

# 极低频探地(WEM)工程

卓贤军<sup>1</sup>, 陆建勋<sup>1</sup>, 赵国泽<sup>2</sup>, 底青云<sup>3</sup>

(1. 中国舰船研究院, 北京 100192; 2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

[摘要] “极低频探地(WEM)工程”是国家发展和改革委员会批准的“十一五”国家重大科学技术基础设施建设项目之一,用于资源探测和地震预测及其他前沿科学研究。文章对工程项目背景、建设内容、关键技术和试验成果作了全面介绍,在此基础上,对工程的应用前景作了展望。

[关键词] WEM法;资源探测;地震预测

[中图分类号] P631.8 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)09-0042-09

## 1 前言

极低频(文章中指0.1~300 Hz,包括我国无线电频率划分规定中的至低频、极低频、超低频,统称为极低频)电磁技术的发展可以追溯到20世纪五六十年代,其主要目的是为了解决陆地指挥中心与深水潜艇之间的通信问题。为此,美国和前苏联集中了许多优秀无线电物理学家和地球物理学家,对极低频电磁波的发射和传播等问题进行了深入的研究,到20世纪70年代末,其基本理论已趋于成熟<sup>[1,2]</sup>。20世纪80年代,美国在北威斯康辛和密执安州分别建立了极低频发射台,前苏联在科拉半岛也建立极低频发射台,成功实现陆地指挥中心与深水潜艇之间的通信<sup>[3,4]</sup>。

随着极低频技术研究的发展,美国和俄罗斯科学家分别提出把极低频电磁技术应用于地球物理和地震预测等领域。美国科学家提出将其应用于地下深层探测、地磁高能辐射带研究、磁层和电离层研究等;俄罗斯科学家提出将其应用于地震预测、地层剖面详查、探测地壳电性结构、探测含矿地区结构、探查并预测包括大陆架在内的油气生成区、地质和生态环境研究、原子能发电站、大型水库等场地的勘选等。20世纪90年代,俄罗斯科学家首先利用科拉

半岛极低频台(ZEVS台)和租用电力线作发射天线方法做了大量极低频电磁探测试验,通过与其他探测方法进行对比,发现极低频探测方法比现有电磁方法在探测深度和探测精度上都有很大的提高,并在地震电磁异常监测上具有独特的优势<sup>[5]</sup>。

我国一直关注国外极低频电磁技术的发展,20世纪末,与俄罗斯科学院合作,在技术引进、消化、吸收、改进和提高的基础上,21世纪初在国内建立了1个小型极低频试验台。试验台的建立为我国极低频技术的研究和应用提供了一个良好平台。通过理论研究和对比试验,初步验证了极低频电磁法的优越性<sup>[6~8]</sup>。2005年根据我国国情在进行理论计算和优化设计的基础上,中国船舶重工集团公司、中国科学院和中国地震局联合向国家发展和改革委员会(以下简称国家发改委)申请“极低频探地(wireless electro magnetic, WEM)工程”项目,提出建立一座大功率极低频发射台,首先在资源探测和地震监测上开展探索性应用研究。2006年该项目被国家发改委列入“十一五”国家重大科学技术基础设施建设项目之一。2010年7月国家发改委正式批复,同意将极低频探地(WEM)工程国家重大科技基础设施项目列入国家高技术产业发展项目计划。项目建设目标是建造世界上首台民用极低频发射台站等试验

[收稿日期] 2011-06-27

[作者简介] 卓贤军(1970—),男,浙江奉化市人,高级工程师,主要从事极低频电磁技术的研究;E-mail:zhuo-xj@126.com

陆建勋(1929—),男,北京市人,中国工程院院士,主要研究方向为通信工程;E-mail:lujx@cae.cn

设施,形成基本覆盖我国国土和领海区域的高信噪比电磁波信号,开展地下资源探测和地震预报等方面的探索性研究和工程试验研究,为相关领域的前沿科技研究提供新的技术手段和开放性的公共服务平台。目前该项目正在积极筹建中,计划在“十二五”内建成并提供服务。

