青藏及华北阵列式区域大地电磁场标准观测网建设方法与实验

叶高峰[1,2)]，魏文博[1,2)]，邓明[1,2)]，金胜[1,2)]，董浩[1,2)]，谢成良[1,2)]，张帆[1,2)]

1）地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室（中国地质大学，北京），北京，100083；

2）中国地质大学（北京）地球物理与信息技术学院，北京，100083

内容提要：大地电磁参数标准网的建设需要大量第一手的观测资料，观测资料的质量直接决定了标准网的可靠性。本文分析了大地电磁测深仪器设备、资料采集与处理技术，确定了青藏及华北阵列式区域大地电磁场标准观测网的建设方法；在此基础上，在山东菏泽地区对11535和11635号标准点进行了野外观测试验，对采集的宽频及长周期数据进行了深入处理，形成的对辅助测站和中心测站布置、数据采集时间、资料处理手段和远参考测站布设等要求，将指导青藏及华北阵列式区域大地电磁场标准网的建设，并对中国大陆其他区域大地电磁场标准网建设具有一定参考意义。

关键词：青藏及华北；大地电磁测深；辅助测站；中心测站；标准网建设

为了保护人类赖以生存的环境，探索火山、地震等来自地球内部的自然灾害发生的内在规律，突破深部“第二找矿空间”缓解资源、能源问题，需要了解地球深部，特别是地壳、岩石圈等固体地球圈层的结构与组成。为此，国际上很多国家进行了大量的深部探测工作（Chen et al.，1996；魏文博等，2003；Unsworth，2005；Becken et al.，2008；Patro et al.，2008；Ye et al.，2008）。探测成果同样表明，要了解地球结构与组成、建立地球动力学、实现成矿理论的创新、查明能源和资源赋存规律以及地质灾害发生机制，必须从深部地质着手，对整个岩石圈进行不同层次探测（董树文等，2009）。

我国将在2008～2012年期间部署“两网、两区、四带、多点”的地球深部探测综合实验（董树文等，2010）。其中“两网”之一的大地电磁参数“标准网”将在中国大陆范围内进行4°×4°尺度的实验研究，并在青藏（76°～102°E，29°～39°N）和华北（104°～122°E，35°～41°N）加密至1°×1°。完成此项研究，希望通过实验研究确立“标准网”建设的方法技术，进行人才培养和储备，并建立中国岩石圈三维电性结构初步模型，为下一步建立较为精细的中国岩石圈三维电性结构模型完成技术和人才的储备。

“青藏高原及华北阵列式区域大地电磁场标准网示范性实验研究”课题（编号：Sinoprobe-01-02）是“深部探测技术与实验研究”专项下属第一项目“大陆电磁参数标准网实验研究”的第二课题。将在青藏和华北区域部署355个大地电磁参数“标准点”，实验精度将达到1°×1°，即“标准点”之间的距离约为100 km，且实际物理点数占大地电磁参数“标准网”设计总工作量的80%。因此，青藏及华北区域“标准网”的建设实验是中国大陆电磁参数“标准网”建设的重点。

1 大地电磁测深数据采集与处理技术现状

大地电磁测深法是指以天然电磁场源作为信号源，研究不同频率信号（10^{-4}～n×10^{4} s）在地下介质中传播特征以达到勘探目的的一种频率域电磁法（Tikhonov，1950；Cagniard，1953；石应俊等，1985；陈乐寿等，1989；刘国栋等，1993）。由于天然电磁场频率成分丰富，大地电磁测深法即可探测浅部地质目标，也可探测深达上地幔的岩石圈尺度电性结构特征，为研究固体地球圈层的电性结构和特征服务，是进行深部电性探测的唯一有效方法，在以往国内

注：本文为国家专项“深部探测技术与实验研究”（编号Sinoprobe-01-02）资助的成果。

收稿日期：2010-01-14；改回日期：2010-04-26；责任编辑：周健。

作者简介：叶高峰，男，1977年生。中国地质大学（北京）地球物理与信息技术学院副教授，在读博士生，从事电磁法勘探的教学和研究工作。电话：010－82321735；Email：ygf1999@cugb.edu.cn。

