

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0068

YOU Yanhui, LI Dangmin, SHAN Bo, et al. Application of high density electrical resistivity tomography in investigating the permafrost around tower foundations of power transmission line[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):684–692. [游艳辉, 李党民, 单波, 等. 高密度电法在输电线路塔基基础附近多年冻土探测中的应用[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):684–692.]

高密度电法在输电线路塔基基础附近多年冻土探测中的应用

游艳辉¹, 李党民², 单波², 田生祥³, 王新斌¹, 俞祁浩¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075; 3. 国网青海省电力公司, 青海 西宁 810008)

摘 要: 多年冻土区输电线路塔基基础附近活动层厚度和地下冰变化与基础稳定性密切相关, 塔基施工的热扰动和混凝土基础的热效应使得基础周围冻土易发生退化, 不利于基础的稳定。高密度电法是冻土工程环境研究中常用的地球物理方法, 其探测结果的可靠性和分辨能力受数据采集方式、目标体地电结构影响。为减小对输电线路塔基附近冻土特征识别的不确定性, 通过建立基础周围多年冻土地电模型的正反演模拟, 发现活动层处于融化状态时各种装置方式数据采集均能较好地反映活动层厚度的起伏, 但由于冻融锋面附近显著的电阻率差异, 难以识别多年冻土层内的地下冰空间分布特征。而活动层处于冻结状态时进行探测能显著提高对多年冻土层内的地下冰空间分布特征识别精度, 其中偶极-偶极装置可较好地识别高、低含冰量区域的发育位置和形态特征。在青藏直流输电线路塔基基础附近冻土探测中证实了方法的有效性, 探测结果揭示了施工过程和基础热效应导致的塔基基础附近的地下冰退化。以上研究表明, 通过正反演模拟, 根据具体探测目标选择合适的探测时机和数据采集方式, 能显著提高高密度电法探测结果的有效性和精度。

关键词: 多年冻土; 塔基基础; 高密度电法; 活动层厚度; 地下冰

中图分类号: P631; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0684-09

0 引言

多年冻土区输电线路塔基基础的稳定性主要受基础与周围冻土的冻结力和桩端承载力影响^[1], 因此塔基基础的稳定性与周围冻土特征密切相关。不同类型基础由于其结构差异, 受冻土的影响也不相同。具体而言, 桩基础通常直径较小、埋设深度较大, 其承载力主要来源于基础侧壁与周围冻土的冻结力; 而锥柱基础和装配式基础埋深较浅, 底部直径较大, 侧壁呈斜面或采用玻璃钢模板等消减冻结力^[2], 主要承载力来源为埋设于冻土层之上的基础底部^[3-4]。数值模拟和模型实验研究表明, 桩基础附近的冻土上限深度增加会导致桩侧壁与冻土层

的冻结力减小, 从而减小基础的承载力^[5-6]。青藏直流联网工程在多年冻土区塔基的现场监测结果也表明, 锥柱或装配式基础下部的冻土升温及地下冰融化会造成显著的塔基沉降。在监测的130个塔基中, 大约1/4表现为沉降^[7]。在加拿大北部的多年冻土区, 也发现由于冻融循环和局部多年冻土的退化, 塔基周围的冻土减少或消失, 导致基础的冻胀、沉降或倾斜, 塔身出现倾斜和弯曲, 使得杆塔废弃或需要更换^[5]。因此, 对基础附近冻土的上限和冻土地下冰空间分布的探测是评估和预测塔基基础稳定性的重要前提。

塔基周围多年冻土分布及变化通常通过钻探

收稿日期: 2022-02-22; 修订日期: 2022-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071095); 冻土工程国家重点实验室自主研究课题(SKLFSE-ZT-202106); 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司科研项目(HQ-2018-P-TS-079)资助

作者简介: 游艳辉, 副研究员, 主要从事冻土工程与冻土物探研究. E-mail: yanhui_you@lzb.ac.cn

通信作者: 俞祁浩, 研究员, 主要从事冻土环境与工程研究. E-mail: yuqh@lzb.ac.cn

或地温等进行观测,虽然这些方法可以得到最为直接的结果,但钻探会对塔基周围冻土造成一定扰动,地温观测需要预先布设温度探头,耗时耗力却仅能获取某一点的信息。此外,对于锥柱基础和装配式基础而言,由于基础底部是其承载力的主要来源,因此基础底部的多年冻土变化也是对基础稳定性影响最为重要的因素,而在运营阶段,若采用钻探方法探测基础底部冻土将会对钢筋混凝土桩基造成一定损坏。近年来,具有快速和无损探测优点的地球物理方法在多年冻土研究中获得了越来越广泛的应用。其中,高密度电法基于土体冻结和融化状态,以及高、低含冰量冻土显著的电阻率差异,在多年冻土厚度^[8]、活动层厚度、局部融区和地下冰空间分布特征^[9-10]探测中取得了良好的应用效果。

