

doi: 10.11720/wtyht.2022.1386

王辉,付书计,葛帅寅,等.免维护超低噪声固体不极化电极的研制与性能测试[J].物探与化探,2022,46(3):714-721.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1386

Wang H, Fu S J, Ge S Y, et al. Development and performance tests of maintenance-free ultra-low noise solid nonpolarizing electrodes[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 714-721. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1386

免维护超低噪声固体不极化电极的研制与性能测试

王辉^{1,2}, 付书计², 葛帅寅², 马方圆², 宋宝家², 罗景程³

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 3. 中国煤炭地质总局 勘查研究总院, 北京 100039)

摘要: 针对传统不极化电极极差稳定性差、低频噪声大、寿命短、需要定期维护等缺点, 研制出免维护超低噪声固体 Pb-PbCl₂ 不极化电极。室内测试结果表明: 所研制的电极极差在一个月内漂移小于 0.06 mV, 只有法国进口 PMS9000 电极的 5%; 温度系数小于 20 μV/°C, 不到 PMS9000 电极的 1/5; 在 100 m 电极距条件下, 相对于天然感应电场的信噪比为 40 dB@10³ s、20 dB@10⁴ s 和 10 dB@10⁵ s。野外对比测试表明: 利用新研制的固体不极化电极可以明显提高对地电场信号的采集精度, 显著提升大地电磁死频带和低频段数据质量。

关键词: 固体不极化电极; 地电场观测; 极差; 温度系数; 大地电磁

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)03-0714-08

0 引言

不极化电极是接收地电场信号的传感器, 一般通过在地表、井中或水下布设电极, 测量地电场或地电位随时间的变化来研究地下介质导电性^[1]、地下水位置及流向^[2]、污染物迁移^[3]等。实际地电场是通过测量两个电极之间的电位差得到的, 测量结果还包含了电极自身之间的极化电位差(简称极差), 以及电极与土壤之间的接触电位差^[4]。由于电极底部与土壤之间的接触电位差远小于电极自身的极差, 工作时可以忽略不计, 而电极极差及其变化则可能超过电场有效信号, 因此, 电极极差大小及其稳定性将直接影响对地电场信号的观测质量。

金属—金属盐溶液不极化电极, 其噪声小, 极差较稳定, 应用最为广泛。目前最常用的有 Cu-CuSO₄^[5]、Ag-AgCl^[6] 和 Pb-PbCl₂ 电极^[7]。Cu-CuSO₄ 电极是将铜棒放入饱和的硫酸铜溶液中, 野外可以

自行配置电解液组装电极。但由于是液体电极, 电极与土壤接触时硫酸铜容易流失, 导致极差发生变化, 因此 Cu-CuSO₄ 电极只能用于对地电场的短期观测, 如时间域激发极化法的测量。Ag-AgCl 电极稳定性较好, 温度系数较低, 但由于成本较高, 目前主要应用于海洋电场数据的采集^[8-9]。20 世纪 70 年代, 法国研制出 Pb-PbCl₂ 电极^[4], 并对不同的不极化电极进行了 1 a 的对比测试, 结果表明 Pb-PbCl₂ 电极具有极差小、温度系数低、噪声低等优良特性^[10]。2000 年, Petiau 详细讨论了电极内部电解质组成、pH 值、温度和电极结构等因素对电极极差的影响, 研制出极差稳定和寿命超过 10 a 的第二代 Pb-PbCl₂ 电极^[11], 逐渐成为陆地最常用的一种固体不极化电极。Perrier^[12] 对该电极进行长达 14 a 的测试, 发现电极极差在前 3 年较稳定, 随后极差变化将超过几个 mV, 寿命远不如预期。在国内, 陆阳泉等^[13] 研制出 Pb-PbCl₂ 电极, 2 个电极极差小于 1 mV, 24 h 极差变化小于 0.1 mV。宋艳茹等^[14] 设计

收稿日期: 2021-07-13; **修回日期:** 2022-01-03

基金项目: 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(SKLCRSM21KFA07); 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室大学生科技创新计划项目(SKLCRSM20DC07); 国家自然科学基金项目(41604064); 中国高校基本科研业务费(2022YQDC02, 2021YJSDC08)

第一作者: 王辉(1987-), 男, 副教授, 湖南郴州人; 主要从事地球电磁学及电法勘探研究工作。Email: wanghui@cumtb.edu.cn

了一种分体式可拆解结构的非极化电极,用于调节电极离子交换速度和内阻,电极极差的变化在 24 h 内小于 0.1 mV。王辉等^[7]对电极电解质和结构进行了改进,试制出长时间稳定的 Pb-PbCl₂ 电极,野外实测表明该电极可以提高低频电场的采集精度。姜健^[15]设计了适用于井—地电阻层析成像(ERT)的非极化电极,并对 pH 值、电解质填充物状态、电解质配比等因素对电极性能的影响进行了实验研究。尚延杰^[16]改进了电极结构和填充剂,设计出多层结构凝胶非极化电极,并测试了电极的极差稳定性和温度系数,极差漂移一个月约为 0.3 mV,温度系数约为 1 mV/C°。

