

高熹微,张宇,郭宇鑫,等. 2025. 风力发电设备检修引起地电阻率变化的分析研究. 中国地震, 41(1): 114~125.

风力发电设备检修引起地电阻率变化的分析研究

高熹微¹⁾ 张宇²⁾ 郭宇鑫¹⁾ 张骞¹⁾
李玉¹⁾ 殷翔³⁾ 胡超³⁾

1) 江苏省高邮地震台, 江苏高邮 225600

2) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

3) 江苏省淮安地震监测中心站, 江苏淮安 223001

摘要 目前,中国正在大力推行风力发电,风电设施与部分地电阻率台站的测区不可避免地出现重叠,这对地电观测环境保护提出了新的要求和挑战。本文针对高邮临泽地电观测站风力发电设备检修期间的地电阻率观测数据变化,结合调查和落实,确认此次数据变化为风力发电设备检修的架空导线两端接地而引起。同时根据资料建立三维有限元模型,分析此类人为环境因素在不同距离、不同观测装置下对地电阻率观测的影响,数值模拟结果显示:风电设施与地电阻率测区合理的距离可以规避此类干扰,且增加地电阻率观测装置的埋设深度可以抑制此类干扰。本文旨在为未来地电观测系统中风力发电区域台站的选址、观测装置布设方式的选择以及分析风电设备检修对观测的影响及数据异常跟踪分析提供具体参考。

关键词: 地电阻率 风力发电 设备检修 架空导线

[文章编号] 1001-4683(2025)01-0114-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地电阻率作为我国应用于地震预测与研究的一种主要的地球物理观测手段,主要反映应力作用下介质变形诱发的微裂隙活动引起的电阻率变化(解滔等,2018),在众多震例研究中,地震前地电阻率观测均显示出较为突出的中短期异常信息(杜学彬等,2000;钱家栋等,2013;叶青等,2017;解滔等,2023a、2023b;于晨等,2023;姚赛赛等,2024),在地震监测预报中发挥着不可或缺的作用。随着社会的发展和人类大型工业活动的加剧,部分地电阻率台站的观测环境遭遇到不同程度的破坏,地电阻率的正常观测受到影响,观测数据质量也逐步下降。针对人类工业活动对地电阻率观测的影响,众多学者开展了多方面的针对性研究,解滔等(2013)利用三维有限元方法计算了宝昌台测区内埋设的钢缆在土壤不同状态下对地

[收稿日期] 2024-09-02 [修定日期] 2024-12-20

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划项目(XH23017YB)资助

[作者简介] 高熹微,男,1991年生,工程师,主要从事地震前兆研究工作。E-mail: 247943608@qq.com

张宇,通讯作者,女,1984年生,高级工程师,主要从事地震地电观测方法和技术研究工作。

E-mail: zyflyfish@163.com

电阻率的影响。王同利等(2017)利用三维有限元方法研究延庆台地电阻率测区内的铁管、铁脚架和铁质地基等铁质介质排列方向对地电阻率观测影响。侯博文等(2021)利用有限元方法分析了金属护栏对洛阳地震台地电阻率观测影响。马永等(2021)利用天津徐庄子台不同观测环境下的电磁观测数据,总结了新能源发展等电磁环境干扰源对观测的影响特征。张远富等(2022)利用有限元数值模拟方法分析了铸铁引水管道对地电阻率装置布设及观测影响。路中慧等(2022)通过有限元模型计算了浚县台地电阻率测区内地表铁轨所造成的干扰。韩静等(2022)利用大地电磁野外测量数据梳理了高速铁路、电气化铁路、风力发电站等强电磁环境下 MT 观测数据的变化特征。

在国家大力推行风力发电的背景下,风力发电项目遍布各个地区,已成为重点发展的再生能源(牛微等,2005)。风力发电的设备通常建设在人口稀少的区域,而地电阻率台站建设由于需要满足台站建设行业标准要求,往往也建设在偏离市区、人口活动较少的区域,这导致风力发电区域与地电观测区域不可避免地出现重叠,使得地电阻率观测环境更加复杂。此外,为了确保风力发电设备的安全性和稳定性,降低故障发生概率,风力发电企业每年定期对设备进行检修以及时排除潜在隐患,但其设备检修会对附近的地电阻率观测产生影响,破坏观测数据的正常背景变化。基于此,本文结合江苏高邮临泽电观测站周边风力发电设备检修期间直流和交流地电阻率观测数据的变化,落实与分析风力发电设备检修对地电阻率观测干扰的成因,并建立相应的三维有限元模型,定量计算风力发电设备检修对不同距离、不同观测装置的地电阻率观测影响结果,并进行干扰抑制分析,以期今后地震行业地电台站的观测环境保护和此类环境因素影响的数据异常跟踪分析等工作提供参考和借鉴。

1 台站测区观测环境

临泽地电观测站位于江苏省高邮市临泽镇合心村,地处苏中平原地区,地形平坦,属于苏北—南黄海盆地的一部分,地质构造为扬子准地台高邮凹陷内。根据建台电测深报告,场址东西方向电测深曲线见图 1(a),表现为 4 层电性结构,各电性层厚度、电阻率等反演结果见表 1,属于 QH 型;南北方向电测深曲线见图 1(b),表现为 3 层电性结构,各电性层厚度、电阻率等反演结果见表 1,属于 H 型。观测区域内基本为农田,观测环境优良,台站观测仪器选用 ZD8MI 型地电阻率仪,产出数据达千分位,能够有效记录地下介质微量变化,自 2022 年 1 月 1 日起该场地观测数据正式投入使用。