外岩石圈探测实验中取得了重要成果。

当前大地电磁测深数据采集一般以剖面测量为主，在每个测点上采集 2 个相互正交的电场分量、2 个相互正交的磁场分量以及 1 个垂直方向磁场分量，由此估算测点所在位置地下介质的张量阻抗和倾子信息。一般野外施工时，几套仪器系统同时使用，采集时间采用外部卫星时间以实现同步观测；分频段采集信号，使用高采样率和较短的采集时间采集高频信号，使用低采样率长时间采集低频信号。对于铁路、高压线、发电站等附近干扰较为严重的区域，还会在距离工区几至几十千米范围内，寻找一个人文干扰较少的“安静”测点布设远参考站，以利于后期的资料处理。

资料处理方面，当前主要采用带远参考道的 Robust 张量阻抗估算技术（Gamble et al.，1979；Latorraca et al.，1986；Chave et al.，1987；Groom et al.，1989，1995；McNeice et al.，2001；晋光文等，2006）。由于实测信号中存在随机干扰，需要采用一些估算方法来计算张量阻抗。而 Robust 方法相较其他估算方法而言，最大优势在于可以减弱单个“飞点”对资料处理的影响，故被广泛应用。远参考道技术基于足够远的测站之间噪音不相关的原理，借助参考测站“安静”的电磁场信号压制本地测站的噪音，获得良好的处理效果。

可见，带远参考道技术的野外观测技术和 Robust 张量阻抗估算技术是当前最先进、通用的大地电磁测深资料观测与处理技术。

2 区域大地电磁场标准观测网建设方法

2.1 标准观测网布置

以往在国内开展的用于深部研究的大地电磁测深观测实验基本都是二维剖面工作，工作量相对较少，投入使用的仪器设备有限，且观测深度基本局限在 100 km 以内。相较以往大地电磁测深观测实验，在青藏和华北展开的三维观测工作将投入大量仪器设备，采集多达 3800 个测点的数据，且勘探深度需要深达上地幔盖层。因此，需要对仪器设备、观测网布置、数据采集和处理技术等方面进行一些规范。