近年来,虽然国内外固体非极化电极的性能有了很大提升,但在实际应用中,仍存在以下 4 个明显不足:① 需要定期维护,将电极放置在饱和或过饱和的盐水中,俗称“泡电极”;② 寿命短,由于野外使用过程中电极电解质的损耗,尤其是水分的流失,导致电极内阻急剧增大,电极使用寿命一般不超过 1 a,无法用于对地电场的长期观测;③ 电极极差稳定性较差,低频噪声较大,导致观测时间再长也难以获得周期超过 10 万 s 的电场有效信号^[17];④ 电极温度系数较大,通常在 0.1~1 mV/C°,对于温差较大的地区,即使深埋电极也难以降低由温度变化引起的噪声。

为了解决非极化电极在实际应用中存在的以上诸多问题,经过十几年的不断改进和测试,针对野外不同观测方法要求,研制出多种型号固体 Pb-PbCl₂ 非极化电极,并对其进行室内测试与第三方野外对比实验。

1 固体 Pb-PbCl₂ 非极化电极的研制

影响非极化电极极差稳定性的主要因素有两个:电极内部电解质组成和电极结构。电解质的主要作用是使得金属导体(Pb)与金属盐离子(Pb²⁺、Cl⁻)形成双电层时的极化电位保持稳定。但电极掩埋在地下之后,由于电解质中离子与土壤中离子成分不同、浓度不同,离子发生扩散作用,导致电解质中离子(Pb²⁺、Cl⁻)浓度降低,引起极差发生变化。另外,电极外部结构对减缓离子的扩散也具有重要作用,通过在电解质中加入含氯离子的盐类和减小电解质与外部环境接触的横截面积,可以大大延缓离子浓度变化的时间,延长电极的使用寿命^[7,11]。

从 2008 年开始,试制了多组不同配比的电解质,最终研制的固体非极化电极电解质的主要成分

为氯化铅、氯化钠、蒸馏水、高岭土、盐酸等,以上物质的纯度应在化学纯及以上,尽可能减小杂质对电极的影响。同时,在电极内部增加一个小通道,减小电极内部电解质各离子与外界接触时的扩散速度,延长电极的使用寿命。针对不同用途,最终研制出 5 种类型固体非极化电极,如图 1 所示。与以往电极相比,其优点在于:① 电极极差小,任意 2 个电极极差小于 0.5 mV,野外无需配对;② 无需维护,电极底部用橡胶皮套密封,底部垫上海绵,电极不再需要浸泡在饱和盐水中,电极寿命更长;③ 更便携,电极外径为 2~4 cm,重 0.15~0.4 kg;④ 电极采用全防水设计,可以用于湖底等水域电场的测量;⑤ 电极提绳设计在电极外部,不影响电极内部电解质,野外损坏后可更换。



图 1 自主研制免维护固体非极化电极实物图

Fig.1 our 5 type maintenance free solid non-polarized electrodes

2 室内电极性能测试

通常用电极的极差漂移、温度系数和噪声频谱衡量电极噪声^[4]。极差漂移是指 2 个电极自身极化电位差随时间的变化,对时间域的电法勘探而言,要求极差随时间变化越小越好。电极的温度系数是指电极极差随单位温度变化而发生的变化,温度系数越小,电极受温度影响越小。电极的噪声频谱是指电极极差的频谱,为了更直观衡量电极噪声对电场信号的影响,采用信噪比的方法评价电极噪声。参与室内电极性能测试的有自主研制的 5 种电极以及法国进口的 PMS9000 电极。测试时,将电极放入塑

料箱中,底部加入饱和盐水并垫上海绵,选用美国是德科技多通道纳伏表测量电极极差随时间的变化,采样间隔 1 min。测试结果见表 1。

下面以自主研发的 SLEL 型电极与法国进口的 PMS9000 型电极^[10-11]为例,分析这 2 种电极极差的测试结果,PMS9000 电极资料见文献[18]。

2.1 极差漂移

图 2 是 2021-11-10~2021-12-16 电极极差的变化,同时测量了温度(T)变化。由于冬季供暖,室内温度变化不大,日变化约为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,与野外电极埋入地下一定深度处的温度变化相似。图中可看出,法国 PMS9000 电极极差一个月内变化约为 1.4