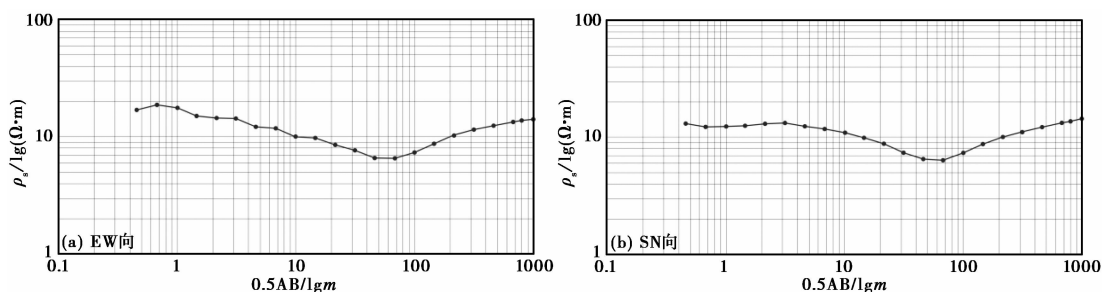


图 1 台站电测深曲线

表 1 电性层参数

序号	东西方向			南北方向		
	层电阻率/($\Omega \cdot m$)	层厚度/m	层底埋深/m	层电阻率/($\Omega \cdot m$)	层厚度/m	层底埋深/m
1	17.741	1.100	1.100	12.657	8.328	8.328
2	10.926	9.977	11.077	5.796	56.525	64.853
3	5.479	47.604	58.681	14.790		
4	14.638					

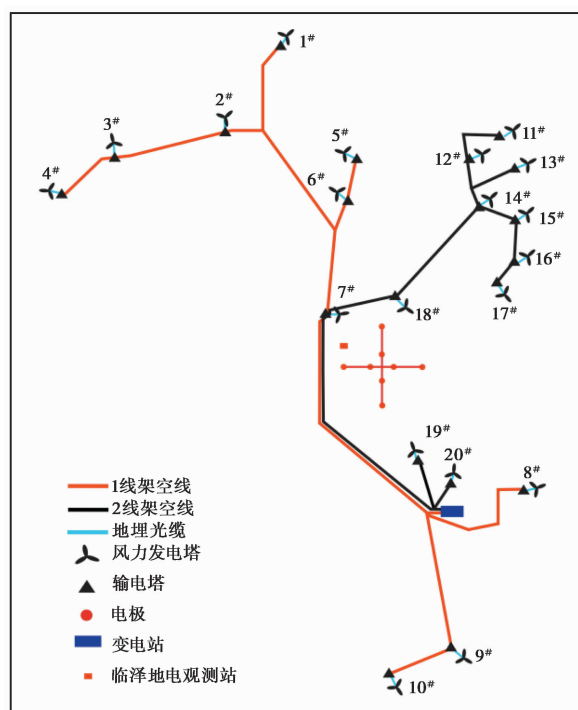


图 2 风力发电与观测装置布设示意

表 2 输电线路与地电阻率电极垂直距离统计

测道	线路与电极垂直距离/m			
	电极 A	电极 M	电极 N	电极 B
NS 测道	340	750	880	720
EW 测道	360	750	970	1360

目前,高邮市临泽镇地区安装了 20 台锥筒式塔架风机,并建有两条输电线路(图 2),其线路布置皆处于测区外,测区内无输电线路架设,输电线路与各电极之间的垂直距离见表 2。在输电线路中,1 线架空线路承载 1#~10#风机的电能,2 线架空线路承载 11#~20#风机的电能。多台风机的电能集中通过架空输电线路输送到变电站,再接入电网。为确保风力发电设备的安全性和稳定性,降低故障发生概率,风力发电企业每年定期对设备进行检修,及时排除潜在隐患。

2 数据变化

为验证数据的可靠性,场地中地表 NS 向和 EW 向地电阻率观测装置与直流地电阻率仪、交流地电阻率仪连接,进行错时对比观测。地表 NS 向和 EW 向地电阻率观测装置供电极距为 1000m,测量极距为 220m,电极埋深 3.5m。图 3(a)、3(c)为 2023 年 10 月 10 日 0 时—10 月 15 日 23 时地表 NS 向和 EW 向地电阻率直流、交流地电阻率小时值观测数据变化动态,图 3(b)、3(d)为此时段内地表 NS 向和 EW 向地电阻率小时值均方差变化动态。由图 3(a)、3(c)可见,2023 年 10 月 12 日 8 时—10 月 14 日 8 时地表 NS 向和 EW 向直流、交流的地电阻率小时值观测数据均呈现较明显的台阶变化,在相同的观测装置、不同的测量系统观测下,地电阻率观测结果干扰台阶量基本一致,对应时段内地电阻率小时值均方差未见波动。在同时段内也未有降雨出现,见图 3(e)。

