

综合物探技术在冻土地区勘察中的应用研究

王鹏, 张正阳

上海电力设计院有限公司, 上海 200025

DOI:10.61369/ERA.2025100002

摘要： 为应对高寒地区电力工程建设中冻土冻胀、融沉等工程地质问题，本研究提出综合应用微动探测（SPAC 法）与电阻率测深技术，以提升冻土分布探测精度。通过青海果洛藏族自治州某特高压输电工程实例，在海拔 4400m 冻土区布设微动测线与电阻率测深点，结合钻探数据验证，分析了地层横波速度与电阻率特征。结果显示：微动探测获得的拟横波速度剖面（500–1400 m/s）与电阻率测深高阻区（ $850 \Omega \cdot m$ ）在冻土层（埋深 5–8m）分布上高度吻合；碎石土层（拟横波速度 500–600 m/s）与强风化板岩层（ $>2000 \text{ m/s}$ ）的分界亦与钻探岩性分层一致。研究表明，综合物探技术可有效克服单一方法的局限性，通过拟横波速度与电阻率的互补性解析冻土空间分布。该成果为高寒地区电力工程选址及冻土灾害防控提供了可靠的技术支撑。

关键词： 微动探测；SPAC 法；电阻率测深；综合物探

Application of Integrated Geophysical Exploration Techniques in Frozen Soil Region Surveys

Wang Peng, Zhang Zhengyang

Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200025

Abstract： To address engineering geological issues such as permafrost heave and thaw settlement in power engineering projects in high-altitude cold regions, this study proposes the integrated application of microtremor detection (SPAC method) and resistivity sounding technology to enhance the accuracy of permafrost distribution detection. Using a case study of a ultra-high voltage transmission project in Golok Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Province, microtremor survey lines and resistivity sounding points were deployed in a permafrost zone at an altitude of 4,400 metres. Combined with drilling data verification, the study analysed the characteristics of shear wave velocity and resistivity in the strata. The results show that the pseudo-shear wave velocity profiles (500–1,400 m/s) obtained from microtremor detection and the high-resistance zones ($850 \Omega \cdot m$) identified by resistivity sounding are highly consistent in their distribution within the permafrost layer (buried at a depth of 5–8 m); the boundary between the gravelly soil layer (simulated shear wave velocity 500–600 m/s) and the strongly weathered slate layer ($>2000 \text{ m/s}$) also aligns with the lithological stratification identified by drilling. The study demonstrates that integrated geophysical techniques can effectively overcome the limitations of single methods by leveraging the complementary nature of pseudo-shear wave velocity and resistivity to analyse the spatial distribution of permafrost. This research provides reliable technical support for site selection in power engineering projects and permafrost hazard prevention in high-altitude cold regions.

Keywords： microtremor detection; SPAC method; resistivity sounding; integrated geophysical techniques

引言

随着国家双碳战略的稳步推进，国家不断在一些海拔高寒地区开展包括风力、光伏发电和高压输电网络等重大电力工程。上述地区广泛分布有冻土，冻土具有冻胀、融沉等不利于工程安全的性质，可能对工程施工造成不良影响，是勘察工作中应该重点查明的不良地质条件。冻土在冻融的不同阶段表现出不同的物理性质，例如冻土在冻结时电阻率显著增大、横波速度增大，这为通过物探方法测定冻

基金项目：上海电力设计院有限公司重点科研项目 (KY-2024-015-KC)。

作者简介：王鹏 (1987–)，男，硕士研究生，高级工程师，毕业于中国地质大学（武汉）地球物理学专业，长期从事工程物探、管线探测等工作。

土的埋深和厚度提供了前提条件^[1]。

我国冻土物探技术发展历程可分为三个阶段。20世纪60年代初期，科研团队在青藏高原冻土勘察中首次引入电法勘探技术，黄以职团队开创了我国冻土地球物理探测的先河^[2]。至90年代，探地雷达技术应用在高寒冻土区实现了对多年冻土层的系统性勘察^[3]。21世纪初，随着综合物探技术体系的完善，我国冻土研究进入多方法协同探测阶段^[4]。刘靖团队通过电测深法构建了永久冻土带三维分布模型^[5]。朱占龙团队综合利用高密度电法与钻探资料，系统评估了高原冻土区的工程地质条件^[6]。

目前，多采用单一方法物探来配合钻探来探明冻土，对冻土层的分布情况的认知难免有纰漏。本文旨在通过微动探测和电阻率测深的综合物探，探究如何在高寒地区高效进行冻土勘察的有效方法。

一、方法原理

微动探测技术通过布设规则或不规则台阵接收环境振动信号，其核心分析方法主要包含空间自相关法（SPAC）与频率-波数法（F-K）2类。SPAC法基于平稳随机过程理论^[7]，将微动信号表征为频域-波数域联合分布的随机场模型：

$$X(t, \xi) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \exp(i\omega t + ik\xi) dZ(\omega, k) \quad (1)$$