表 1 室内电极性能测试结果

Table 1 Indoor electrode performance test results

电极性能	电极型号					
	IPEL	EL	LEL	SLEL	LREL	PMS9000
任意两个电极极差/mV	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	0.6
质量/kg	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4	0.25
直径/cm	3.5	2.5	3.5	3.5	3.5	3.2
高度/cm	8	16	16	21	26	18
温度系数/ $(\mu\text{V} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	<40	<40	<20	<20	<10	>100
1 天内极差漂移/mV	<10.51	<10.31	<10.11	<10.021	<10.021	<10.11
1 个月内极差漂移/mV	<111	<10.51	<10.11	<10.051	<10.051	<111
信噪比@ $100\text{m}@ 10^3\text{ s/dB}$	20	20	40	40	40	20
信噪比@ $100\text{m}@ 10^4\text{ s/dB}$	0	0	20	20	30	10
信噪比@ $100\text{m}@ 10^5\text{ s/dB}$	—	—	10	10	10	-10
使用寿命/a	1	1	2	5	10	未测试
用途	IP/SP AMT/CSAMT	IP/SP/AMT/ CSAMT/MT	MT/LMT	LMT 等对电位 的长期观测	水坝、阴极保护等对 地电位的长年观测	IP/SP/AMT/ CSAMT/MT

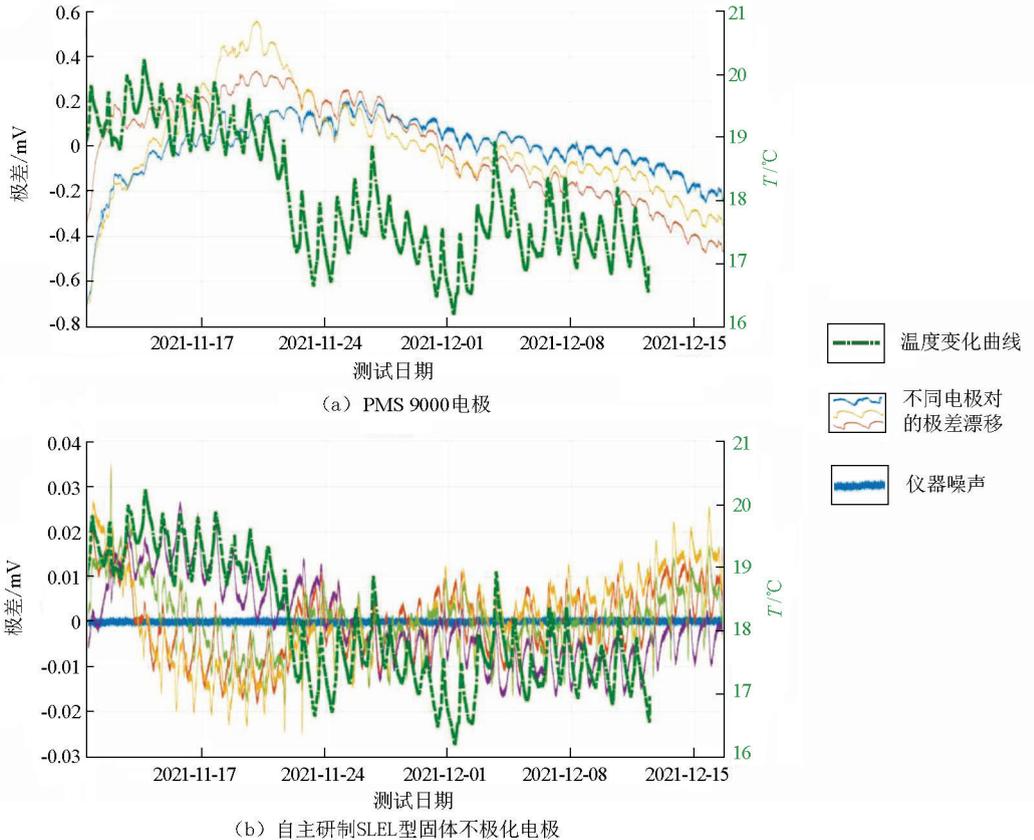


图 2 2 种型号电极的极差漂移对比

Fig.2 Comparison of potential difference between different electrodes

mV (-0.8~0.6 mV), 而自主研发的 SLEL 电极极差一个月变化不超过 0.06 mV (-0.02~0.04 mV), 不到前者的 5%。

2.2 温度系数

温度系数是指单位温度变化引起电极极差的变化。选取图 2 中 2021-11-14~2021-11-18 温度变

化较平稳的时段计算电极的温度系数, 如图 3 所示, 期间温度的日变化约为 1℃ (图 3 中绿色粗线), PMS9000 电极极差的日变化超过 0.1 mV, 温度系数大于 100 μV/℃, SLEL 电极极差的日变化约为 0.02 mV, 相应的温度系数约为 20 μV/℃, 只有进口电极的 1/5 和国内电极的 1/10^[16]。