虽然冻融锋面两侧的电阻率突变有利于冻融锋面深度的识别,但在电阻率梯度较大情况下,高阻体内部的探测精度和可靠性可能会大幅降低^[11-12]。如高密度电法应用在石冰川探测中发现,高阻异常体下部的灵敏度是最低的,而低敏感区经常会被反演过程中的假象所干扰^[11,13],因此正反演模拟对高密度电法冻土探测尤为重要^[12]。对塔基下部冻土探测来说,混凝土基础作为高阻体,应用高密度电法识别其下部地下冰特征的可靠性还无法判断。多年冻土区上限附近电阻率差异随季节变化,在冬季活动层处于冻结状态时,与下部多年冻土层的电阻率差值会降低,因此弄清不同季节进行高密度电法探测对冻土特征的识别和分辨能力,可以对实际应用起到重要的指导作用。此外,由于高密度电法探测的不同装置对特定目标体的分辨能力差异显著^[14],在实际应用中,对塔基基础附近不同冻土特征识别时,采用分辨能力更高的数据采集方案对提高探测结果准确性也至关重要。

鉴于此,本文拟通过建立多年冻土区塔基基础不同冻土特征的正演模型,采用不同装置进行高密度电法正演计算,并根据正反演模拟结果,应用高密度电法探测青藏直流输电线路塔基基础附近的多年冻土。研究内容包括:①高密度电法对塔基附近冻土特征探测的能力和限制;②不同装置方式数据采集对冻土特征识别能力的差异;③在不同季节进行高密度电法探测对冻土特征的分辨能力。

1 正反演方法与模型

1.1 正反演模拟方法

正反演计算采用了高密度电法开源软件

BERT^[15],该软件采用有限元计算方法,并通过计算二次电位方法减少了网格数量,显著提高正反演计算速度。该软件采用非结构网格离散,能较为方便地进行局部网格加密,并在处理不规则地形和边界时具有很好的适应性^[16]。

软件的主要反演算法目标函数^[17]为

$$\Phi = \|D[d - f(m)]\|_2^2 + \lambda \|C(m - m^0)\|_2^2 \quad (1)$$

式中: $D = \text{diag}(1/\epsilon_i)$,为观测数据的误差权重; d 为观测数据; $f(m)$ 为模型正演计算结果; λ 为正则化参数; C 为常数矩阵,用来描述模型的先验特征; m^0 为先验模型; m 为电阻率模型。

1.2 正演模型

正演模型的建立主要基于青藏高原多年冻土的发育分布特征,以及对基础稳定性影响较大的冻土特征。与周围土体相比,钢筋混凝土结构基础为热的良导体,夏季会传导更多的热量进入下部冻土层中,虽然冬季也更利于冻土层的散热,但总体表现为对多年冻土加热效应,并导致基础周围更厚的活动层^[5]。监测结果表明,青藏直流输电线路基础周围的融化深度比天然场地深0.67~1.74 m^[18-19]。按照青藏高原大部分区域活动层的厚度范围^[20],设置正演模型的活动层厚度为3.0 m,在临近桩基础附近活动层厚度开始变大,在距离桩基础5~10 m范围内活动层由3.0 m变厚为3.3 m,在距桩基础0~5 m范围内活动层由3.3 m变厚为4.0 m。基础正下方的冻土特征是影响基础稳定性最重要的参数,但由于受上覆混凝土桩基础的影响,该处是地球物理方法探测的不利条件,正演模型中在基础下部设置了局部的高含冰量区域,以测试不同方法的分辨能力。在基础附近的冻土上限附近还设置了局部的高含冰量与低含冰量区域,以研究不同探测方法、不同探测季节的反演结果。据此建立的正演模型如图1所示。

根据室内不同土质类型冻结后的电阻率测试

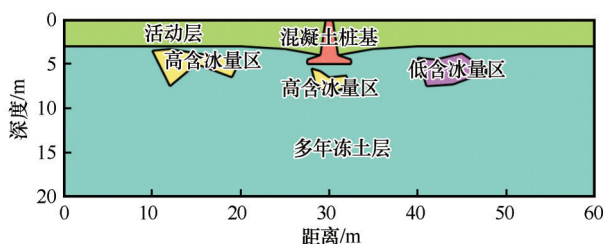


图1 多年冻土区塔基基础附近高密度电法正演模型

Fig. 1 Forward modeling of high density electrical resistivity tomography around tower foundations in permafrost regions

以及青藏高原多年冻土区已有高密度电法探测结果,西大滩季节冻结层电阻率为 $1\,000\sim1\,500\,\Omega\cdot\text{m}$,多年冻土层电阻率为 $1\,500\sim2\,500\,\Omega\cdot\text{m}$ ^[21];在青藏铁路沿线物探研究中,发现融土电阻率小于 $800\,\Omega\cdot\text{m}$,季节冻土冻结电阻率为 $1\,000\sim1\,500\,\Omega\cdot\text{m}$,多年冻土电阻率为 $1\,500\sim2\,700\,\Omega\cdot\text{m}$ ^[22]。青藏高原大量发育的高矿化度泥岩主要由细颗粒组成,且含盐量高,在冻结后电阻率显著低于其他地层,青藏高原

楚玛尔河高平原强风化泥岩冻土层的高密度电法探测结果揭示的电阻率范围在 $100\sim1\,000\,\Omega\cdot\text{m}$ ^[23]。据此,正演模型各部分的电阻率设置如表1所示。其中活动层、多年冻土层电阻率分别为 $300\,\Omega\cdot\text{m}$ 和 $1\,000\,\Omega\cdot\text{m}$,高、低含冰量区域电阻率分别为 $3\,000\,\Omega\cdot\text{m}$ 和 $500\,\Omega\cdot\text{m}$ 。混凝土基础的电阻率值范围与其干湿状态相关,通常在较为干燥的条件下其电阻率值约为 $900\,\Omega\cdot\text{m}$ 。