青藏和华北大地电磁场标准网布置如图 1 所示。

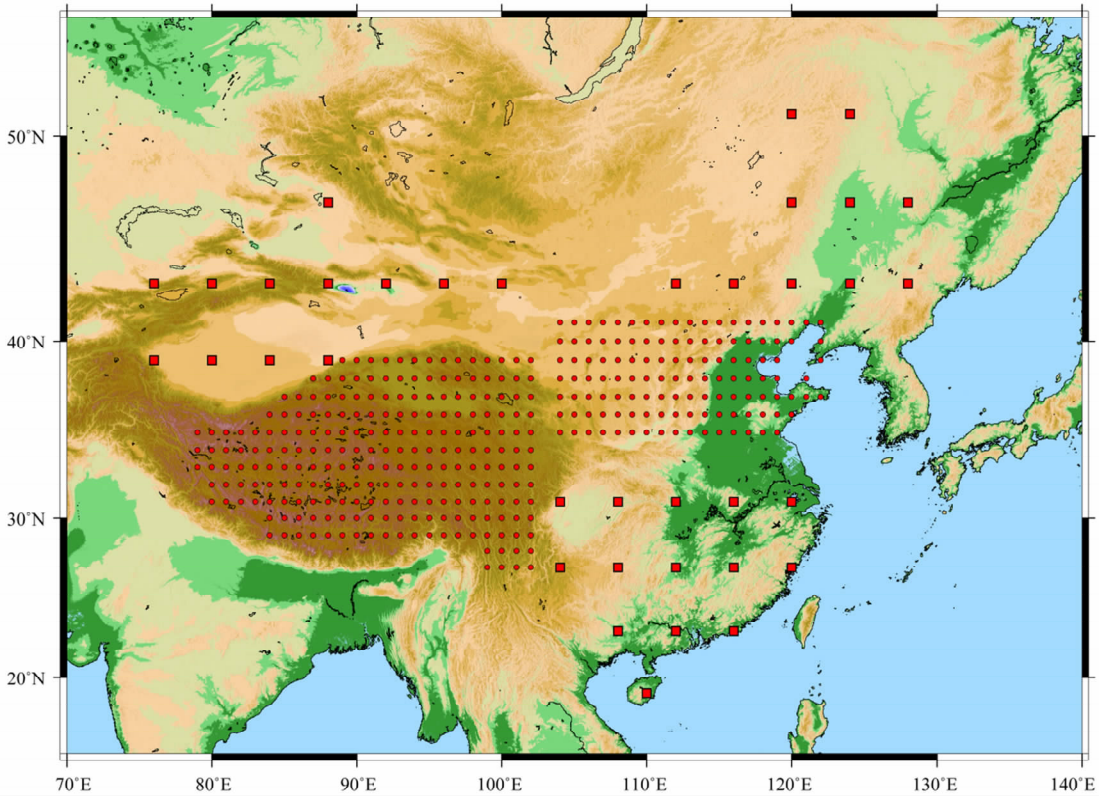

图 1 青藏高原及华北大地电磁场标准网工作部署（红色方块：4°×4°，红色圆：1°×1°）

Fig. 1 The planned standed magnetotelluric observational network at Tibet plateau and North China (red square: 4°×4°; red circle: 1°×1°)

图中圆点即为标准点，网度为 1°×1°，华北区域计划布设标准点 123 个，青藏区域计划布设标准点 232 个。每个标准点将由两条正交的十字剖面、共 9 个物理点组成，以便对每个标准点进行一维、二维甚至三维反演，获得地下介质较为可靠的电性结构模型。

标准点十字剖面布置如图 1 左上角所示，中心测站将采集宽频（0.004～2000 s）及长周期（10～10000 s）大地电磁信号，其他 8 个辅助测站将只采集宽频大地电磁信号。中心测站点位误差不超过 0.2°，4 个方向辅助测站第 1 个测点距离中心测站 10 km，点位误差通常不超过 2 km；第 2 个测点距离中心测站 30 km，点位误差通常不超过 5 km。

中心测站以 3 位经度加 2 位纬度的方式命名，如（115°E，35°N）标准点中心测站命名为 11535，辅助测站以中心测站名加 1 位方位再加 2 位离中心测站的距离命名，如 11535 北面 30 km 处辅助测站命名为 11535N30，这样既能见名知义，又肯定不会产生混淆。

在青藏和华北研究区域，纬度相差 1°在距离上相差都为 111.7 km，若经度相差 1°在华北区域距离相差约为 88 km，而在西藏区域距离相差约为 93 km。即在东西向，标准点辅助测站及中心测站构成的所有测点沿标准点方向最大点距在华北约为 28 km，在青藏约为 33 km。但在南北向，这一沿标准点方向最大点距则为 51.7 km。为此，将对每个标准点在南北向各增加一个辅助测站，距离中心测站 50 km，点位误差通常不超过 5 km，最终南北向沿标准点方向最大点距约为 20 km。

最后，在青藏和华北西部，由于地表交通条件的限制，部分标准点无法完成正交的十字剖面，将因地制宜进行一些调整；对于少数根本无法到达的标准点将舍弃。

2.2　仪器设备

大地电磁测深观测的是非常微弱的二次场信号，电场信号幅度约为 n～n×10 mV/km，而磁场信号幅度约为 $n\times10^{-1}$ nT，高精度的仪器设备是获得好数据的前提。目前国内使用的大地电磁测深仪器都为进口设备，宽频仪器主要为美国 EMI 公司生产的 MT-24、德国 Metronix 公司生产的 GMS-06 以及加拿大凤凰公司生产的 MTU-5，其中 MTU-5 仪器设备数量最多也最被专家认可；而长周期仪器主要有 Lims、Nims 和乌克兰生产的 Lemi，但 Lims 和 Nims 西方国家长期对中国禁运，Lemi 是唯一能够获得的长周期大地电磁测深仪器。而不同的仪器设备之间，采样率和记录格式差别较大，且同种仪器一致性较好，为了最大程度进行远参考处理，将采用 MTU-5 一种仪器进行宽频数据采集，采用 Lemi-417M 进行长周期数据采集。