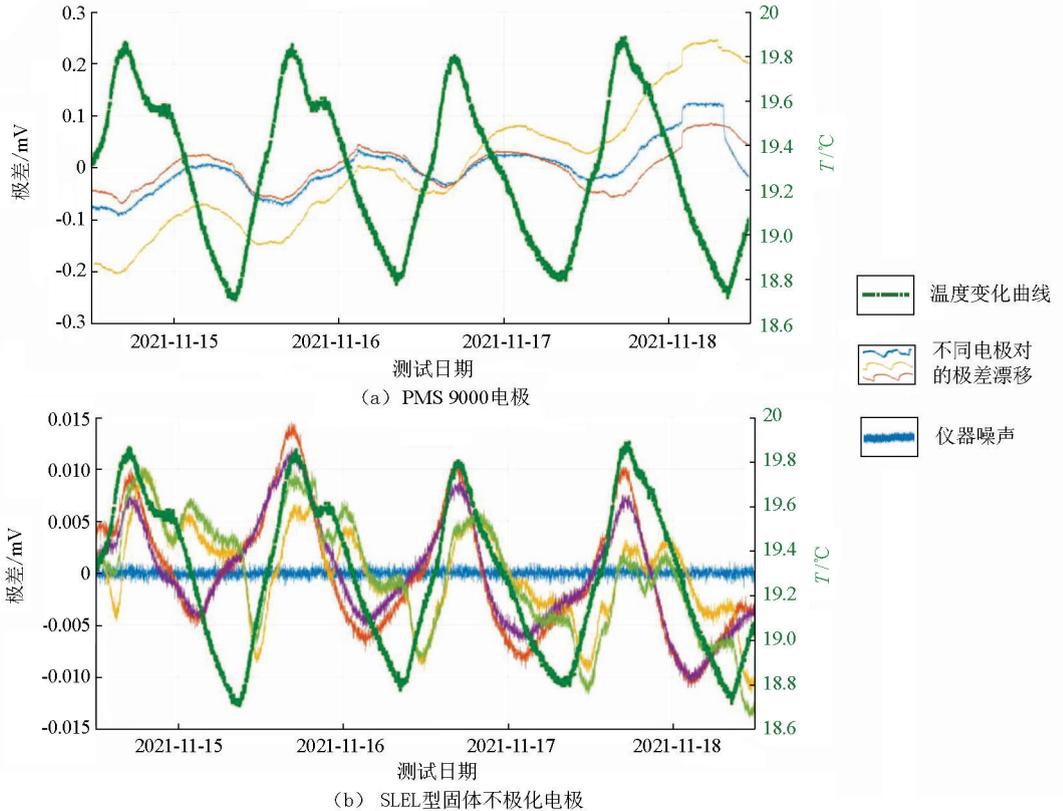


图 3 电极极差随温度的变化曲线

Fig.3 Potential difference variation with temperature

2.3 信噪比

以往采用电极极差的频谱来描述电极噪声对频率域电法数据的影响, 但极差的频谱并不能用于直观判断电极对不同频率信号的影响程度。为了定量评价电极噪声对不同频段电场信号的影响, 通过计算理想的感应大地电场信号, 用信噪比的方法衡量电极频谱噪声。具体步骤如下: 首先, 选择一个合理的地电模型, 正演得到大地电磁阻抗; 再选择实际测量的磁场数据, 通过傅里叶变换得到磁场的频谱, 根据大地电磁测深理论中电场与磁场的关系式:

$$E_x = Z_{xx} H_x + Z_{xy} H_y,$$

$$E_y = Z_{yx} H_x + Z_{yy} H_y,$$

得到理想的电场频谱; 最后, 对电场频谱进行傅里叶反变换, 得到电场的时序信号^[19]。

选择最新全球电阻率模型^[20] 正演得到大地电磁阻抗 (图 4a), 以及 2014 年我国西部噪声较小的

嘉峪关地磁台站的实测磁场数据计算电场 (图 4b)。假设电极距为 100 m, 以图 4b 中的电场信号为标准信号, 以电极极差为噪声, 计算信噪比。信噪比的定义如下:

$$SNR = 10 \lg (P_s / P_n),$$

式中: P_s 表示频域中电场信号的功率, P_n 为频域中电极极差的功率。 $SNR = 0$ dB, 表示信号功率与噪声功率相当; $SNR = 10$ dB, 表示信号功率是噪声功率的 10 倍; $SNR = 20$ dB, 表示信号功率是噪声功率的 100 倍。为了获得较好的原始数据资料, 一般要求信噪比要大于 10 dB。

PMS9000 电极和 SLEL 电极的信噪比如图 5 所示。可以看出: 在 $10^2 \sim 10^6$ s 周期范围内, SLEL 电极的信噪比明显高于 PMS9000 电极。在 $10^2 \sim 10^3$ s 周期范围内, PMS9000 电极的信噪比平均值约为 30 dB, SLEL 电极约为 40 dB, 在周期为 10^4 s 时,

