域(图中呈蓝色)、16和17号点横跨一条河流外，该输电线路整体远离水体，且沿江流方向前进。

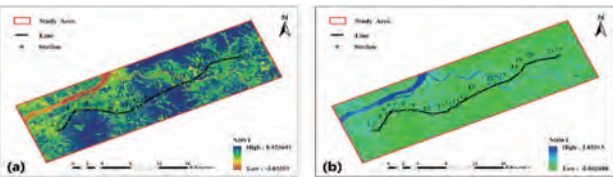


图5 研究区域NDVI(a)、NDWI(b)指数计算结果图

2.3 基于DEM数据的隐患点排查结果与分析

利用坡度计算公式,可计算每个像元处的陡度,该工程研究区坡度分析结果如图6所示。该区域高程位于15~592 m,坡度在0~51.313 3°之间。坡度值越小,地势越平坦;坡度值越大,地势越陡峭。坡度较大的区域主要分布在研究区域内的左下部分、中部和右上部分。

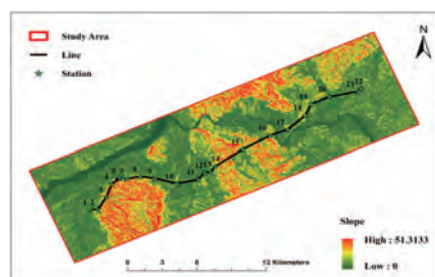


图6 路径沿线坡度结果图

为了进一步了解解译区的地形分布,文中在对坡度图进行统计分析的同时,选取初勘选线路径中22个路径转角轨迹点作为统计样本,各点高程和坡度结果如图7所示。据此,文中将各选点的坡度分级,并统计于表2中。坡度范围位于0~5°,坡度分级为平坡的占比40.91%;坡度范围位于5~15°,坡度分级为缓坡的占比45.45%;坡度范围位于15~25°,坡度分级为斜坡的占比9.09%;坡度范围位于25~35°,坡度分级为陡坡的占比4.55%;坡度大于35°的占地为0。结果表明,该工程沿线区域的3、4、8号点坡度较大,且这些点也位于树林茂密的地区,需要在后期勘测和布设测量时加强管理和风险控制。总体而言,初勘选线路径点的地形较为平缓,不存在急坡或险坡,通过坡度分析有效规避了输电线路选线路径上的不利地形,降低外业勘测人员劳动强度以及后期现场施工作业难度。

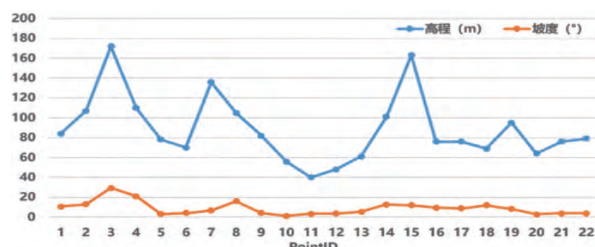


图7 输电线路杆塔位高程和坡度结果图

表2 路径轨迹点坡度统计结果

坡度范围	路径轨迹点编号	坡度分级	百分比/%
0~5°	5、6、9、10、11、12、20、21、22	平坡	40.91
5~15°	1、2、7、13、14、15、16、17、18、19	缓坡	45.45
15~25°	4、8	斜坡	9.09
25~35°	3	陡坡	4.55
35~45°	无	急坡	0
>45°	无	险坡	0

该工程研究区域的坡向分析结果如图8所示。输电线路通道前段2~7号点的东侧山体坡向相对,分别朝向南北两侧;在路径中段14~15号点中间,以山谷的乡村道路为界,两侧山体坡向相对,分别朝向东西两侧,这两部分区域需要重点考虑因降雨所带来的泥石流和滑坡等隐患影响。

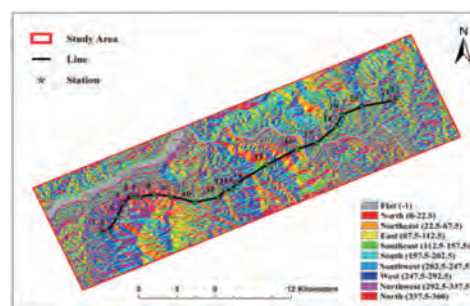


图8 输电线路路径沿线坡向结果图

3 结语

通过采用高分辨率遥感影像解译与DEM数字地形分析相结合的方法,为无人机禁飞区或山区高落差航摄困难区域的已建或拟建输电线路通道的地质灾害调查提供了一种有效解决方案。该方法通过人工目视解译,结合计算机对大量样本数据的分析,有效提高了识别灾害体和判断隐患点方面的准确率;同时利用地理信息系统技术,对判别结果进行可视化展示,能够直观地呈现灾害体的分布范围、规模以及输电线路的空间关系,为电力部门制定针对性的防护和应急措施提供了有力的支持,并有效节省外业人员实地踏勘劳动强度和作业时间,节约了项目投资。

因当前所采用的卫星遥感数据时效性较差且空间分辨率较低等,文中方法仅适用于从宏观、小比例尺的角度,对输电线路沿线地质灾害情况进行统计分析。此外,在实际应用中,还应不断优化解译标志和算法模型,以适应不同地区的地质条件和气候环境变化,并加强与气象、地质等相关部门的合作,及时获取更多的辅助数据,进一步提升灾害监测和预警的能力,确保输电线路的长期稳定运行。未来,随着国家高分卫星和雷达卫星的持续发射,卫星遥感数据的现势性和分辨率缺陷将得以弥补,将为地质灾害监测和输电线路安全保障带来更广阔的前景和更强大的技术支撑。(下转第40页)