2.3　数据采集及处理技术

目前，国内生产和使用的不极化电极主要用于宽频大地电磁测深数据的采集，电极极差只在几天甚至几个小时之内基本稳定；对于长周期大地电磁测深观测而言，采集时间动辄几天甚至几个星期，若电极极差不能长期稳定，再加上低频信号微弱，很难采集高质量的长周期数据。经过调研，课题改进现有的不极化电极制作技术与配方，自主制作了第二代铅—氯化铅不极化电极，电极极差稳定时间将至少长达数个月，而且对温度更加不敏感。

另外，常规的宽频大地电磁测深观测把电极直接埋入和好泥浆的坑里，以保证在 1 至 2 天的时间里，电极周围湿润，电极接地良好。对于长周期大地电磁观测而言，这个时间需要更长，直接埋入电极的方式很难使得电极周围温湿环境长期稳定，故将采用电极装入桶装泥浆中再深埋入土的方式，电极埋深将达到 1 m，以保证温湿条件的长期稳定（图 2）。这种方式也有利于在干旱、沙化地区的数据采集。

在每个“标准点”上都采用短“十”字剖面方式（约布置 11 个测站），采集中心测站超宽频大地电磁场信号以及辅助测站的宽频大地电磁场信号。中心测站采用宽频大地电磁仪加长周期大地电磁仪的观测方式，观测 20 h 以上的宽频数据和长达 1 周的长周期数据，这样观测信号频率范围为（0.004～10000 s）；而辅助测站将采用宽频仪器观测 20 h 以上的信号，观测信号的频率范围为（0.004～2000 s）。在资料处理上，以与该“标准点”同时施工的其他“标准点”的测站为远参考站，采用多道远参考观测技术与 Robust 张量阻抗估计的数据处理方法相结合以提高数据处理质量。由于同时施工的“标准点”间距离至少为 88 km，通常情况下噪音不相关，能够获得较好的远参考效果。

3　区域大地电磁场标准观测网实验

3.1　野外数据采集实验

确定大地电磁场标准网的建设方法后，于 2009 年 3 月 8 日至 3 月 27 日在山东菏泽地区进行了野外观测试验，投入 MTU-5 仪器 6 套，Lemi-417M 仪器 4 套，在 11535 和 11635 标准点上进行了观测实验。在 11535 标准点中心测站上进行了仪器一致性

图 2 不极化电极的两种深埋方式

Fig. 2 Two different burying ways for nonpolarizing electrodes

实验，结果表明投入使用的 6 套 MTU-5 仪器运行正常，处理得到的响应曲线形态正常，相互之间一致性良好，满足野外施工的要求；投入使用的 4 套 Lemi-417M 同样工作正常，一致性良好。

在 11535 和 11635 进行的野外数据采集实验标准点中心测站及辅助测站布置如图 3 所示，图中绿色圆点为标准点中心测站，红色圆点为标准点辅助测站。为了方便进行反演实验，对 11535 进行了“米”字型布站，11535 及 11635 标准点共完成 52 个物理点。11535 中心测站长周期观测时间为 15 d，

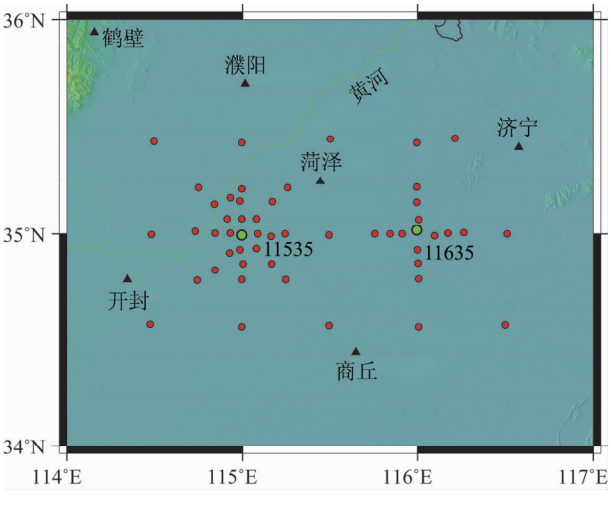

图 3 11535 和 11635 标准点测站布置图

（绿色圆：中心测站，红色圆：辅助测站）

Fig. 3 The MT stations from 11535 and 11635 standard MT station (green circle: central stations; red circle: accessory stations)