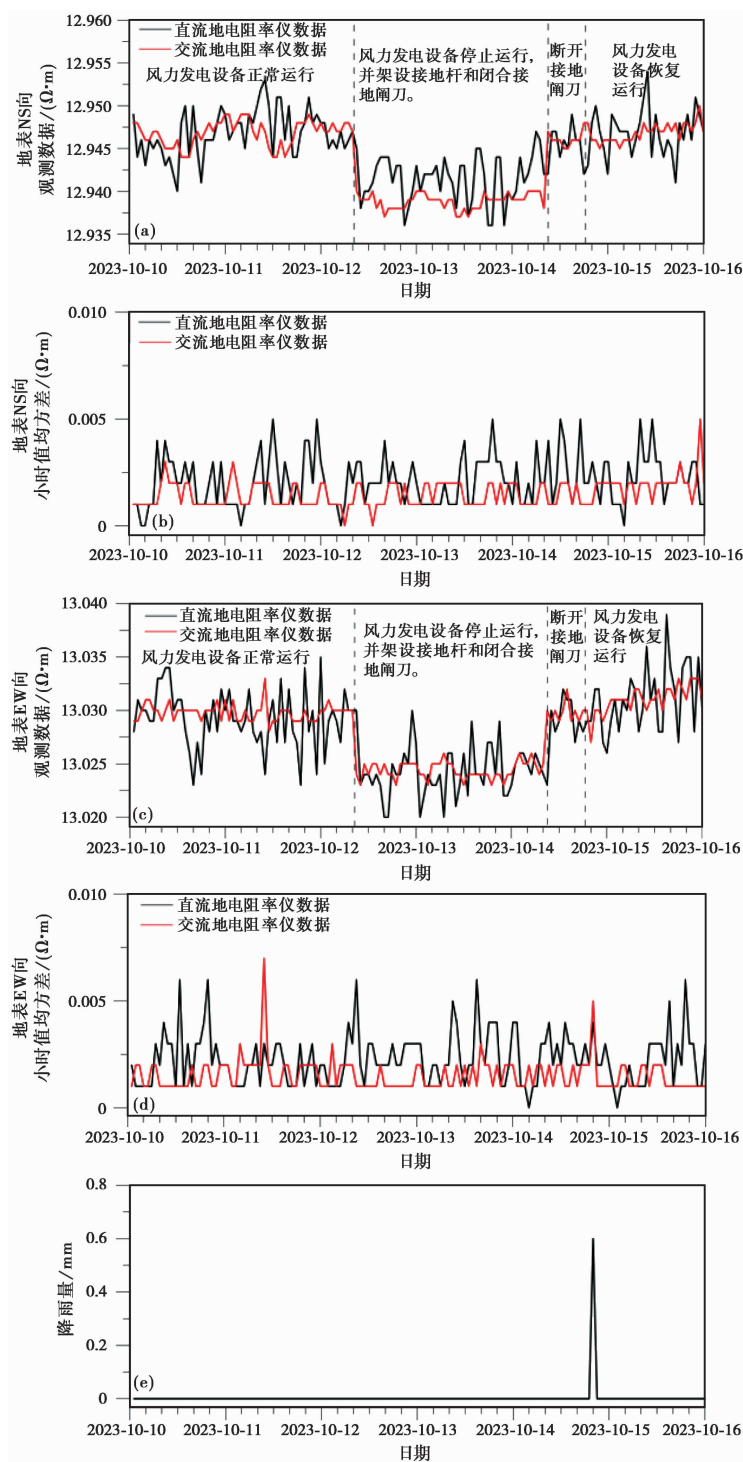
3 干扰成因分析

地电阻率观测数据出现异常后,台站人员立即进行异常落实和干扰成因分析,按照《地电台网运行管理技术细则》^①对观测装置进行了检查(供电线路漏电系数 ε_1 和 ε_2 、测量线路绝缘电阻 R_M 和 R_m 以及电极的接地电阻 R_A 、 R_B 、 R_M 、 R_N),各项目检查结果均符合技术要求(表 3),排除观测装置故障。同年 9 月,对观测仪器进行了半年度检查,结果合格,同时由于两套仪器在同一时间内出现故障的概率可能性很小,因而排除观测仪器故障。根据图 3(e)中临泽 10 月 12—15 日降雨数据,在地电阻率出现台阶时段,测区内未有降雨,因此排除自然环境因素影响。从图 3(b)、3(d)的小时值均方差数据可以看出,其变化稳定,因而排除杂散电流、其他工业施工设备漏电等情况。

随后,笔者在场地巡查中发现风力发电企业正在进行风力发电设备检修,随即进行了全程技术跟踪,在了解检修内容和操作的基础上与企业工作人员协作进行干扰判定。企业人员在 2023 年 10 月 12 日 7 时 45 分将高邮临泽区域所有风机设备停止运行,8 时 28 分前后将 7# 输电塔和 14#输电塔的架空输电线通过接地杆接地,同时在变电站将 1 线和 2 线架空线的接地闸刀闭合(图 2),此时 1 线架空线在 7#输电塔和变电站两端接地,2 线架空线在 14#输电塔和变电站两端接地。当架空线两端接地后,地电阻率观测数据开始出现台阶变化(图 3)。为了验证架空导线两端接地对地电阻率数据产生影响,经与企业工作人员沟通提前断开变电站内的接地闸刀。企业人员于 2023 年 10 月 14 日 8 时 10 分左右断开变电站内 1 线架空线的接地闸刀,地电阻率观测数据开始回升至 10 月 12 日 7 时之前的正常状态。这表明 1 线架空线两端接地造成观测数据产生台阶。10 月 14 日 8 时 10 分企业人员断开接地闸刀,并于 10 月 14 日 14 时检修结束,检修结束后该区域内的风机开始正常运行,在 10 月 14 日 9—13 时观测数据已回复至干扰之前状态(图 3),风机运行后观测数据也未有明显的突变,这表明风机正常运行和风机停止运行并未对现有的地表 NS 向、EW 向地电阻率观测数据产生影响。