厂、微电网等形态的用户,常态参与市场交易及系统的负荷调节。到2030年需求响应的调节能力规模达到320万kW及占负荷比重5.31%,其中前十大占比的行业调节能力建设规模及比重如表3所示。

表3 前十大占比的行业调节能力建设

设区市	规模/比重	2024年	2025年	2030年
水泥制造	调节能力规模/万kW	18.20	22.50	25.60
	占总调节规模比重/%	9.14	9	8
有色金属压延加工	调节能力规模/万kW	10.50	15	16
	占总调节规模比重/%	5.25	6	5
炼钢	调节能力规模/万kW	10.20	15	16
	占总调节规模比重/%	5.09	6	5
日用陶瓷制品制造	调节能力规模/万kW	10.10	12.50	22.40
	占总调节规模比重/%	5.06	5	7
电池制造	调节能力规模/万kW	9.70	12.50	25.60
	占总调节规模比重/%	4.87	5	8
电子元件及电子专用材料制造	调节能力规模/万kW	8.90	11.25	22.40
	占总调节规模比重/%	4.48	4.50	7
钢压延加工	调节能力规模/万kW	6.60	8.75	9.60
	占总调节规模比重/%	3.31	3.50	3
电子器件制造	调节能力规模/万kW	6	10	19.20
	占总调节规模比重/%	3	4	6
光伏设备及元器件制造	调节能力规模/万kW	5.30	7.50	19.20
	占总调节规模比重/%	2.67	3	6
铸造及其他金属制品制造	调节能力规模/万kW	5	6.25	9.60
	占总调节规模比重/%	2.52	2.50	3

4 结语

文中梳理了江西省电源侧、储能侧以及负荷侧各环节现有的电源装机规模及调节能力,明确了江西省调节能力存在滞后新能源发展的问题,不同类型调节资源的规模布局缺乏统筹考虑的问题。在满足新能源利用率的基础上,测算江西电网“十五五”逐年调节能力需求,在发挥现有灵活性调节资源调节能力、加快独立储能建设、充分利用特高压交直流输电能力、合理挖

掘需求侧响应潜力等多项对策下,到2030年,江西省电力系统调节能力将显著提升,各类调节资源发展的市场环境和商业模式更加完善,各类调节资源调用机制进一步完善。通过调节能力的建设优化,到2030年抽水蓄能投产规模到达330万kW,新型储能投产规模累计超过600万kW,支撑“十五五”6500万kW以上新能源的合理消纳利用,全省新能源利用率不低于90%。

参考文献:

[1] 苏南,董梓童.电力系统调节能力加速升级[N].中国能源报,2024-03-04(008).

[2] 许涛,王国春,董昱,等.新型电力系统平衡机理及演进过程研究[J].中国电机工程学报,2025,45(01):1-14.

[3] 杨昆,张琳,董博,等.新型电力系统调节能力提升及政策研究[J].中国电力企业管理,2022(34):39-42.

[4] 刘凡.多元调节体系有力支撑新型电力系统建设[J].中国能源,2024,46(03):38-46.

[5] 鲁刚,张富强,龚一莼,等.适应新型电力系统的新型调节资源体系建设[J].水电与抽水蓄能,2025,11(01):11-18.

[6] 章枫,樊恒建,邓晖,等.基于数学形态学的电力系统灵活性调节能力充裕度分析[J].中国电力,2025,58(03):43-554.

[7] 马汀山,王妍,吕凯,等.“双碳”目标下火电机组耦合储能的灵活性改造技术研究进展[J].中国电机工程学报,2022,42(增刊1):136-148.

[8] 霍沫霖,刘小聪,谭清坤,等.我国电力需求响应政策的实践与思考[J].中国能源,2022,44(07):35-43.

(上接第29页)

参考文献:

[1] 艾扬.基于倾斜摄影测量技术的高压输电线路选线设计[J].电力科技,2020(14):35-37.

[2] 戴旭明,梁健伟,刘伟,等.输电线路高分辨率遥感影像地质灾害解译识别技术[J].土工基础,2019,33(06):720-726.

[3] 赵莹,张宁,徐萌.地理国情监测遥感影像解译方法对比与分析[J].测绘与空间地理信息,2021,44(增刊1):103-105.

[4] 刘立,董先敏,刘娟,等.人机融合智能的遥感解译生产新方法[J].测绘通报,2022(07):118-123,137.

[5] 童立强,郭兆成.典型滑坡遥感影像特征研究[J].国土资源遥感,2013,25(01):86-92.

[6] 张勤,赵超英,陈雪蓉.多源遥感地质灾害早期识别技术进展与发展趋势[J].测绘学报,2022,51(06):885-896.

[7] 熊俊楠,刘志奇,苏鹏程.基于GF-1卫星影像的金川县泥石流沟空间分布特征研究[J].自然灾害学报,2019,28(02):160-168.

[8] Junbo Yu, Xinghua Li, Xiaobin Guan & Huanfeng Shen. A remote sensing assessment index for urban ecological livability and its application[J].Geo-spatial Information Science.2022.

[9] MCFEETERS, S.K. The Use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features[J]. International Journal of Remote Sensing,1996,17(07),1425-1432.

[10] 汤国安,那嘉明,程维明.我国区域地貌数字地形分析研究进展[J].测绘学报,2017,46(10):1570-1591.

[11] 刘学军,龚健雅,周启鸣,等.基于DEM坡度坡向算法精度的分析研究[J].测绘学报,2004,33(03):258-264.