表1 高密度电法正演模型参数

Table 1 Parameters for forward modeling of high density electrical resistivity tomography						
模型参数	活动层(融化)	活动层(冻结)	冻土层	高含冰量区	低含冰量区	混凝土基础
电阻率/($\Omega\cdot\text{m}$)	300	800	1 000	3 000	500	900
深度/m	3.0~4.0	3.0~4.0	>3.0	3.3~7.5	3.8~7.5	5.0

1.3 模型网格化及不同装置的正演计算

正演计算地表共设置40个电极,电极距1.5 m,第一根电极位置从0.75 m开始,正演模型的计算网格如图2所示。为提高正演模型的数值计算精度,在电极位置以下一定深度(10 cm)对网格进行了局部加密。同时为兼顾计算精度和速度,网格总体为浅部密集、深部稀疏。活动层、冻土层、高含冰量区、低含冰量区的最大网格面积不超过0.5,冻土层的最大网格面积不超过1。根据高密度电法常用数据采集方式^[24],分别采用了温纳 α 、温纳 β 、偶极-偶极、施伦贝格装置计算视电阻率值,各种装置均在活动层分别处于冻结和融化状态时进行了计算。考虑到仪器和环境噪声影响,所有计算结果的视电阻率值均叠加3%的随机噪声。

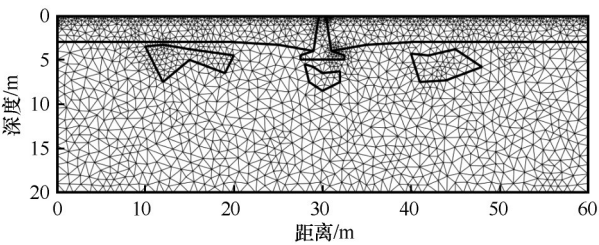


图2 正演模型的有限元计算网格
Fig. 2 Finite element computational grid for forward modelling

在活动层处于融化状态时,不同装置的正演视电阻率分布如图3所示。其分布特征区别较为显著,其中温纳装置的数据覆盖度相对偶极-偶极和施伦贝格装置较低。对地表的混凝土桩基所在位置,偶极-偶极装置结果表现为近“八”字形的高

视电阻率,施伦贝格则表现为垂直的高视电阻率区域。

2 塔基冻土探测在不同季节的反演结果

2.1 活动层融化时的探测反演结果

在活动层处于融化状态时,不同装置的反演结果如图4所示。在相同的测线长度和电极间距的条件下,温纳 α 、偶极-偶极、施伦贝格装置的探测深度约为17 m,而温纳 β 装置的探测深度小于10 m。总体而言,不同装置的反演结果均能反映出低阻的活动层、高阻的多年冻土层以及较高电阻的混凝土基础。不同装置的探测结果中,活动层与多年冻土层界面均可以通过沿深度方向上的电阻率突变得以识别,也能识别出桩基附近更深的冻土上限特征,反演结果与正演模型吻合较好。

但各种装置对多年冻土层内的地下冰空间差异性分辨相对较差,对识别多年冻土层内的局部高、低含冰量区域的差别均存在困难。相对而言,偶极-偶极装置反演结果冻土层内部的电阻率呈现较小的空间差异,在一定程度上反映了地下冰的空间差异,但高、低含冰量区域的空间位置均显著大于正演模型。其余装置的反演结果更难以识别出地下冰的空间分布差异。其原因在于夏季活动层融化时,活动层与多年冻土层的电阻率差别较大,冻土层电阻率是活动层电阻率值的3倍多。电流在地下传播时大多集中于活动层,而仅有很小部分能在高阻的多年冻土层中传播,因而对多年冻土层内部的分辨率较差。