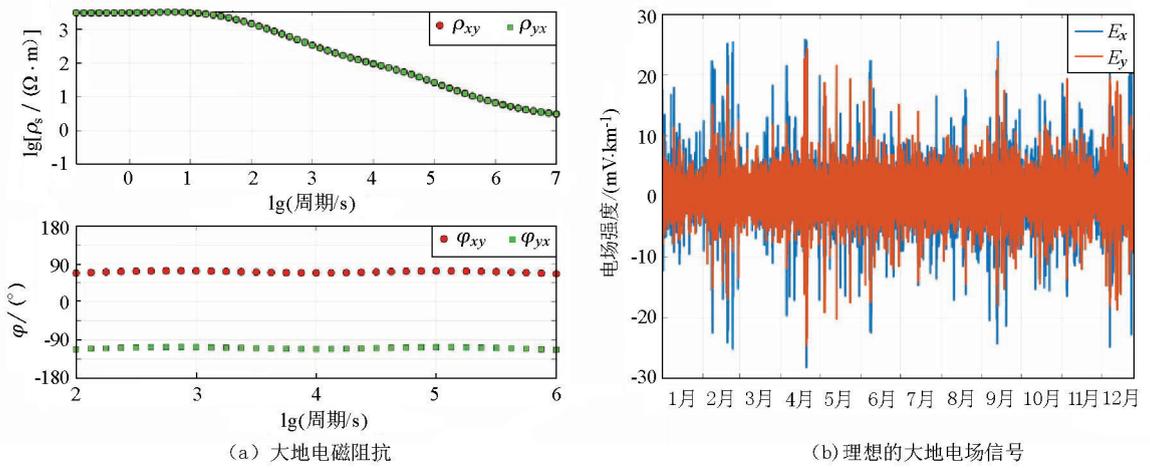


图 4 用于计算理想电场信号的大地电磁阻抗 (a) 与理想的大地电场信号 (b)
 Fig.4 MT impedance that is used to calculate the ideal induced geoelectric field signal(a) and the ideal induced geoelectric field signal(b)

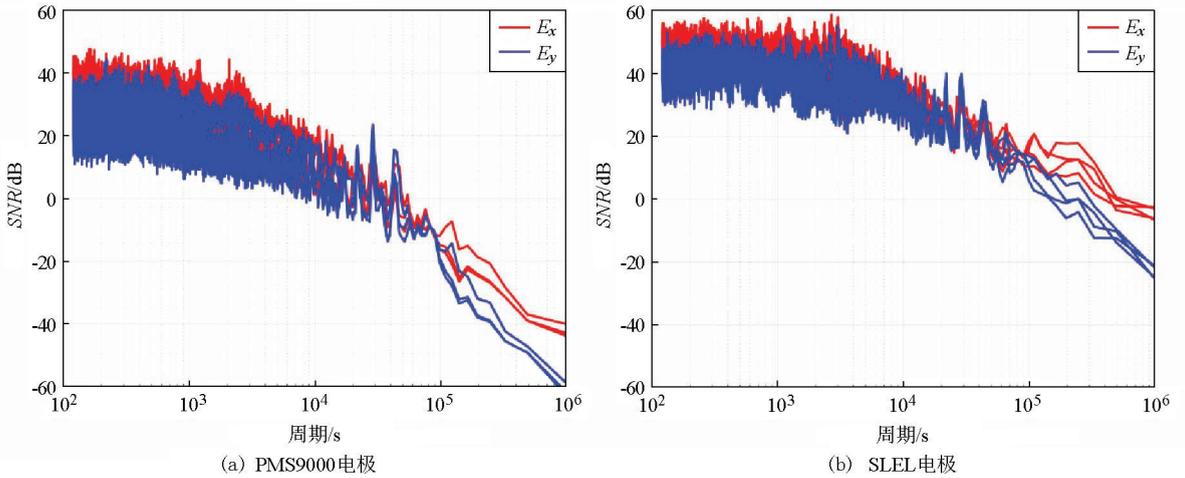


图 5 利用不同电极在 100 m 电极距情况下采集理想电场信号的信噪比
 Fig.5 Signal to noise ratio of ideal electric field signal collected with different electrodes at 100 m electrode distance

PMS9000 电极信噪比接近于 0 dB, SLEL 电极信噪比仍大于 20 dB, 这表明 PMS9000 电极难以采集到周期大于 10^4 s 的电场信号; 在 10^5 s 的超长周期, PMS9000 电极信噪比接近 -20 dB, 而 SLEL 电极的信噪比在 10 dB 左右, 仍然可以采集到较好的电场信号。由此可见, 在常规 100 m 电极距情况下, PMS9000 电极几乎不能获得低于 10^4 s 周期的信号, 而 SLEL 电极可以获得周期达到 10^5 s 的信号。