## 2 工程项目背景

20世纪50年代初,前苏联学者 A. H. Tikhonov 和法国学者 L. Cagniard 分别提出了利用天然电磁场为信号源探测地下电性结构的电磁理论,称为大地电磁测深法(magneto telluric, MT)<sup>[9]</sup>。由于 MT 法具有探测范围广、深度大、不受高阻层屏蔽的影响、对低阻层反应灵敏等优点,至20世纪80年代,MT法已成为所有电法中技术最成熟、应用面最广的方法,其应用领域遍及油气、固体矿产、水资源、环境监测以及地壳、上地幔构造研究和监视地震前兆<sup>[10,11]</sup>。

由于 MT 法利用的是由雷电及宇宙噪声等产生的天然源信号,信号本身的随机性和微弱性使其抗干扰能力弱,测量误差大,因而探测精度不高。20世纪70年代,人们提出人工源电磁法,用人工发射的高信噪比信号代替天然场信号,提高抗干扰能力和探测精度。可控源音频大地电磁法(controlled source audio frequency magneto tellurics, CSAMT)和瞬变电磁法(transient electro magnetic method, TEM)是目前常用的两种人工源电磁方法,分别属于小功率人工移动源频率域电磁法和时间域电磁法。人工源电磁法大幅提高了探测精度,但存在信号覆盖范围小、探测深度浅、范围小、有近场限制、设备笨重等问题,无法满足较深层资源勘探和地震电磁监测的需要。20世纪80年代,俄罗斯科学家提出并建设了磁流体(magneto hydrodynamic, MHD)发电机原理法,信号覆盖范围约达100 km,但是仪器太笨重,使用成本极高,无法推广使用。

20世纪90年代,俄罗斯科学家开展极低频电磁技术在民用领域的应用研究,利用 ZEVS 台和租用电力线作发射天线方法做了大量极低频探测试验,通过与 MT 法对比,发现极低频电磁法测量得到的视电阻率曲线比 MT 法测量得到的更光滑,数值精度更高,更稳定;与偶极剖面法和平均梯度法进行比较,表明极低频电磁法在地质填图和深部探测方面可以达到很高的精度<sup>[5]</sup>。由于极低频电磁信号

覆盖范围大,也可满足地震电磁异常监测的需要,加上可能考虑到研究经费问题,1996年年底,俄罗斯科学院函致中国科学院,推荐用极低频电磁方法研究地球物理和地震预测,希望进行合作。我国有关各方对此非常重视,组织有关专家对极低频电磁技术作了充分论证,并由陆建勋院士、马宗晋院士和王东山教授联合筹备专家组,与俄专家开展学术交流和商谈合作。

为了进一步验证极低频电磁技术应用于地球物理和地震预测的可行性,1999年,中国地震局地质研究所和俄罗斯圣彼得堡大学合作利用 ZEVS 台进行测量试验,测试地点在北京小汤山、西集和天津宝坻、蓟县等几个地震台,距离发射台约6500 km。测量试验结果表明,即使在具有较强干扰背景的地震台站院内,观测的 ZEVS 台发射的80 Hz大功率人工源信号的功率密度谱的幅度要比天然电磁场高出10~100倍,视电阻率为24~26  $\Omega \cdot m$ ,测量误差仅为2.9%。在试验期间,距测点约120 km发生的迁安 Ms 4.2级地震与观测的电磁场异常和视电阻率的变化有较好的对应性<sup>[6,7]</sup>。此测试结果引起了地震电磁专家的高度关注,认为极低频电磁技术从根本上解决了 MT 法在地震预测工作上存在的问题,可以精确地观测电磁场和地下电阻率的变化情况,明显提高监测和识别地震电、磁前兆异常的能力,在地震预测研究和预报工作中具有实际的应用价值和前景。同时,极低频电磁探测技术具有的探测精度高、深度大的优点也为深部资源探测提供了解决方案。