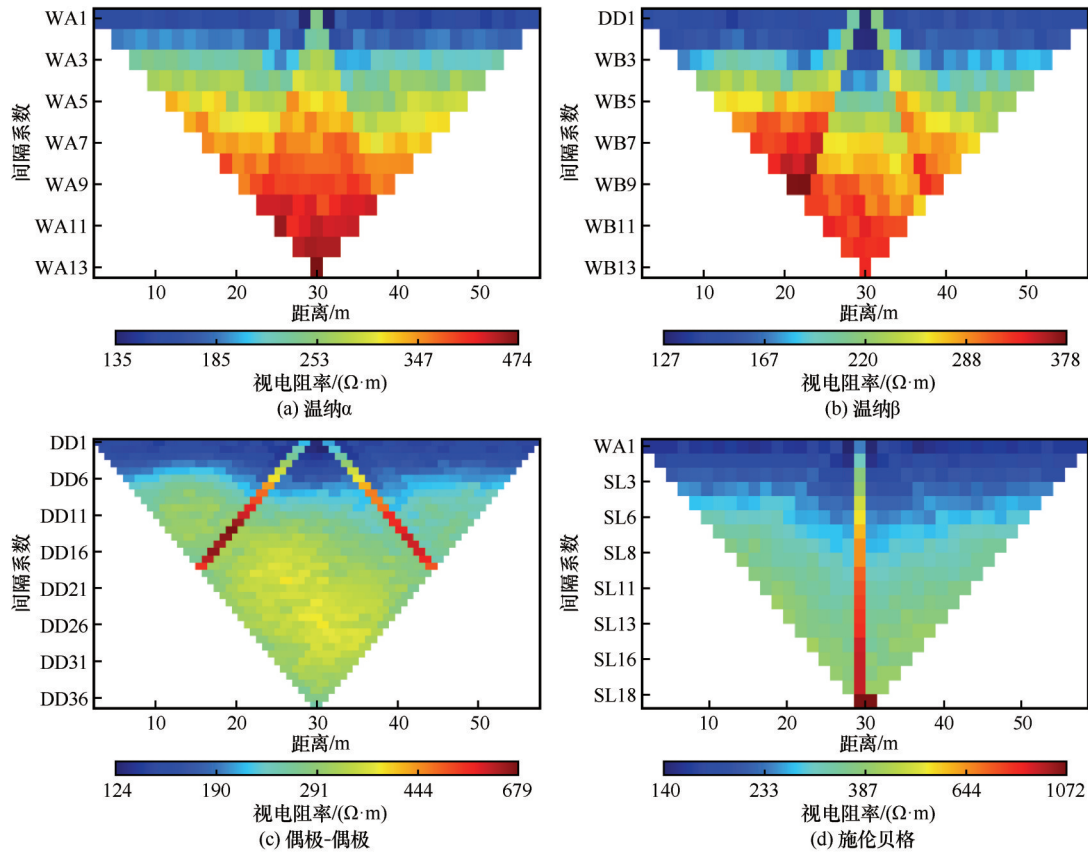


图3 不同装置的正演视电阻率

Fig. 3 Forward apparent resistivity using different types of arrays: Wenna alpha (a), Wenna beta (b), dipole-dipole (c) and Schlumberger (d)

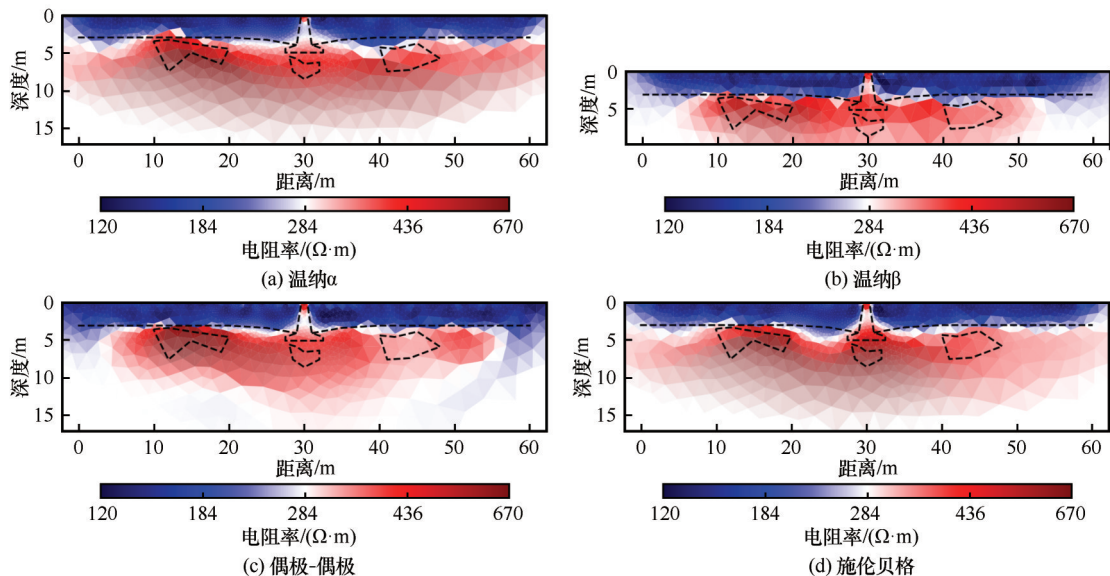


图4 活动层融化时不同装置的高密度电法反演结果(黑色虚线表示正演模型结构)

Fig. 4 Inversion results of high density electrical resistivity tomography using different types of arrays when the active layer thaws out: Wenna alpha (a), Wenna beta (b), dipole-dipole (c) and Schlumberger (d)

(The black dashed lines represent configurations in forward modeling)