11635 中心测站长周期观测时间为 11 d，宽频信号观测时间通常都长于 20 h。

3.2 数据处理实验

由于数据采集时要求宽频测站采样时间大于 20 h，而且采集的时间、频段控制参数完全一致，故同一天布设的任意两个测站之间至少有 16 h 是同步的。对每个测点数据先进行单点处理，然后采用同步采集的所有测点的电道或磁道数据分别作为远参考道，进行 Robust 估计。就 11535 和 11635 标准点观测实验而言，由于有 6 套 MTU-5 仪器投入了数据采集工作，故每个测点有 1 个单点处理结果和 5 个远参考处理结果。处理结果表明，通常远参考处理结果都好于单点处理结果，对于存在明显干扰的测点，这种处理质量的改善是非常明显的。而采用不同测点作为远参考道，处理结果也存在差异，通常需要选择本身信噪比较高、且距离足够远的测点作为远参考点，以保证远参考道信号足够好，而噪音又不与本地噪音相关。

此外，就最长周期 2000～3000 s 的宽频信号而言，16～20 h 的采集时间也足能够叠加 3～5 次，对较短周期而言，这种叠加次数可以达到几十次，最终的大地电磁测深响应曲线是由这些信号叠加而成。由于信号的随机性以及干扰有可能具有时段性，通常可以把信噪比较低的信号去除，这样能够较好地改善处理质量。这种对多次叠加信号的挑选，对于由短时极端天气（雷电、大风等）造成的干扰以及时段性干扰有很好的剔除效果。对 11535 和 11635 宽频测站数据都进行了上述的资料处理、挑选工作，取