通过现场调查和现场判定,证实风力发电检修时 1 线架空线两端接地与大地形成回路,

^① 地电台网运行管理技术细则. 2024. 中国地震局监测预报司



(a)地表 NS 向地电阻率观测数据; (b)地表 NS 向地电阻率小时值观测均方差; (c)地表 EW 向地电阻率观测数据;

(d)地表 EW 向地电阻率小时值观测均方差; (e)降雨量数据

图3 观测数据变化

表 3 观测装置检查结果

方位	供电线路漏电检查		测量线路绝缘电阻检查		电极接地电阻			
	$\varepsilon 1 / \%$	$\varepsilon 2 / \%$	$R_M / M \Omega$	$R_N / M \Omega$	R_A / Ω	R_B / Ω	R_M / Ω	R_N / Ω
NS 向	0.003	0.10	500	500	5.0	6.0	4.5	6.6
EW 向	0.004	0.07	500	500	5.5	5.0	5.0	5.6

从而导致观测数据出现台阶变化。统计 7#、14#输电塔和变电站与各电极的距离(表 4),从表 4 中可见,地表 NS 向供电极 B 和 EW 向供电极 A 距离 7#输电塔最近,14#输电塔和变电站与各电极的距离皆大于 1000m,由于 2 号架空线的 14#输电塔距离电极较远,14#输电塔到变电站之间线路两端接地未对地电阻率观测造成影响。

表 4 接地极与各电极之间的距离

接地极	电极与接地极直线距离/m							
	地表 NS 向电极				地表 EW 向电极			
	A	M	N	B	A	M	N	B
7#	1320	960	770	550	670	795	940	1300
14#	3000	2600	2400	2100	2800	2600	2400	2300
变电站	1600	2000	2200	2600	2400	2100	2000	1900

4 有限元模型建立与分析讨论

地震地电阻率观测一般采用大极距的四极对称观测装置的布设方式,稳流源向供电极 A、B 输入电流,同时在测量电极 M、N 量取电势差,依据装置系数、供电电流和人工电位差计算出地电阻率,计算公式如下

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (1)$$

其中, K 为装置系数,可以通过各电极的位置计算得到, ΔU_{MN} 为测量电极 M、N 之间的电位差, I 为供电极 A、B 的供电电流。

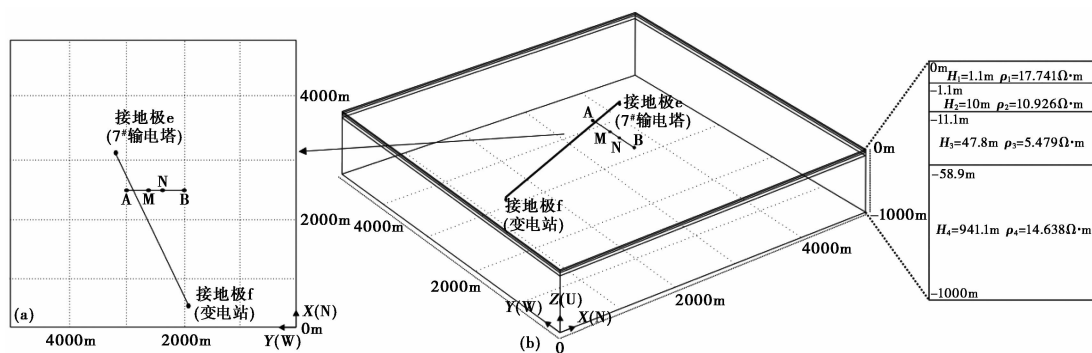
在数值模拟中可将其视为稳恒电流场问题,电流场遵守 Maxwell 方程组和电荷守恒定律,电位分布满足 Poisson 方程

$$\nabla(\sigma \nabla U) = -I\delta(x - x_A)\delta(y - y_A)\delta(z - z_A) \quad (2)$$

其中, σ 为介质电导率; U 为空间电位; I 为供电电流; δ 为狄拉克函数,在有限介质空间中满足 Neumann 和 Dirichlet 边界条件(Coggon, 1971; Dey A, et al, 1979)。

4.1 三维有限元模型建立

针对风力发电检修期内引起的地电阻率观测数据变化,根据测区内的电性结构、观测极距、电极埋深、架空导线及接地极等因素,综合考虑将模型尺寸设置为 $5\text{km} \times 5\text{km} \times 1\text{km}$,基于建台电测深报告中的 EW 向电测深曲线,建立四层水平层状介质三维模型,见图 4(b)。以地表 EW 向观测装置为例,模型区域中心与地表 EW 向观测装置中心重合,如图 4(a),供电