2.2 活动层冻结时的探测反演结果

在原正演模型的基础上,假设活动层处于冻结

状态(将活动层电阻率设置为 $800 \Omega \cdot m$),其他参数保持不变,由此得到的不同装置的反演结果如图5

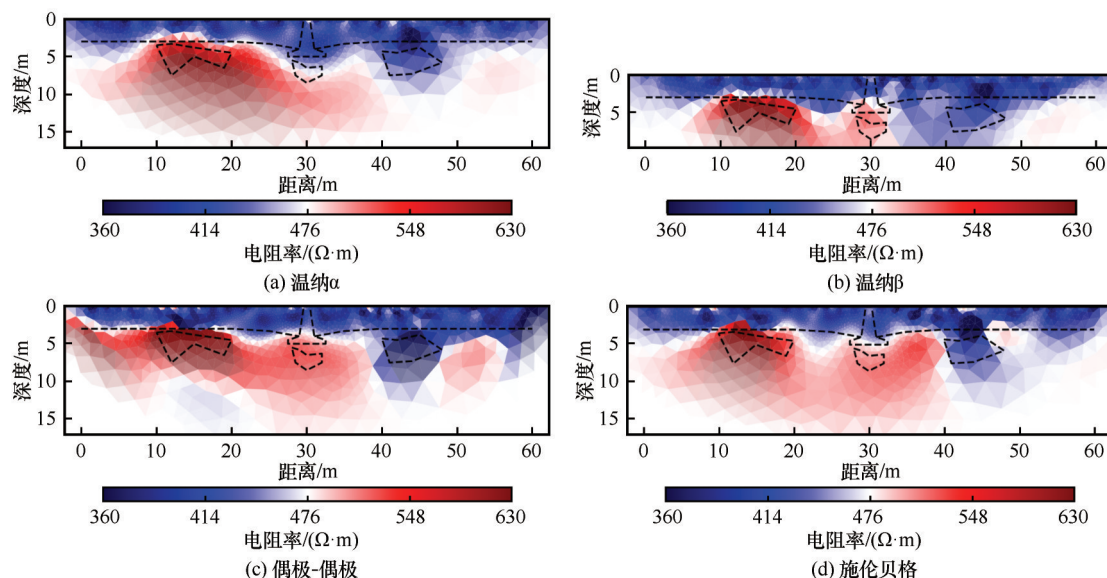


图5 活动层冻结时不同装置的高密度电法反演结果(黑色虚线表示正演模型结构)

Fig. 5 Inversion results of high density electrical resistivity tomography using different types of arrays when the active layer is frozen: Wenna alpha (a), Wenna beta (b), dipole-dipole (c) and Schlumberger (d)

(The black dashed lines represent configurations in forward modeling)

所示。可以看出,在冬季活动层冻结条件下,不同装置对活动层深度的分辨均差于夏季活动层融化时,而且在活动层内部,均出现了电阻率高低间隔分布的假象。但所有装置对冻土层内部的地下冰空间分布分辨能力均显著提高。在对多年冻土层内的低含冰量区域识别方面,温纳 β 、偶极-偶极和施伦贝格均呈现较为明显的低阻异常区,但温纳 β 和施伦贝格探测结果的低阻异常区下边界与正演模型误差较大,偶极-偶极装置有更好的分辨率。在对高含冰量区域识别方面,偶极-偶极装置对高含冰量区域的埋深和几何特征识别精度也相对较高。

可见,多年冻土区冬季活动层完全冻结时,虽然活动层电阻率值仍然小于含冰量较低的多年冻土层,由于冻结活动层与多年冻土层的电阻率差值显著减小,使得更多的电流能流入多年冻土层内部,提高了对冻土层内部地下冰空间分布特征分辨能力。

从上述正反演模拟结果可以看出,在暖季活动层处于融化状态时,由于多年冻土区冻融锋面附近电阻率突变的地电结构,虽有利于探测输电线路基础附近的多年冻土上限空间起伏,但给识别多年冻土层内地下冰空间分布特征带来困难。由于多年冻土区活动层具有季节冻结和融化的特点,在冬季活动层处于冻结状态时,虽然不利于活动层厚度的

识别,却有利于分辨基础附近多年冻土层内地下冰的空间分布。

3 青藏直流输电线路在多年冻土区的塔基探测结果

为研究高密度电法对输电线路基础施工和基础热扰动对附近的冻土地下冰的影响,根据正反演模拟结果,在活动层处于冻结状态时,采用偶极-偶极装置数据采集将会取得更好的探测效果。于2014年4月在青藏直流输电线路位于五道梁地区塔基进行了高密度电法数据采集(图6)。该塔基为锥柱基础,基础最大埋深5 m。该测线地形较为平坦,地表为较为干燥的砂砾碎石土,经过塔基正下方。数据采集电极距1 m,共布设40个电极,测线总长度39 m。采用仪器为美国AGI公司生产的SUPERSTING R8型多通道高密度电法仪。在垂直测线方向,距离测线末端约15 m处布设有一地温监测孔,孔深15 m,于2012年5月完成。钻探过程中记录了地层岩性信息和地下冰信息,钻孔完成后布设了热敏温度探头进行地温观测。

高密度电法的反演结果如图7所示,反演剖面中沿深度方向上主要呈现浅部高阻、深部低阻的特征。根据在测线末端附近钻孔处的地温监测数据(图8),高密度电法数据采集时测线下部已经完全回冻,地表以下15 m深度内的地温低于 -1.2°C ,因

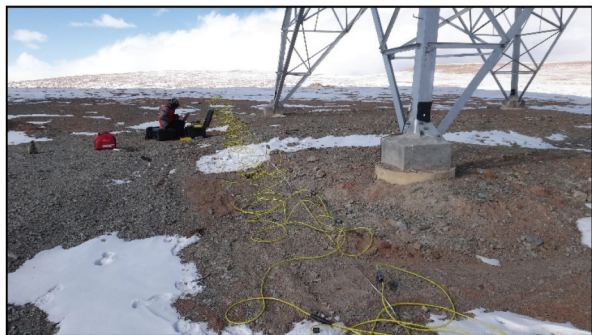


图6 青藏直流输电线路塔基附近高密度电法数据采集现场照片

Fig. 6 Field photo of data collection by high density electrical resistivity tomography around a tower foundation along Qinghai-Tibet Power Transmission Line