3 电极野外测试

由于自主研发的固体不极化电极具有极差稳定、温度系数低、高信噪比的显著优点, 将有助于提高对地电场的采集精度。通常磁场变化感应产生的

大地电场信号不超过 10 mV/km, 野外测量的电极距一般不超过 100 m, 地电场有效信号也就只有几百 μ V, 此时, 电极极差对天然场源的大地电磁法具有重要影响。图 6 给出了国内传统固体不极化电极和自主研发 LEL 型电极对大地电磁数据影响的对比结果, 在安徽某地同一测点利用 2 台凤凰地球物理公司的 MTU-5 大地电磁仪, 同步采集 3 d, 原始数据经过 SSMT2000 软件处理后, 利用 MTedit 软件自动编辑得到大地电磁视电阻率和相位曲线。从图 6 中不难看出, 该测点在 0.1 Hz 频带附近视电阻率呈 45° 直线上升, 相位趋于 0° 和 180° , 具有明显的近场源效应, 而自主研发的 LEL 电极采集数据受干扰明显小很多; 在频率低于 0.001 Hz 部分, LEL 电极获得的电阻率和相位曲线都更为光滑、误差棒更小。

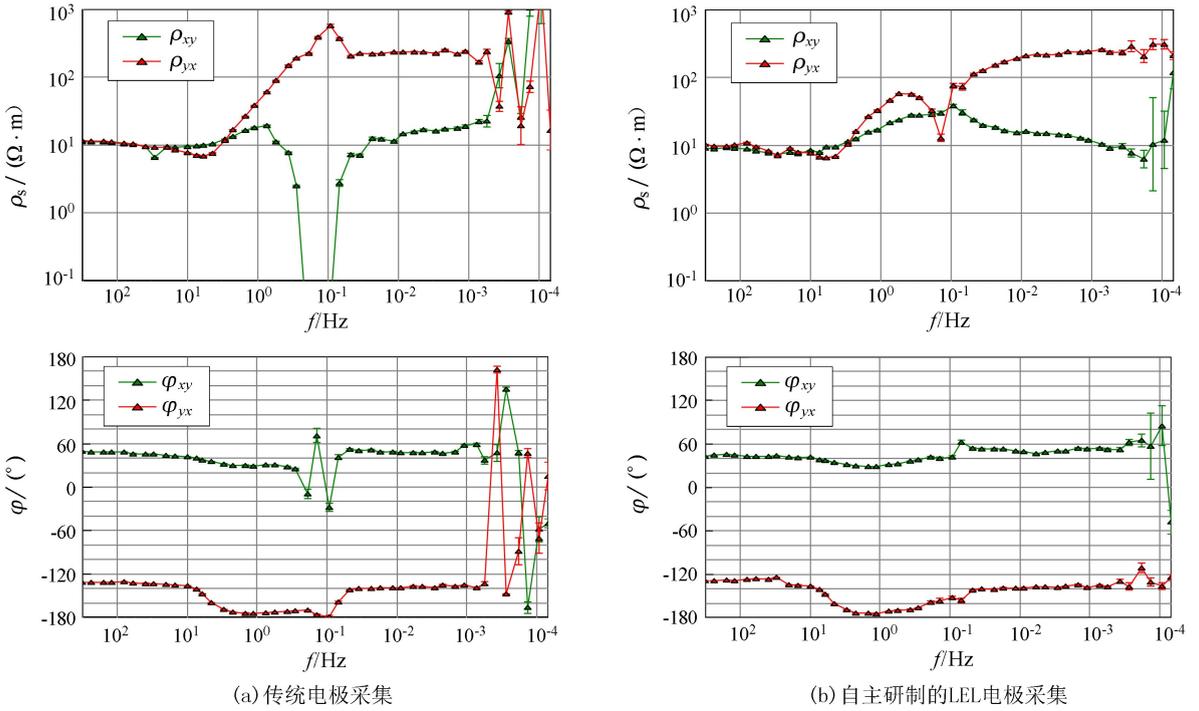


图 6 安徽某地不同电极采集的大地电磁数据对比
 Fig.6 MT comparison of different electrodes in Anhui Province

图 7 是不同电极对长周期大地电磁影响的对比。在新疆某地同一测点,采用 1 台 Lemi417 长周期大地电磁仪采集约 7 d, Lemi417 有 4 个电道,其中 2 道接法国进口的 PMS9000 电极,另外 2 道接 SLEL 电极,原始数据采用 EMTF^[21] 处理得到视电阻率和

相位曲线。在周期小于 10³ s 时,2 种电极得到的视电阻率和相位曲线一致;在周期大于 10³ s 时, PMS9000 电极对应的视电阻率和相位曲线不再光滑,而 SLEL 电极的低频数据明显好于 PMS9000 电极,对应电阻率和相位有效数据周期超过 10⁴ s。