(a) 平面图; (b) 立体图

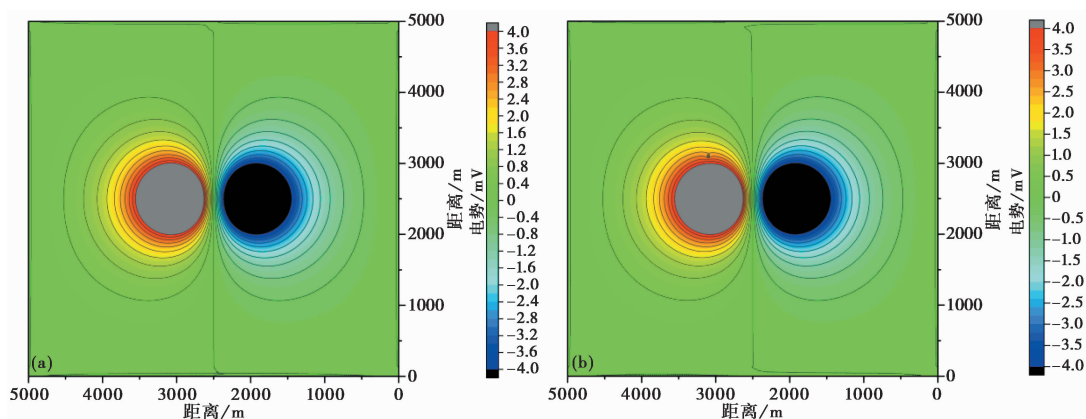
图4 四层水平层状介质模型

极距为 $AB=1000\text{m}$, 测量极距为 $MN=220\text{m}$, 电极埋深为 3.5m , 供电电流为 1.8A 。1 线架空导线使用外径 21.6mm 的铝绞线, 在模型中将 3 根架空的输电导线简化为 1 根架空导线, 架空导线高度为 10m , 半径为 0.03m , 电阻率为 $2.9 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$ 。根据实际的 7# 输电塔和变电站的位置和距离, 分别设置模型中的接地极 e 和接地极 f, 接地极地下部分设置为半径 5m 、高度 0.1m 的圆柱体, 埋设深度为 3.5m 。采用同样材质的导线 (半径 0.03m , 电阻率 $2.9 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$) 连接接地极 e 与接地极 f, 做为架空导线。在实际中, 接地极 e (7# 输电塔) 通过多个输电塔支撑连接至接地极 f (变电站), 其走向如图 2 中的红线所示, 但该架空导线仅在 7# 输电塔和变电站处接地, 因此在模型中直接将接地极 e 与接地极 f 连接作为架空导线。通过建立上述模型, 得到无架空导线及架空导线两端接地干扰状态下的电势分布和地电阻率变化值, 同时进行不同距离 (改变接地极与观测装置的距离)、不同电极埋设深度的数值模拟, 以分析架空导线两端接地的干扰范围。

4.2 架空导线两端接地的电势分布

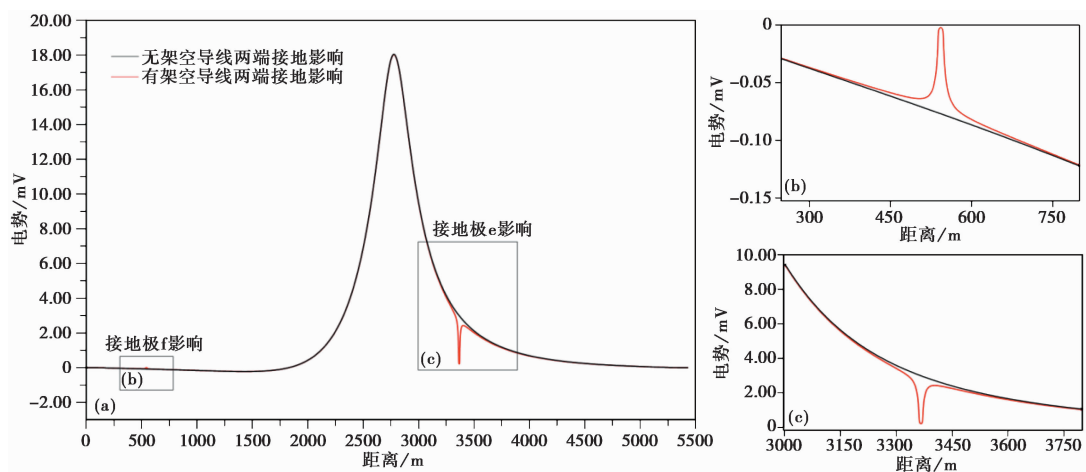
按照实际位置进行模拟计算, 供电电流由供电极 A (+I) 流入大地至供电极 B (-I), 在无架空导线干扰情况下 (按照图 4 所示位置, 接地极 e、f 未相连) 和架空导线干扰情况下 (按照图 4 所示位置, 接地极 e、f 相连), 得到 EW 向观测装置所在的 $Z=-3.5\text{m}$ 平面的电势模拟分布, 无架空导线干扰情况下的电势图见图 5(a) (图中供电极 A 位于暖色系, 供电极 B 位于冷色系), 架空导线干扰情况下的电势图见图 5(b) (图中供电极 A 位于暖色系, 供电极 B 位于冷色系), 为了体现接地极的影响, 绘图中取电势范围为 $\pm 4\text{mV}$, 灰色和黑色区域表示超出所绘电势范围的区域。从图 5 中 (a) 和 (b) 的电势对比可见, 地电阻率工作时, 在接地极 e、f 相连后, 接地极 e 附近电势分布异常, 见图 5(b) 中黑色圆点。