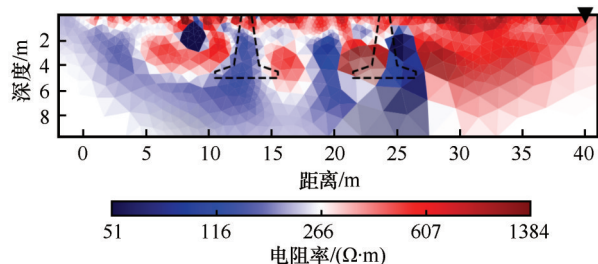


图7 高密度电法反演结果(黑色虚线表示塔基锥柱基础, 右侧黑色倒三角表示距离约15 m处的钻孔)

Fig. 7 Inversion results of high density electrical resistivity tomography (The black dashed lines indicate tower cone-column foundations, and the black inverted triangle on the right indicates the borehole at a distance of about 15 m)

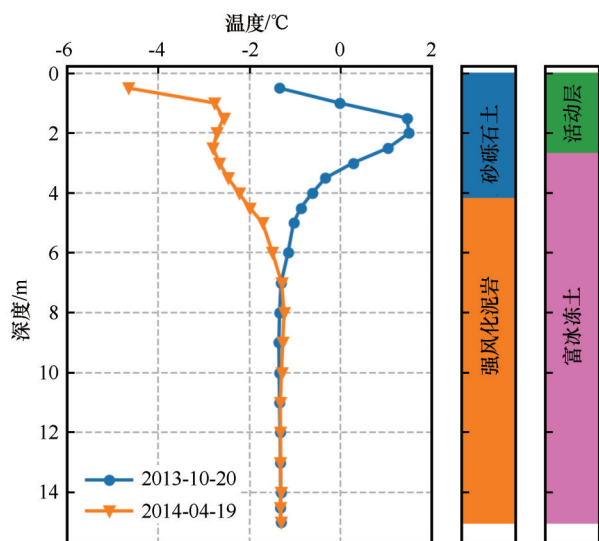


图8 高密度电法测线附近钻孔的地温、地层岩性和冻土特征(钻孔位置见图7)

Fig. 8 Ground temperatures, soil texture and permafrost characteristics of the borehole around a survey line of high density electrical resistivity tomography (Location of the borehole is shown in Fig. 7)

此,测线浅部高阻层为处于冻结状态的活动层。钻孔岩芯还揭示了2.7 m以下深度为富冰冻土,与测线水平距离27~40 m范围内约3 m以下深度高阻异常区对应良好。钻孔揭示的浅层为砂砾石土,其冻结后电阻率高于深部的细颗粒的强风化泥岩多年冻土层。测线水平距离0~27 m范围内,浅层电阻率高低相间分布,约5 m以下为低阻异常区,表明了浅层岩性的不均一,以及塔基施工后回填土与原位土的土质差异,而深部的地下冰含量显著较低。

在测线27~40 m范围内,由于未受到施工扰动和塔基热效应影响,天然状态的高含冰量冻土得以保存。而由于受到施工扰动和塔基热效应的影响,在测线10~27 m范围内,尤其是在塔基正下方和两个基础中间的位置,地下冰发生了较为显著的退化。可见,高密度电法探测结果能较为详细地评估输电线路桩基附近地下冰空间分布特征、施工扰动及塔基热扰动对地下冰的影响,比钻探仅能获取某点状信息具有明显优势。

反演结果说明高密度电法能较为精细地探测出基础附近的多年冻土地下冰分布特征,而根据冻土分布特征建立的地电模型进行正反演实验设计,选择合适的探测时机,最优的数据采集方案,对提高探测精度和可靠性起到了重要的指导作用。

4 讨论

观测数据的有限(只能在空间或时间上的插值),以及观测数据存在误差是反演结果非唯一性的主要原因^[25]。高密度电法获得的电阻率模型强烈依赖于数据质量、测量排列、和反演参数的选择。当反演问题是病态或不稳定的,数据中任意小的误差都能导致反演结果中非常大的误差。如对于不同地点的最大视电阻率值的解释可能有以下因素:相对高的含冰量、冰川成因的地下冰、不同反演参数的选择、数据采集装置、由于等效原理引起的错误^[26]。

导致解释结果不确定性的另一影响因素为电阻率与目标特征的关系模型。通常情况下,由于地下冰含量是影响冻土电阻率变化的重要因素,因此反演高阻异常一般预示着较高的地下冰含量^[27]。但实际情况下,影响冻土电阻率的因素众多。由于冻土导电主要取决于未冻水含量高低及其连通性水平^[28],与之相关的因素也就能影响冻土电阻率。温度、土壤类型、含盐量等是影响未冻水含量的重

要因素^[29],未冻水含量通常随冻土温度降低呈指数函数关系降低^[30]、细颗粒土由于具有更大的比表面积在相同温度情况下比粗颗粒土具有更高的未冻水含量^[31]、冻土中的未冻水含量还随含盐量增大而急剧增大^[29]。地下冰结构通过影响未冻水连通性影响电阻率,其中整体状地下冰以孔隙冰为主,未冻水膜基本连续具有相互连通的通道,相对而言具有较低的电阻率,而层状地下冰中电流受冰透镜体阻挡,在与整体状结构相同的含冰量情况下具有更高的电阻率^[28,32]。