式中， ω 为角频率， k 为波数， Z 为正交随机过程。

通过对噪声场功率谱进行归一化处理，可推导出方位平均空间自相关系数

ρ 的数学表达式：

$$\rho(r, \omega_0) = J_0 \left(\omega_0 \cdot \frac{r}{c(\omega_0)} \right) \quad (2)$$

其中 J_0 为零阶第一类贝塞尔函数。

式(2)表明，圆形台阵的空间自相关系数随频率变化且符合贝塞尔函数规律。因此，通过拟合 ρ 与贝塞尔函数曲线，可直接反演出相速度 $c(\omega)$ 频散特性。

实际应用中，首先从微动信号中分离瑞利波并提取频散曲线，结合近邻法反演地层横波速度分布，再通过空间插值生成二维速度剖面，最终实现地下结构的精细化表征。相较传统方法，该技术无需人工震源即可获得大范围地质信息，在复杂环境勘探中具有显著优势。

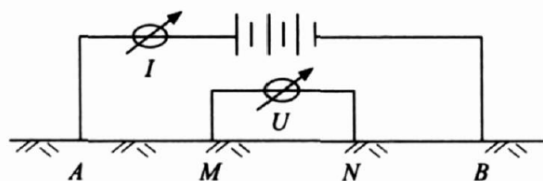


图1 电阻率法原理

电阻率法工作原理如图1所示，在AB两侧施加电流 I ，测量电极MN之间的电位差 U ，在无限半空间中的点电源场中，视电阻率 ρ_s 为

$$\rho_s = \pi \cdot \frac{AM \cdot AN}{MN} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (3)$$

电阻率测深法的特点是：供电电极（A、B）在测点（O）两侧沿相反方向向外移动，而测量电极（M、N）不动或与AB保持一定比例同时移动，电阻率测深法主要用来探测地下不同深度范围内的垂向电性变化。

二、应用实例

青海省果洛藏族自治州位于青藏高原东北缘，平均海拔4200m以上，分布有大面积的多年冻土。某拟建特高压输电线路工程某一区段平均海拔为4400m左右，部分线路经过多年冻土区。工区典型地质分层为：0~2m，草甸土，主要成分以粉土为主，粉土摇振反应明显，含大量植物根系，为低阻低速层；2~20m，碎石土，中密-密实，稍湿-很湿，母岩以石英砂岩为主，其中间含粉土、砾砂充填，其电阻率和横波速度较草甸土明显增大，多年冻土多分布在此层；20~25m强风化板岩，主要成分以斜长石、黑云母等构成，节理裂隙发育，岩芯呈碎块状、短柱状，其电阻率和横波速度较碎石土层差别不明显；25m以下，中风化板岩，电阻率和横波速度较强风化板岩明显增大^[8,9]。由此可见，工区内各地层物理性质差异较明显，这为开展微动探测法和电阻率测深法提供了地球物理前提。

（一）微动探测

为查明冻土区分布及冻土层厚度，特在该线路N5012杆塔处布置了2条微动测线和1个电阻率测深点，工作量布置情况如图2所示：

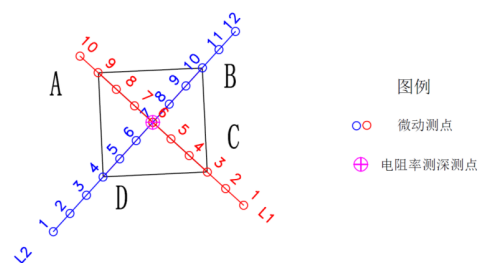
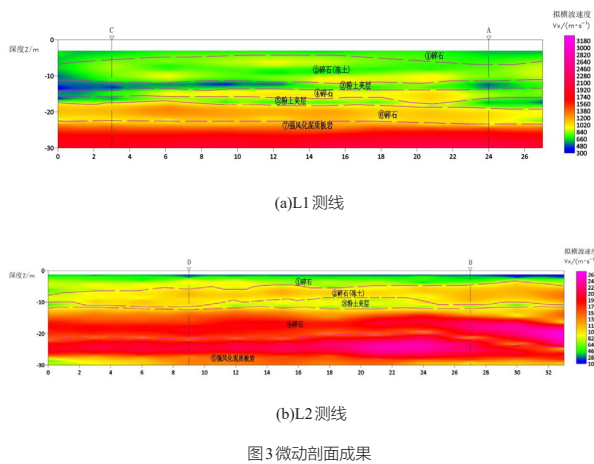