当 1 线架空导线在接地点 e 和 f 处接地与大地形成回路时, 若 ef 段存在电流且连接 ef 段的架空导线电阻为零, 那么接地极 e 和接地极 f 的电势应相等。但由于 ef 段架空导线存在电阻, 接地极 e 和接地极 f 的电势会近似相等, 两者之间存在很小的电势差。在 $Z=-3.5\text{m}$ 平面上, 地电阻率供电时, 无架空导线和架空导线的电势模拟分布如图 6 所示, 接地极 e 和接地极 f 相连后, 当供电极 A (+I) 向大地输入电流时, 接地极 f 相比于接地极 e 距离供电极 A 更远, 为了保持接地极 e 和接地极 f 的电势近似相等, 一部分电流被接地极 e 分走, 通过架



(a) 无架空导线干扰; (b) 架空导线干扰

图5 电势等值线分布



(a) 模拟电势分布; (b) 接地极 e 模拟电势分布; (c) 接地极 f 模拟电势分布

图6 接地极 e 和 f 截线的模拟电势分布

空导线输送至接地极 f, 再汇入大地, 进而造成接地极 e 的电势降低, 使其周围一定范围内的电势分布发生改变, 如图 6(b)、6(c) 所示。

架空导线的两端接地, 且接地极与供电电极处于一定距离内, 会形成新的低阻路径, 由于高阻体会排斥电流而低阻体会吸引电流, 当地电阻率供电时, 部分电流被接地极分走, 导致该区域附近的电势分布异常, 进而影响地电阻率观测。

4.3 不同距离下架空导线两端接地对观测的影响

为研究不同距离下架空导线对地电阻率的影响程度, 将接地极 f 作为固定位置, 改变接地极 e 的位置进行探讨。通过上述模拟的电势分布可以看出, 在一定区域内架空导线两端接地会对地电阻率观测造成干扰。为了量化这种干扰, 改变接地极 e 与观测装置的距离。因此, 通过改变接地极 e 与供电电极 A 的距离来进行多次模拟, 接地极 e 沿 X 轴移动 (Y 轴保持不变), 其他部分位置不变, 计算结果如图 7 所示, 其中纵坐标 $\Delta\rho$ 表示干扰量 (即有干扰时的地电阻率值减去无干扰时的地电阻率值), 横坐标表示接地极 e 与供电电极 A 的直线距离。

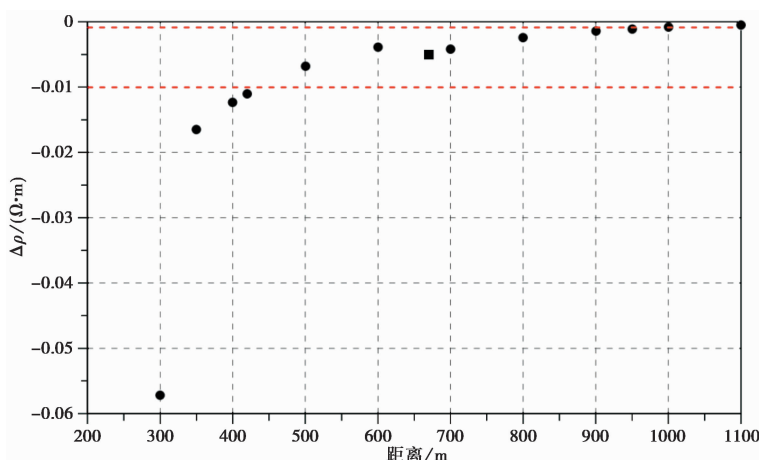


图7 地电阻率变化与距离数值模拟结果

按照现行规范要求,仪器需识别出长期变化中的1%(中国地震局,2009;王兰炜等,2021),随着技术的发展,目前厂家正在研发分辨力达0.1%的地电阻率仪器,因此这里将地电阻率仪器分辨力 $0.01 \Omega \cdot m$ 和 $0.001 \Omega \cdot m$ 作为参考值。