因此,在缺乏高密度电法测线处的地质岩性和地温等信息时,根据反演电阻率解释地下冰含量可能会带来较大的不确定性。实际应用时,常需要结合钻探获取的地下冰信息和地温观测数据^[8-9,33]辅助解释高密度电法数据,以降低解释结果的不确定性。本文通过正反演模拟,对输电线路基础附近地下冰探测的数据采集方式、数据采集时机进行了研究,以提高对目标体识别的精度。同时,根据测附近钻孔的地温观测数据、地层岩性和地下冰含量信息,对最终解释起到了验证和约束的作用。

5 结论

(1)基于对输电线路基础附近多年冻土地电模型的正反演模拟,发现高密度电法对基础多年冻土特征识别精度与探测季节、装置方式等密切相关。在探测实验设计阶段,通过正反演模拟,掌握高密度电法在特定条件下的能力和限制,提出最优的实验方案对提高探测结果精度和可靠性具有重要作用。对多年冻土区地下冰探测来说,融化活动层与下部冻土之间显著的电阻率差异虽然便于活动厚度探测,却降低了对地下冰空间分布识别的可靠性。由于多年冻土区活动层具有季节冻融的特性,在活动层处于冻结状态时进行探测能显著提高对地下冰识别能力。

(2)选择最优数据采集方式和时机有助于提高对冻土层电阻率空间分布的分辨能力,但受到土质类型、含盐量、地下冰类型等众多因素的影响,地下冰与电阻率关系复杂,对反演电阻率模型解释时需要结合地温、地层岩性等尽可能多的已知信息,以提高对地下冰分布探测的准确性。

(3)为研究高密度电法因施工扰动和塔基热效应应对附近冻土地下冰的影响,根据多年冻土区塔基冻土模型的正反演结果,在活动层处于冻结状态时

采用偶极-偶极装置方式对青藏直流输电线路塔基基础进行了探测。结合已有钻孔测温信息,揭示了塔基周围冻土地下冰的二维空间分布特征,探测结果有效反映了施工扰动和基础热效应造成的周围地下冰的退化,能为评估基础与多年冻土相互作用、潜在的工程病害提供重要依据。

参考文献(References):

- [1] Andersland O B, Ladanyi B. Frozen ground engineering [M]. 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2004.
- [2] Wen Zhi, Yu Qihao, Ma Wei, et al. Direct shear tests for mechanical characteristics of interface between Qinghai-Tibetan silt and fiberglass reinforced plastics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Suppl 2): 45-50. [温智, 俞祁浩, 马巍, 等. 青藏粉土-玻璃钢接触面力学特性直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 45-50.]
- [3] Yu Qihao, You Yanhui, Ding Yansheng, et al. Analysis of heat transfer characteristics of frozen soil foundation in Qinghai-Tibet DC Transmission Line project [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Suppl 2): 4025-4031. [俞祁浩, 游艳辉, 丁燕生, 等. 青藏直联工程冻土基础传热特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 4025-4031.]
- [4] Wang Guoshang, Yu Qihao, You Yanhui, et al. Problems and countermeasures in construction of transmission line projects in permafrost regions [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2014, 6(5): 432-439.
- [5] Duan Xili, Naterer G F. Ground heat transfer from a varying line source with seasonal temperature fluctuations [J]. Journal of Heat Transfer, 2008, 130(11): 11302.
- [6] Wang Jianzhou, Li Shengsheng, Zhou Guoqing, et al. Analysis of bearing capacity of pile foundation in high temperature permafrost regions with permafrost table descending [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Suppl 2): 4226-4232. [王建州, 李生生, 周国庆, 等. 冻土上限下移条件下高温冻土桩基承载力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 4226-4232.]
- [7] Guo Lei, Xie Yanli, Yu Qihao, et al. Displacements of tower foundations in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 121: 187-195.
- [8] You Yanhui, Yu Qihao, Pan Xicai, et al. Application of electrical resistivity tomography in investigating depth of permafrost base and permafrost structure in Tibetan Plateau [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 87: 19-26.
- [9] You Yanhui, Wang Jingcang, Wu Qingbai, et al. Causes of pile foundation failure in permafrost regions: the case study of a dry bridge of the Qinghai-Tibet Railway [J]. Engineering Geology, 2017, 230 (Suppl C): 95-103.
- [10] You Yanhui, Yang Mingbin, Yu Qihao, et al. Investigation of an icing near a tower foundation along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 121: 250-257.
- [11] Marescot L, Loke M H, Chapellier D, et al. Assessing reliability of 2D resistivity imaging in mountain permafrost studies using the depth of investigation index method [J]. Near Surface Geophysics, 2003, 1(2): 57-67.
- [12] Hilbich C, Marescot L, Hauck C, et al. Applicability of elec-