2000年,由陆建勋院士和马宗晋院士牵头,开展“利用极低频/超高频无线电波进行地震预报及地下资源探测系统的方案研究”项目的研究工作。根据国家发改委的要求,利用小型极低频试验台,2004年在1000 km以外的河北省张北县对试验台发射的65 Hz、90 Hz和130 Hz等频率点的场强进行测试,取得了较好的效果;2005年在北京、河北、河南进行电磁信号接收试验,实验台发射0.1~300 Hz极低频信号在河南泌阳油田进行探测对比试验,在云南、北京进行地震电磁监测试验,均取得了很好的成果,油田公司和地震局专家都给予了很高评价。在中国工程院组织召开的中国工程科技论坛第44场“极低频探地工程技术进展”研讨会上,得到了包括8位院士在内的40余名专家的高度评价,认为极低频探地工程项目的建设在我国资源探测和

地震预测方面具有很大的应用和发展前景。

### 3 工程建设内容

工程拟在我国华中高电阻率地区建立一座大功率发射台(简称 WEM 台),采用两端接地的电力线作为天线,布设两条基本正交、东西长约 80 km 和南北长约 60 km 的天线,天线两端采用大面积“地网”做接地体,每条天线各配一台 500 kW 的发射机,用以发射 0.1 ~ 300 Hz 极低频电磁信号,其电磁信号覆盖半径可达 2 000 ~ 3 000 km,信噪比可达 10 ~ 20 dB,基本覆盖全国,为地下资源探测、地震预测以及其他前沿性研究和工程试验研究提供信号源服务。

计划通过对 WEM 台发射的极低频电磁信号特性进行系统深入的研究,借鉴和利用现有 MT 法和 CSAMT 法技术和经验,开发具有自主知识产权的极低频大面积组网式观测方法和实用性强的电性结构反演成像软件,如数据的预处理、地下介质几何结构成像、层析成像处理等软件,形成 WEM 法的数据处理和地质解释的资源探测应用系统,以提高 WEM 数据处理和解释的质量。通过在川东油气盆地和内蒙大兴安岭多金属成矿带选定典型地区进行组网三维观测和探查油气、金属矿实例应用研究,评估 WEM 法在探查深部油气和金属矿产资源中的优越性和先进性,探索建立 WEM 法寻找深部油气、矿产资源的有效模式,提高深部地下资源的探测精度和分辨率,为我国深部资源的勘查提供新的技术手段。

在地震重点监视区(首都圈、南北地震带南段)新建 30 个极低频地震电磁监测站和 2 个电磁流动监测台站,初步建立地震重点监视区的极低频地震电磁台网,开发专用的极低频地震电磁数据处理、地震电磁异常识别和多信息地震综合分析软件。极低频地震电磁台网每天定时接收 WEM 台发射的极低频电磁信号,记录数据通过国家地震网络系统传输到 WEM 地震预测分系统,通过相关软件分析电磁信号的强度、视电阻率和阻抗相位、地下结构等参数与时间的关系以及联合地震监测台网观测的其他数据,综合分析地震电磁异常现象和其他地震异常现象的关系以及地震发生前地质参数和由此产生的电磁波的变化关系,建立地震电磁异常分布的数理统计模型,提高地震前兆识别和提取的准确度,提升川滇、首都圈等地震多发区中强以上地震电磁异常的捕捉能力,提高地震预测水平,推进地震预警立体监

测系统的建设。

为了将 WEM 工程建设成一个公共性、开放性的科学技术基础平台,成为世界一流的国家极低频科学研究和应用平台,建设内容中也包括了共性基础技术和前沿性应用技术研究,一方面为地下资源探测、地震预测研究等其他前沿研究提供技术指导,另一方面拓宽极低频技术的应用领域,如地质灾害研究、大陆架地磁探测研究等,推进极低频技术发展和应用推广。建立 WEM 工程计算中心,以计算中心为载体,实行资源共享和高速运算服务,使更多研究机构和应用部门参与到 WEM 工程的应用和开发中,推动 WEM 工程向前发展,确保工程科学目标的实现。