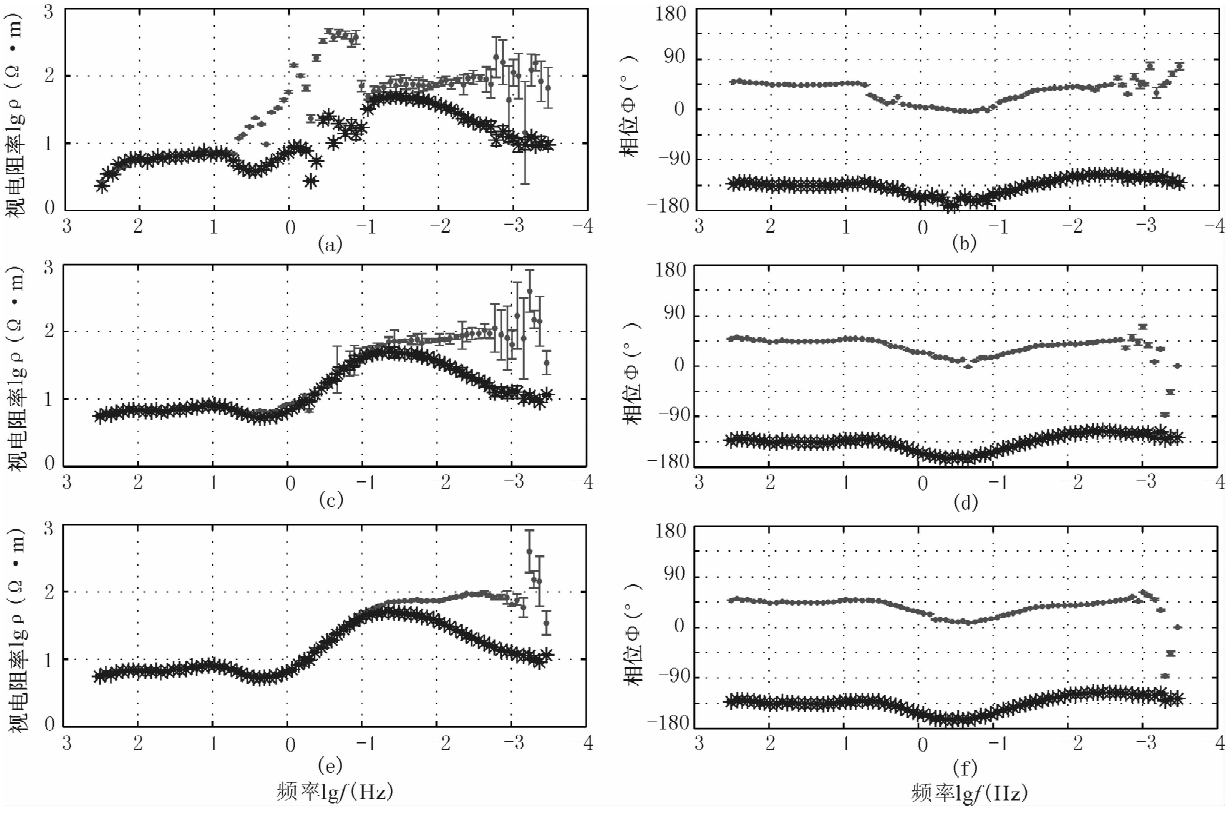

图 4　11535NE30 辅助测站资料处理结果

Fig. 4　Data processing results of 11535NE30 accessory station

点号线—xy 模式；星号线—yx 模式；(a)和(b)—单点处理结果；(c)和(d)—远参考处理结果；(e)和(f)—信号挑选后的远参考处理

Dot line—XY mode; star line—YX mode; (a) and (b)—single site processing; (c) and (d)—remote reference processing; (e) and (f)—remote reference processing with cross power selection

得了良好的处理效果。图 4 即为 11535NE30 辅助测站资料处理结果，点号线为 xy 模式，星号线为 yx 模式，图 4a、c、e 为视电阻率曲线，图 4b、d、f 为相位曲线；从上至下分别为单点处理结果、远参考处理结果以及对远参考处理结果进行信号挑选后的结果，可见从上至下资料处理结果有明显改善。综合运用了上述资料处理手段后 11535 及 11635 标准点绝大多数辅助测站实测曲线连续性好、相位与视电阻率曲线一致，获得了最长周期达 2000～3000 s 的好信号。

对长周期信号的处理也采用了上述流程。以往的探测实验表明，宽频仪器和长周期仪器之间由于仪器设备自身的差异，以及所采用的磁场传感器的差异（宽频通常采用感应式，长周期采用磁通门式），在同一点位采集的信号也很难完全拼接。为了解决拼接问题，测站布置过程中严格要求宽频和长周期同点位，甚至电极坑都要求相同。由于仪器设备先进、可靠，保障措施得当，所完成的所有 6 个标准点实验观测，中心测站宽频与长周期数据拼接完美。图 5 即为 11535 测点宽频数据与长周期数据拼接结果，图 5a 为实测视电阻率，图 5b 为相位，其中圆点为 xy 模式，方块为 yx 模式，实心圆、实心方块为宽频数据，空心圆、空心方块为长周期数据。由图可见 100 s 后宽频数据与长周期数据基本重合；虽然采集时间同为 15 d，但 5000 s 后 Lemi-417M 采集的信号好于 MTU-5。这些实验结果也证实了仪器设备选择的正确性。

3.3　存在问题与下一步工作

虽然前期的标准点观测网布设实验、不极化电极试制、资料处理以及数据拼接都取得了不少进展，但还有一些问题需要解决。

(1)观测网布设。由于地表交通条件的限制，在华北西部以及青藏高原的部分标准点很难布设十字剖面，甚至很难布设中心测站，课题将尽可能完成设计工作量，舍弃确实无法安全到达的标准点。