- trical resistivity tomography monitoring to coarse blocky and ice-rich permafrost landforms [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2009, 20(3): 269-284.
- [13] Rings J, Hauck C. Reliability of resistivity quantification for shallow subsurface water processes[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 68(3): 404-416.
- [14] Dahlin T, Zhou Bing. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays[J]. *Geophysical Prospecting*, 2004, 52(5): 379-398.
- [15] Günther T, Rücker C. Boundless electrical resistivity tomography BERT 2: the user tutorial[R/OL]. [2022-04-11]. <http://resistivity.net/download/bert-tutorial.pdf>.
- [16] Rücker C, Günther T, Spitzer K. Three-dimensional modelling and inversion of DC resistivity data incorporating topography: I. modelling[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 166(2): 495-505.
- [17] Günther T, Rücker C, Spitzer K. Three-dimensional modelling and inversion of DC resistivity data incorporating topography: II. inversion[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 166(2): 506-517.
- [18] Li Guoyu, Yu Qihao, Ma Wei, et al. Freeze-thaw properties and long-term thermal stability of the unprotected tower foundation soils in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 121: 258-274.
- [19] You Yanhui, Yu Qihao, Guo Lei, et al. In-situ monitoring the thermal regime of foundation backfill of a power transmission line tower in permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 98: 271-279.
- [20] Wu Qingbai, Zhang Tingjun. Changes in active layer thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995 to 2007 [J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D9) [2022-04-11]. <https://doi.org/10.1029/2009JD012974>.
- [21] Li Laixi, Han Yongqi. The establishment of the frozen earth geophysical medels for Qinghai-Tibet Railway[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2002, 26(1): 71-74. [李来喜, 韩永琦. 青藏线冻土地球物理模型的建立[J]. *物探与化探*, 2002, 26(1): 71-74.]
- [22] Wang Wenlong. The selection and effectiveness of geophysical methods in the exploration of perpetually frozen ground along the Qinghai-Tibet Railway [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27(2): 150-154. [王文龙. 青藏铁路多年冻土勘察的物探方法选择及其应用效果[J]. *物探与化探*, 2003, 27(2): 150-154.]
- [23] You Yanhui, Yu Qihao, Pan Xicai, et al. Geophysical imaging of permafrost and talik configuration beneath a thermokarst lake[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2017, 28(2): 470-476.
- [24] Loke M H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys[R/OL]. [2022-04-11]. http://web.gps.caltech.edu/classes/ge111/Docs/DCResistivity_Notes.pdf.
- [25] Oldenburg D W, Li Yaoguo. Chapter 5: inversion for applied geophysics: a tutorial[M]// Butler D K. *Near-surface geophysics*. Tulsa, OK, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2005: 89-150.
- [26] Hauck C, Vonder Mühl D. Inversion and interpretation of two-dimensional geoelectrical measurements for detecting permafrost in mountainous regions [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, 14(4): 305-318.
- [27] Gu Zhongwei, Zeng Zhonggong. Research status at home and abroad on permafrost geophysical exploration [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1979, 1(1): 74-81. [顾钟炜, 曾仲巩. 国内外冻土物探研究概况[J]. *冰川冻土*, 1979, 1(1): 74-81.]
- [28] Fortier R, Allard M, Seguin M-K. Effect of physical properties of frozen ground on electrical resistivity logging [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1994, 22(4): 361-384.
- [29] Dafflon B, Hubbard S, Ulrich C, et al. Geophysical estimation of shallow permafrost distribution and properties in an ice-wedge polygon-dominated Arctic tundra region [J]. *Geophysics*, 2016, 81(1): WA247-WA263.
- [30] Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. *Physics of frozen soil* [M]. Beijing: Science Press, 2001. [徐学祖, 王家澄, 张立新. *冻土物理学* [M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [31] Coperey A, Revil A, Stutz B. Electrical conductivity versus temperature in freezing conditions: a field experiment using a basket geothermal heat exchanger [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(24): 14531-14538.
- [32] Bogolyubov A. Investigation of dependence of specific resistance of unconsolidated frozen deposits in original bedding on cryogenous textures and temperature [C]// *Proceedings of 2nd International Conference on Permafrost*. Washington, D. C. : National Academy of Sciences, 1973: 482-485.
- [33] Lewkowicz A G, Etzelmüller B, Smith S L. Characteristics of discontinuous permafrost based on ground temperature measurements and electrical resistivity tomography, southern Yukon, Canada [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2011, 22: 320-342.

Application of high density electrical resistivity tomography in investigating the permafrost around tower foundations of power transmission line

YOU Yanhui¹, LI Dangmin², SHAN Bo², TIAN Shengxiang³, WANG Xinbin¹, YU Qihao¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China; 3. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China)

Abstract: Stability of foundations supporting power transmission lines in permafrost regions is closely related to the surrounding active layer thickness and ground ice variations. Thermal disturbance during the construction and heat effect of the concrete foundations tend to thaw the surrounding permafrost, endangering stability of the towers. The electrical resistivity tomography (ERT) method is frequently used in engineering and environmental research in permafrost regions. The reliability and limitation of ERT investigation are related to geoelectrical structures and array used for data collection. We reduced the uncertainty by forward and inverse modeling the geoelectrical models, which represent the permafrost around tower foundations. The results show that the active layer thickness can be effectively detected using different types of arrays, but the spatial distribution of ice-rich and ice-poor permafrost is barely identified when the active layer thaws out. The reliability of ground ice identification improves significantly if the ERT data are collected when the active layer is frozen. Under this condition, the dipole-dipole array shows a better ability to explore configurations of ice-poor and ice-rich permafrost. Effectiveness of the method was verified for tower foundations investigation in permafrost regions along Qinghai-Tibet Power Transmission Line. Degradation of ground ice due to the construction disturbance and heat effects of the concrete foundations were effectively identified. The results indicate that forward and inverse modelling can provide essential insights in designing experiment and collecting data. In this way, the reliability and resolution of ERT in investigating the permafrost characteristics can be significantly improved.

Key words: permafrost; tower foundations; high density electrical resistivity tomography; active layer thickness; ground ice

(责任编辑: 李国玉)