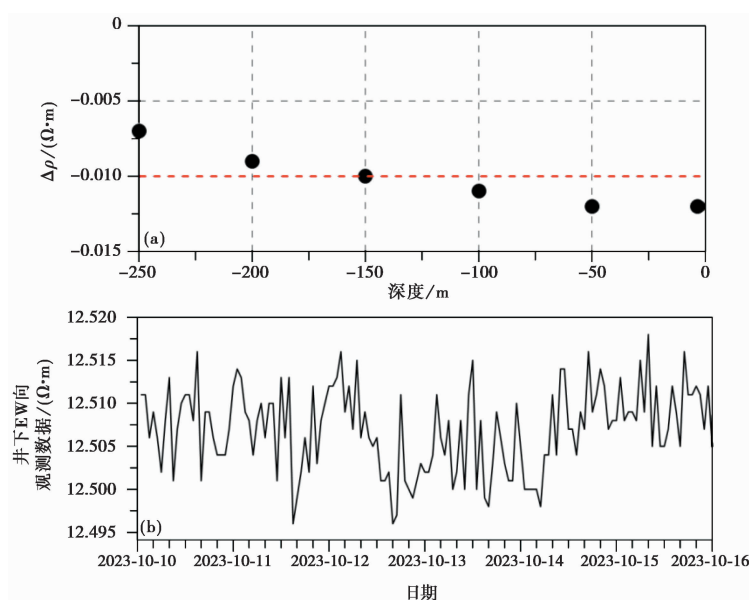
从图7中可以看出,随着接地极e与供电极A的直线距离逐步增大, $\Delta\rho$ 的绝对值也逐步减小。当接地极e与供电极A的直线距离为420m时, $\Delta\rho$ 的绝对值为 $0.01 \Omega \cdot m$,当接地极e与供电极A的直线距离为950m时, $\Delta\rho$ 的绝对值为 $0.001 \Omega \cdot m$,即接地极e与供电极A的直线距离大于420m后, $\Delta\rho$ 的绝对值小于仪器分辨力 $0.01 \Omega \cdot m$,接地极e与供电极A的直线距离大于950m后, $\Delta\rho$ 的绝对值小于仪器分辨力 $0.001 \Omega \cdot m$ 。在实际干扰情况中,接地极e与供电极A的直线距离为670m(表4), $\Delta\rho$ 模拟值为 $-0.005 \Omega \cdot m$ (图7正方形所示),与观测数据 $\Delta\rho$ 的台阶量 $-0.005 \Omega \cdot m$ 一致,这也表明所建的模型是可靠的。

4.4 电极不同埋设深度对架空导线两端接地干扰的抑制

考虑到现行规范要求,地电阻率仪器的分辨力需达到 $0.01 \Omega \cdot m$,因此选取接地极e与供电极A的直线距离 $d=400m$ 的位置,改变观测装置电极的埋设深度进行模拟。计算结果如图8(a)所示,图中纵坐标 $\Delta\rho$ 表示干扰量(即有干扰时的地电阻率值减去无干扰时的地电阻率值),横坐标表示观测装置的埋设深度。在接地极e与供电极A的直线距离 $d=400m$ 的位置,电极埋设深度为 $-3.5m$ 时, $\Delta\rho$ 的绝对值为 $0.012 \Omega \cdot m$,随着电极埋设深度的增加, $\Delta\rho$ 的绝对值逐渐减小,埋深为 $-150m$ 时 $\Delta\rho$ 的绝对值为 $0.010 \Omega \cdot m$,埋深为 $-250m$ 时 $\Delta\rho$ 的绝对值为 $0.007 \Omega \cdot m$,说明加深电极的埋设深度能够抑制此类干扰。为了对比观测,建台时在图2中地表观测EW向观测装置相同的位置,布设了井下EW向观测装置,电极埋设深度为220m,在此次干扰中,可求得井下EW向供电极A与接地极e的直线距离为705m,其观测数据 $\Delta\rho$ 为 $-0.003 \Omega \cdot m$,见图8(b),地表观测EW向供电极A与接地极e的直线距离670m,其观测数据 $\Delta\rho$ 为 $-0.005 \Omega \cdot m$,井下EW向的 $\Delta\rho$ 小于地表EW向的 $\Delta\rho$,进一步验证加深电极的埋设深度能够有效地抑制此类干扰。

5 结论

本文通过对风力检修期间地电阻率变化的成因分析和风力检修时架空导线两端接地对



(a) 深度数值模拟结果; (b) 井下 EW 向地电阻率观测数据

图 8 深度数值模拟结果及观测数据变化

地电阻率观测影响的有限元数值分析,得出以下结论:

(1) 针对于此次地电阻率数据变化,通过观测系统状况、自然因素、场地环境因素调查以及多方联合协作分析,证实其数据变化由风力发电检修时架空导线在输电塔和变电站两端同时接地所引起。

(2) 风力发电的架空导线在输电塔和变电站同时接地且接地极与供电极的距离处于一定范围内,在观测环境中形成了新的低阻路径,由于高阻体会排斥电流而低阻体会吸引电流,当地电阻率供电时,部分电流从接地极流走,导致该区域附近的电势分布异常,进而影响地电阻率观测。

(3) 架空导线接地极实际位置模拟所得的地电阻率变化量与地电阻率观测数据变化量相符;对于分辨力 $0.01 \Omega\cdot m$ 的地电阻率仪器,架空导线两端接地干扰的有效避让距离为 420m;对于分辨力为 $0.001 \Omega\cdot m$ 的地电阻率仪器,其有效避让距离为 950m。增加电极的埋设深度可以有效抑制此类干扰,当无法改变有效避让距离时,可以根据建设成本适当增加电极埋设深度,建设井下地电阻率观测装置来抑制此类干扰。