(2)不极化电极试制。进行更多野外观测实验，证实试制的不极化电极的稳定性；继续改进电极的结构，使之能够适用于宽频甚至音频大地电磁场的

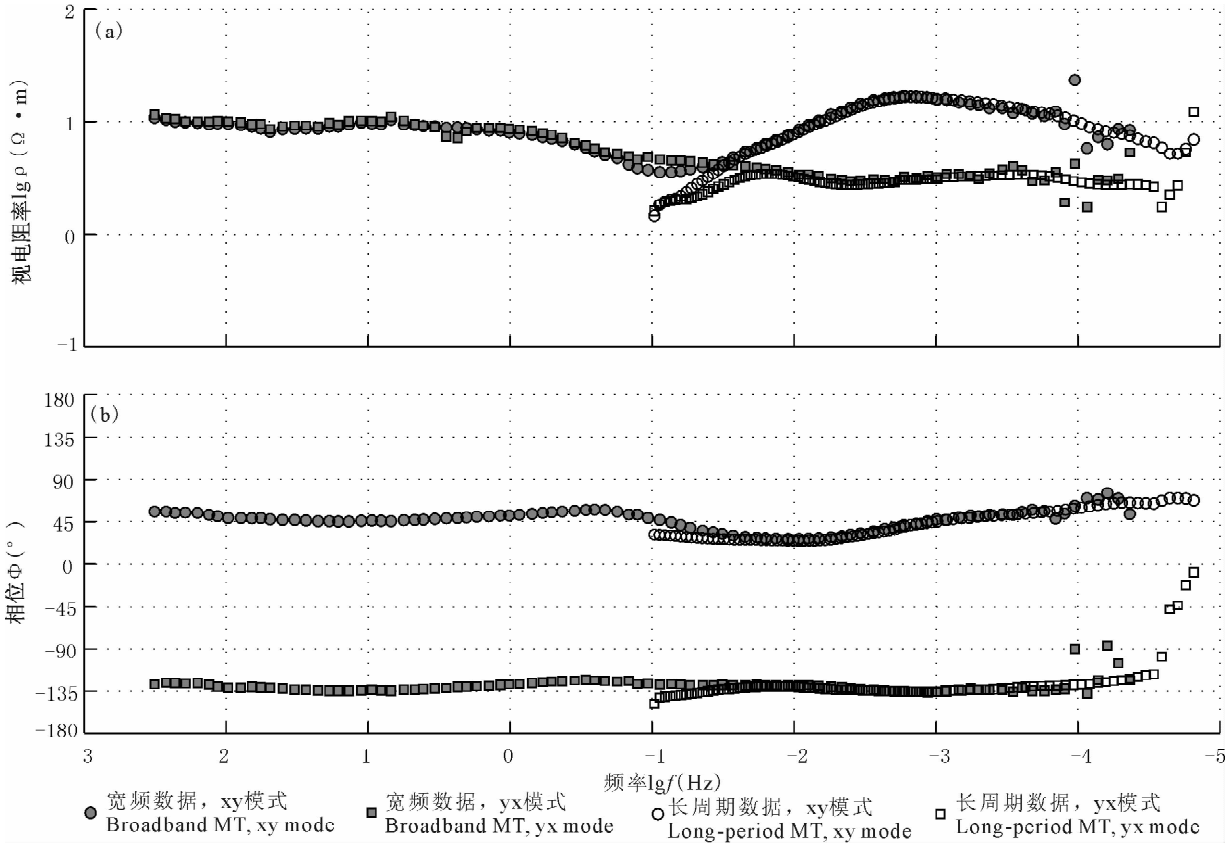

图 5 11535 标准点中心测站宽频及长周期数据拼接结果

Fig. 5 Broad-band and long period MT data from central station of 11535 standard MT site

观测。

(3)资料处理。远参考站的选择是资料处理的重点，距离过近，噪音也具有相关性，无法通过远参考去噪；距离过远，信号便不具备相关性，远参考不会有效果；将通过更多资料处理实验总结一定规律以方便应用。另外，还将尝试多点同时处理，提高处理质量。

4 结论

总之，在青藏和华北开展的大地电磁场标准网观测将采取一切保障措施，进行观测实验，尽最大努力采集高质量的大地电磁测深曲线，为后续全国大地电磁测深标准网的建设提供方法技术和人才储备，为建立青藏和华北岩石圈导电性结构初步模型提供优质数据。

参 考 文 献

陈乐寿，刘任，王天生，等. 1989. 大地电磁资料处理与解释. 北京：石油工业出版社.