图2 物探方法布置

本次微动探测采用北京水电物探研究所生产的WD-2型智能微动探测仪，采用线性台阵（道间距3m），同步采集，采样率250Hz，单点采集时长约0.5h。



(二) 电阻率测深

电阻率测深采用重庆地质仪器厂生产的 DZD-6A 直流电阻率仪，使用 200V 外接供电电源，使用温纳装置^[10]，AB 值由 3m 变化至 40m。

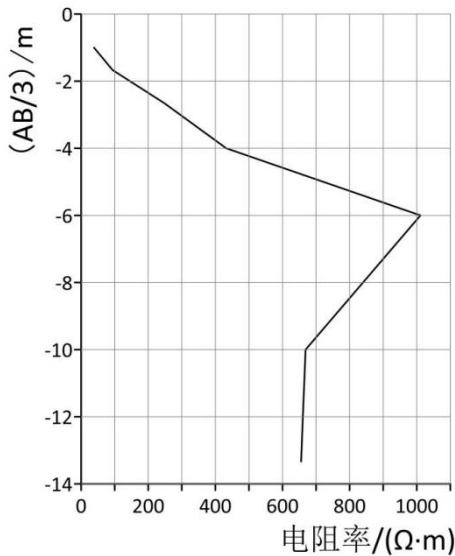


图4 电阻率测深成果

N5012 杆塔的塔位中心钻探的岩性分层如表 1 所示

表 1 N5012 杆塔中心岩性分层表		
层底深度 /m	岩性	岩性描述
0.5	草甸土	松散，主要成分以粉土为主，含大量植物根系。
20.5	碎石	中密~密实，母岩成为以石英砂岩为主，中间含粉土、砾砂充填。
25	强风化泥质板岩	岩质极软，节理裂隙发育，岩芯呈碎块状。

由图 3 分析可知，N5012 杆塔地层大致可以分为 2 层，即 22m 以上的碎石土层和 22m 以下的强风化板岩层，由于高频信号的缺失，L1 测线 0 ~ 3.5m、L2 测线 0 ~ 2m 无有效数据。

由于岩土层在不同深度时，上覆压力、含水性等外部条件的差异较大，故只能驻 V_x 值的相对值来作为判断分层界限的依据，无法用其绝对值来对岩土层的实际剪切波速进行测量。结合钻探成果（表 1），总体分层如下，第一层为碎石土，拟横波速度为 500 ~ 600m/s，层面埋深在 5 ~ 6m 左右；第二层为碎石土中的冻土层，拟横波速度为 800 ~ 1400m/s，电阻率测深法成果如图 4 所示，按半幅值法分层，冻土层分布在地表以下 5 ~ 8m，平均电阻率约为 $850 \Omega \cdot m$ ，总体而言，冻土层表现为较明显的高电阻率高横波速度现象，2 种物探方法对应；第三层主要为碎石层，中间夹有粉土层，拟横波速度为 1200 ~ 2000 m/s，层面埋深为 22 ~ 25m；第三层为强风化板岩，拟横波速度大于 2000 m/s。

三、结论

微动探测法结合电阻率测深可以有效地对冻土的分布情况进行探测，实践表明拟横波速度的高速区域和电阻率高阻段对应良好。因现场条件所限，只在杆塔处进行了电阻率测深测量，如能在微动测线测得高密度电法剖面进行对比研究，将有利于不同方法的交叉验证。

参考文献

[1] 张振利, 张洪亮. 综合地球物理方法在冻土调查中的应用与研究 [J]. 低温建筑技术, 2021, 43(09): 157-159.
[2] 苏州. 基于综合物探技术的大小兴安岭冻土层厚度反演及其影响因素 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.
[3] 唐君辉, 刘国兴, 韩江涛, 等. 电测深法在漠河地区探测永久冻土层的应用 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2005, (S1): 104-108.
[4] 刘靖, 姜凡, 刘石. 非闭合电极电容层析成像传感器在冻土测试中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(02): 363-368.
[5] 袁蕾, 刘争平, 张欣, 等. 基于虚拟仪器技术的声-电效应观测系统及其在冻土模型研究中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2009, 24(03): 1142-1148.
[6] 王浩. 物探技术在我国多年冻土勘测中的应用分析 [J]. 科技创新与应用, 2016(08): 299.
[7] 冉有华, 李新. 中国多年冻土制图: 进展、挑战与机遇 [J]. 地球科学进展, 2019(10): 1015-1027.
[8] 何乃武, 俞祁浩. 探地雷达在多年冻土地区工程勘测中的应用 [J]. 路基工程, 2006(05): 13-15.
[9] 俞祁浩, 程国栋. 物探技术在我国多年冻土勘测中的应用 [J]. 冰川冻土, 2002(01): 102-108.
[10] 王通, 俞祁浩, 游艳辉, 王武, 杜二计. 物探技术在多年冻土探测方面的应用 [J]. 物探与化探, 2011(05): 639-642.