风力设备检修中架空导线两端接地对地电阻率观测的影响,需综合考虑架空导线的基本属性(电阻、半径等)、观测装置与接地极的距离、观测装置极距和埋深、场地介质的电性结构等。本研究以临泽台的电性结构、布极方式、架空导线接地点位于测区外(供电极外侧)等情况进行模拟分析,此方法可为台站异常跟踪分析提供思路,此结果可为减小风力发电设备检修干扰和合理选择观测建设地点、布设方式提供一定的参考。但本研究未涉及架空导线接地点位于测区内(供电极与测量极之间、测量极之间)的情况,此种情况应综合考虑接地极对供电极和测量极的影响。

参考文献

- 杜学彬,薛顺章,郝臻,等. 2000. 地电阻率中短期异常与地震的关系. 地震学报, **22**(4):368~376.
- 韩静,詹艳,孙翔宇,等. 2022. 强电磁干扰环境下的大地电磁数据特征及处理. 地震地质, **44**(3):736~752.
- 侯博文,孙召华,谢佳兴,等. 2021. 金属护栏对洛阳地震台地电阻率干扰定量分析. 地震地磁观测与研究, **42**(5):118~128.
- 路中慧,李志涛,张达,等. 2022. 铁轨干扰浚县地震台地电阻率观测的有限元分析. 地震地磁观测与研究, **43**(1):86~91.
- 马永,李宁,徐学恭,等. 2021. 新能源发电对电磁观测环境的影响特征——以天津徐庄子台的电磁观测为例. 地震学报, **43**(5):595~604.
- 牛微,李珊珊. 2005. 我国新能源发电技术应用现状及发展. 沈阳工程学院学报(自然科学版), **1**(4):34~36.
- 钱家栋,马钦忠,李劭秋. 2013. 汶川 $M_s 8.0$ 地震前成都台 NE 测线地电阻率异常的进一步研究. 地震学报, **35**(1):4~17.
- 王兰炜,张宇,张兴国,等. 2021. 井下地电阻率观测装置稳定性研究. 电子学报, **49**(6):1167~1177.
- 王同利,李妍,武晓东,等. 2017. 延庆台地电阻率铁质干扰的有限元模拟. 地震学报, **39**(4):520~530.
- 解滔,韩盈,于晨. 2023a. 2021—2022 年川滇地区 4 次 $M_s \geq 6.0$ 地震前井下地电阻率观测的异常变化. 地震地质, **45**(6):1370~1384.
- 解滔,刘杰,卢军,等. 2018. 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震前定点观测电磁异常回溯性分析. 地球物理学报, **61**(5):1922~1937.
- 解滔,卢军. 2023b. 中国中强地震前地电阻率中短期异常特征及其可能原因. 中国地震, **39**(1):45~63.
- 解滔,卢军,李美,等. 2013. 地理钢缆对宝昌台地电阻率干扰的定量分析. 地球物理学进展, **28**(2):727~734.
- 姚赛赛,高曙德,李娜,等. 2024. 玛多 $M_s 7.4$ 地震前地电阻率变化. 大地测量与地球动力学, **44**(6):595~600.
- 叶青,张翼,黄兴辉,等. 2017. 2015 年内蒙古阿拉善 $M_s 5.8$ 地震前地电阻率变化特征研究. 地震, **37**(4):123~133.
- 于晨,卢军,解滔,等. 2023. 2017—2019 年松原地区 4 次中强地震前绥化台地电阻率异常分析. 中国地震, **39**(2):314~324.
- 张远富,赵斐,张飞丽,等. 2022. 地电阻率观测装置布设与金属管线类干扰的关系研究——以平凉台为例. 地震工程学报, **44**(4):945~952,961.
- 中国地震局. 2009. DB/T 33.1-2009 地震地电观测方法地电阻率观测第 1 部分:单极距观测. 北京:中国标准出版社.
- Coggon J H. 1971. Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. Geophysics, **36**(1):132~155.
- Dey A, Morrison H F. 1979. Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. Geophys Prospect, **27**(1):106~136.

Analysis of Geoelectric Resistivity Change Caused by Maintenance of Wind Power Generation Equipment

Gao Xiwei¹⁾, Zhang Yu²⁾, Guo Yuxin¹⁾, Zhang Qian¹⁾, Li Yu¹⁾, Yin Xiang³⁾,
Hu Chao³⁾

1) Gaoyou Station, Jiangsu Earthquake Agency, Gaoyou 225600, Jiangsu, China

2) Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

3) Huai'an center station, Jiangsu Earthquake Agency, Huai'an 223001, Jiangsu, China

Abstract China is actively promoting wind power, and as a result, wind power facilities are increasingly overlapping with geoelectric resistivity observation areas. This presents new challenges for the environmental protection of geoelectric observations. This study analyzes changes in ground resistivity data during the maintenance of wind power generation equipment at Linze station. By investigating and addressing anomalies, it was determined that the observed data changes were caused by the grounding of the overhead conductors during wind power equipment maintenance. The underlying mechanism was analyzed, and a three-dimensional finite element model was developed to assess the impact of such interference on geoelectric resistivity at varying distances and with different observation devices. The results indicate that numerical simulations provide an effective distance to avoid this interference, and increasing the burial depth of electrodes can help mitigate its effects. The findings of this study offer valuable insights for the selection of observation station sites in wind power generation areas, the layout of observation devices, and the analysis of the impact of wind power equipment maintenance on geoelectric observations, including the tracking of data anomalies.

Keywords: Geoelectric resistivity; Wind power; Equipment maintenance; Overhead conductor