董树文，李廷栋. 2009. Sinoprobe——中国深部探测实验. 地质学报，83(7)：895～909.

董树文，李廷栋，高锐，吕庆田，等. 2010. 地球深部探测国际发展与我国现状综述. 地质学报，84(6)：743～770.

晋光文，孔祥儒. 2006. 大地电磁阻抗张量的畸变与分解. 北京：地震出版社.

刘国栋，邓前辉. 1993. 电磁方法研究与勘探. 北京：地震出版社.

石应骏，刘国栋，吴广耀，等. 1985. 大地电磁测深法教程. 北京：地震出版社.

魏文博，金胜，叶高峰，等. 2003. 大陆岩石圈导电性的研究方法. 地学前缘，10(1)：15～22.

Becken M, Ritter O, Bedrosian P, et al. 2008. The electrical conductivity structure between the transitional (near SAFOD) and locked (SE of Cholame) segments of the San Andreas Fault, including the source region of non-volcanic tremors. 19th IAGA WG 1.2 Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, 186～191.

Cagniard L. 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysics prospecting. Geophysics, 18(3):605 ～635.

Chave A D, Thomson D J, Ander M E. 1987. On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions. Journal of Geophysical Research, 92: 633～648.

Chen Leshou, Booker J R, Jones A G, et al. 1996. Electrically conductive crust in southern Tibet from INDEPTH magnetotelluric surveying. Science, 274: 1694～1696.

Gamble T D, Goubau W M, Clarke J. 1979. Magnetotellurics with

a remote magnetic reference. Geophysics, 44: 53～68.

Groom R W, Bailey R C. 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. J. Geophy. Res., 94: 1913～1925.

Groom R W, Bailey R C. 1995. Analytic investigations of the effects of near-surface three-dimention galvanic scatterers on MT tensor decompositions. Geophysics, 56(4):496～518.

Latorraca G A, Madden T R. 1986. An analysis of the magnetotelluric impedance for three-dimention conductivity structures. Geophysics, 51(9): 1819～1829.

McNeice G W, Jones A G. 2001. Mutisite mutifrequecy tensor decomposition of magnetotelluric data. Geophysics, 66(1): 158～173.

Patro P K, Egbert G D. 2008. Regional conductivity structure of Cascadia: preliminary results from 3D inversion of USArray transportable array magnetotelluric data. 19th IAGA WG 1.2 Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, 192～197.

Tikhonov A N. 1950. On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust. Dokl. Akad. Nauk S. S. S. S. R., 73(2): 295～297.

Unsworth M J. 2005. Crustal rheology of the Himalaya and southern Tibet inferred from magnetotelluric data. Nature, 438(3): 78～81.

Ye Gaofeng, Jin Sheng, Wei Wenbo, et al. 2008. Features of resistivity model of lithosphere beneath the south-central Tibetan plateau. 19th IAGA WG 1.2 Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, 198～202.

Construction Methods and Experiments for Magnetotelluric Standard Network at the Tibetan Plateau and North China

YE Gaofeng[1,2], WEI Wenbo[1,2], DENG Ming[1,2],
JIN Sheng[1,2], DONG Hao[1,2], XIE Chengliang[1,2], ZHANG Fan[1,2]

1) *Key Laboratory of Geo-detection (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education, Beijing*, 100083;
2) *School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing*, 100083

Abstract

A large amount of first-hand observation data are needed to construct magnetotelluric(MT) standard network, and the reliability of the standard network directly relies on the quality of MT data. This paper established the construction methods for MT standard network at the Tibetan plateau and North China after analyzing the MT equipment, data acquisition and processing. Field observation and experiment was conducted at the standard stations (11535 and 11635) at the Heze district of Shangdong province. The data of broad-band and long period MT data was processed in detailed. The techniques and data on methods central and accessory station deployment, data acquisition time, processing and remote reference, which were obtained from the field experiments, will be used to instruct the construction of magnetotelluric (MT) standard network in the Tibetan Plateau and North China and will provide technical support to construct MT standard network at other parts of China.

Key words: Tibetan Plateau and North China; magnetotelluric sounding; accessory stations; central stations; the construction of MT standard network