### 4 关键技术

极低频电磁探测方法称之为无线电磁法(wireless electro magnetic method,简称 WEM 法),是“极低频探地工程”项目的关键技术,是现代极低频无线电技术与地球物理跨学科交叉的产物。

WEM 法实际上是一种人工源电磁法,与现有电磁法的原理一致。相对于现有人工源电磁法,WEM 法选择地电阻率极高的地区,建设大型固定广播型发射台发射电波,具有发射电流大(可达 300 A)、磁矩大(可达  $10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ )、辐射范围大(接收信噪比达 10 ~ 20 dB 条件下,信号覆盖半径达 2 000 ~ 3 000 km,10 Hz 以上为 2 000 ~ 3 500 km)的优点,克服了天然源电磁法(MT 法)存在的抗外界电磁干扰能力弱、测量误差大和现有人工源电磁法(如 CSAMT)存在的设备笨重、测量范围小、探测深度浅的缺点,其辐射场强比现有人工源电磁法高出万倍,可覆盖数千公里,是对现有人工电磁法的重大革新。WEM 法与现有 MT 法和 CSAMT 法比较,具有以下优势:

1) WEM 台发射的极低频电磁信号强度大,幅度、相位稳定,信噪比高,具有抗干扰能力强、测量精度高的优点。

2) WEM 台发射的极低频电磁信号覆盖半径达 2 000 ~ 3 000 km,省去发射源的运输、精确位置的选择和设备投放带来的麻烦以及源环境不一致造成的对观测结果的影响<sup>[12]</sup>,测量方法和 MT 法一样,只需使用接收机,适合山区、复杂地形、大陆架等交通不便地区测量,具有经济性好、测量深度深、简便、效率高、作业成本低等优点。

3) WEM 台发射的极低频电磁信号覆盖广, 信号稳定, 在空域和时域上一致性强、相关性好, 适合大面积组网接收, 提高了运行效率和测量精度, 为地震预测和三维电磁勘探技术的发展提供了理想的条件。

WEM 法集 MT 法和 CSAMT 法的优点, 同时又克服它们的缺点, 具有探测深度大、抗干扰强、探测精度高优点, 是一种全新的地下资源探测与地震地磁监测方法和技术。

## 5 初步成果

我国建立极低频试验台后进行了一系列的相关试验研究, 其中包括 2005 年在泌阳油田的探测试验和在云南、北京的地震电磁监测试验, 试验成果初步显示了 WEM 电磁法的优势。

### 5.1 泌阳油田探测试验

考虑到试验台天线的长度短, 辐射功率小, 且有效信号覆盖范围小, 故选择距发射台 300 km 的河南泌阳油田。试验的目的是为了检验极低频电磁法的有效性, 试验仪器采用德国 GMS 06 型 MT 仪器。试验布置的测线选择在河南泌阳油田凹陷中部(泌阳油田于 2003 年完成), 沿一条近南北向与 04 地震剖面基本一致的测量剖面进行了极低频电磁勘探试验。试验测线长约 33 km, 共设 42 个测点。

试验台每次发射 23 个 0.1 ~ 300 Hz 的频率点, 测量仪器根据发射台发射频率和发射时间同步接收极低频电磁波信号。图 1 为测量仪器记录的信号和背景场振幅谱密度图, 其中  $E_x$ 、 $E_y$  分别为南北向、东西向接收的电场信号,  $H_x$ 、 $H_y$  分别为南北向、东西向接收的磁场信号。从图 1 中可以明显看出, 在野外接收的人工源信号谱的幅度要高出背景场幅度 1 ~ 2 个数量级<sup>[8]</sup>。

电磁场的高信噪比和高相干度可保证得到高可信度的观测资料。图 2 为在采油区强干扰情况下的天然场信号和极低频电磁信号的视电阻率和阻抗相位曲线。由图 2 可见, 由天然源信号得到的视电阻率和阻抗相位曲线误差大, 且曲线不圆滑; 而使用接收的极低频电磁信号进行处理得到的曲线圆滑, 测量误差小, 体现出极低频电磁信号方法应用优势。