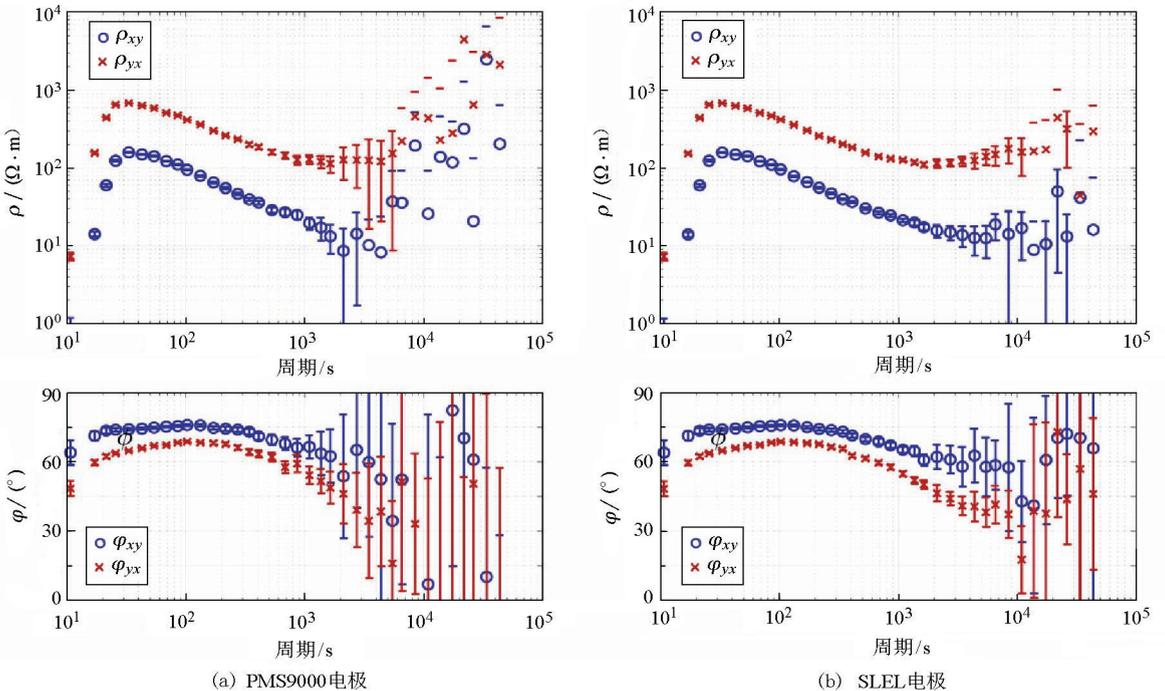


图 7 不同电极在新疆某地实测大地电磁数据对比
 Fig.7 Long period MT comparison of different electrodes in Xinjiang

4 结论

通过十多年的不懈努力,研制出免维护固体 Pb-PbCl₂ 不极化电极,室内和野外电极综合测试表明:

1) 新研制的固体不极化电极一个月的极差漂移不到法国 PMS9000 电极的 5%, 温度系数只有其 1/5, 频率域信噪比为 40 dB@10³ s, 20 dB@10⁴ s 和 10 dB@10⁴ s, 远高于 PMS9000 电极的 20 dB@10³ s, 0 dB@10⁴ s 和 -10 dB@10⁵ s。

2) 新型固体不极化电极可以提高对地电场的采集精度, 明显改善大地电磁死频带和低频的数据质量。

致谢:衷心感谢长江大学、浙江大学、四川省核工业地质局二八二大队、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所等单位进行的电极野外对比实验。

参考文献 (References):

- [1] He L, Chen L, Dorji D, et al. Mapping chromite deposits with audio magnetotellurics in the Luobusa ophiolite of southern Tibet [J]. *Geophysics*, 2020, 83(2): B47–B57.
- [2] Marquis G, Darnet M, Salliac P, et al. Surface electric variations induced by deep hydraulic stimulation: An example from the Soultz HDR site [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(14): 71–74.
- [3] Revil A, Hermitte D, Voltz M, et al. Self-potential signals associated with variations of the hydraulic head during an infiltration experiment [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(7): 101–104.
- [4] Petiau G, Dupis A. Noise, temperature coefficient, and long time stability of electrodes for telluric observations [J]. *Geophysical Prospecting*, 1980, 28(5): 792–804.
- [5] 董亮, 吴桐, 吴昉赞, 等. 长效铜/饱和硫酸铜参比电极的研究进展 [J]. *腐蚀与防护*, 2020, 41(6): 1–6.
Dong L, Wu T, Wu F Y, et al. Progress of permanent copper/saturated copper sulfate reference electrode [J]. *Corrosion and Protection*, 2020, 41(6): 1–6.
- [6] 邓明, 刘志刚, 白宜诚, 等. 海底电场传感器原理及研制技术 [J]. *地质与勘探*, 2002(6): 43–47.
Deng M, Liu Z G, Bai Y C, et al. The theory and development technology of the sea-floor electric field sensor [J]. *Geology and Exploration*, 2002(6): 43–47.
- [7] 王辉, 叶高峰, 魏文博. Pb-PbCl₂ 不极化电极的设计与实现 [J]. *地震地磁观测与研究*, 2010, 31(3): 115–120.
Wang H, Ye G F, Wei W B. The design and implementation of non-polarizable Pb-PbCl₂ electrodes [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2010, 31(3): 115–120.
- [8] Chen K, Jin S, Wang S. Electromagnetic receiver with capacitive

- electrodes and triaxial induction coil for tunnel exploration [J]. *Earth, Planets and Space*, 2017, 69(1): 1–10.
- [9] Wang Z, Deng M, Chen K, et al. Development and evaluation of an ultralow-noise sensor system for marine electric field measurements [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 213: 70–78.
- [10] Perrier F E, Petiau G, Clerc G, et al. A one-year systematic study of electrodes for long period measurements of the electric field in geophysical environments [J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1997, 49(11–12): 1677–1696.
- [11] Petiau G. Second generation of lead-lead chloride electrodes for geophysical applications [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(3): 357–382.
- [12] Perrier F. Long-term stability and installation bias of Petiau clay electrodes [C]// 22nd EM Induction Workshop Weimar, 2014.
- [13] 陆阳泉, 梁子斌, 刘建毅. 固体不极化电极的研制及其应用效果 [J]. *物探与化探*, 1999, 71(1): 65–66.
Lu Y Q, Liang Z B, Liu J Y. The development and application of solid nonpolarized electrodes [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1999, 71(1): 65–66.
- [14] 宋艳茹, 席继楼, 刘超, 等. 一种 Pb-PbCl₂ 不极化电极试验研究 [J]. *地震地磁观测与研究*, 2011, 32(6): 97–103.
Song Y R, Xi J L, Liu C, et al. Research on a type of Pb-PbCl₂ non-polarizable electrode [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2011, 32(6): 97–103.
- [15] 姜健. 井—地 ERT 不极化电极设计与性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Jiang J. Design and performance of nonpolarized electrode for well ground ERT [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [16] 尚延杰. 固体不极化电极的研究与制作 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
Shang Y J. Research and fabrication of solid non-polarized electrode [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [17] Wang H, Egbert G, Yao Y, et al. Array analysis of magnetic and electric field observatories in China: estimation of magnetotelluric impedances at very long periods [J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 222(1): 305–326.
- [18] Solution technologiques pour L'Environment unpolarizable electrodes for self potentials measurements – PMS 9000 [EB/OL]. (2020-04-10) [2021-07-10] <https://www.sdec-france.com/soil-science-equipment-sensor-pms9000.html>.
- [19] Wang H, Campanya J, Cheng J, et al. Synthesis of natural electric and magnetic Time-series using Inter-station transfer functions and time-series from a Neighboring site (STIN): Applications for processing MT data [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2017, 122(8): 5835–5851.
- [20] Kuvshinov A, Grayver A, Tøffner-Clausen L, et al. Probing 3-D electrical conductivity of the mantle using 6 years of Swarm, CryoSat-2 and observatory magnetic data and exploiting matrix Q-responses approach [J]. *Earth, Planets and Space*, 2021, 73(1): 1–26.
- [21] Egbert G D, Booker J R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions [J]. *Geophysical Journal International*, 1986, 87(1): 173–194.

Development and performance tests of maintenance-free ultra-low noise solid nonpolarizing electrodes

WANG Hui^{1,2}, FU Shu-Ji², GE Shuai-Yin², MA Fang-Yuan², SONG Bao-Jia², LUO Jing-Cheng³

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. School of Earth Science and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 3. General Exploration and Research Institute of China General Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of traditional nonpolarizing electrodes, such as the poor stability of potential difference, high low-frequency noise, short life, and requiring regular maintenance, the authors researched and developed maintenance-free ultra-low noise Pb-PbCl₂ nonpolarizing electrodes after over a decade of development and constant tests. Lab test results show that the new nonpolarizing electrodes have a potential difference drift within one month of less than ± 0.06 mV and a temperature coefficient of less than 20 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, which are 5% and less than one-fifth of those of the PMS9000 electrodes exported from France, respectively; under the ideal condition of the distance between two adjacent electrodes of 100 m, the signal-to-noise ratios relative to the natural induced electric field are 40dB@10³s, 20dB@10⁴s, and 10dB@10⁵s. The field comparative tests show that the newly developed solid nonpolarizing electrodes can significantly improve the acquisition accuracy of geoelectric field signals and the data quality of dead and low magnetotelluric frequency bands.

Key words: solid nonpolarizing electrode; geoelectric field observation; potential difference; temperature coefficient; magnetotelluric

(本文编辑:沈效群)