对记录资料进行处理后得到了全部 42 个测点的视电阻率、阻抗相位等参数, 然后进行一维和二维反演。根据一维和二维反演结果, 结合该地区的地质结构得到综合地质解释结果(见图 3(a))。综合解释得到的穿过泌阳盆地剖面的轮廓及其地质结构

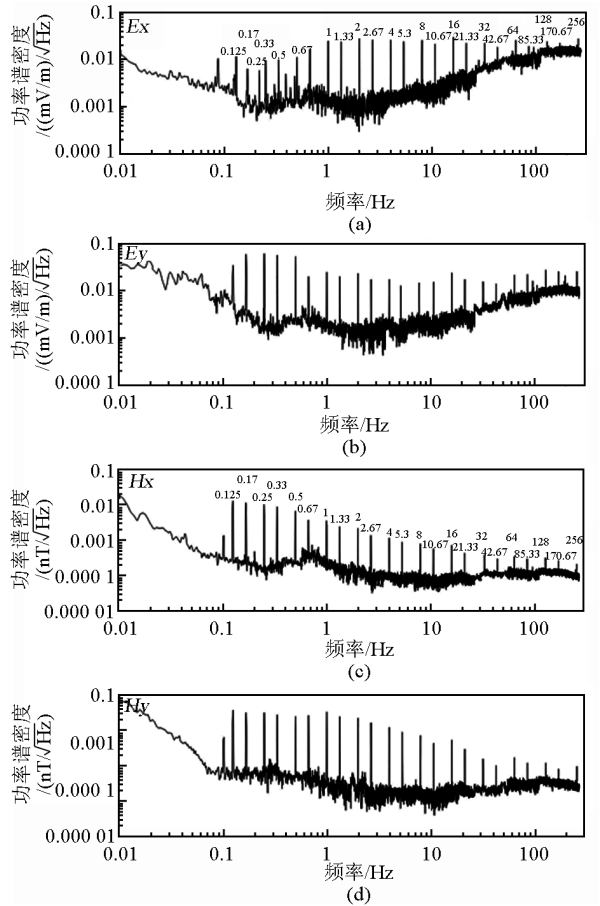


图 1 某号测点接收的人工发射电磁信号与背景场功率谱比较

Fig. 1 The comparison of the power spectral density between artificial source and background field at one site

(见图 3(a)) 与精细地震反射得到的地质结构(见图 3(b)) 基本一致, 并给出了地震资料所没有的地质新信息。

这次试验成果得到河南石油管理局专家的充分肯定, 认为 WEM 法能够确定含油气盆地构造形态、沉积地层分层结构、介质的横向不均匀性, 能圈定复杂含油构造区, 确定基底内部构造等, 为确定油气的生、储、盖提供依据, 对油气勘探具有重要的意义。WEM 法与传统的电磁勘探方法对比, 具有很好的抗电磁干扰能力、很高的勘探精度和低廉的勘探成本, 是电磁勘探技术发展的新阶段。

### 5.2 WEM 地震预测试验

2005 年 9 月 15—29 日利用极低频试验台在首都圈地区和地震活跃的滇东、滇东北地区进行 1 次地震预测试验, 试验工作时间共计 15 d。发射台的发射信号频率选择为 170.67、126.67 Hz 和

85.33 Hz 三个频率,接收机布设在各地震台站附近干扰较小的地方。在 地震监测时间段内,每天定时收发两次极低频电磁信号。在测试期间,滇东北试验区的鲁甸县桃源附近于 2005 年 9 月 21 日上午

09:52:22 发生了一次  $M_s$  3.6 级地震,震中距东川地震台约 150 km。图 4 是云南省东川和河北省怀来两个台站记录的磁场信号和背景对比图<sup>[6,7]</sup>。

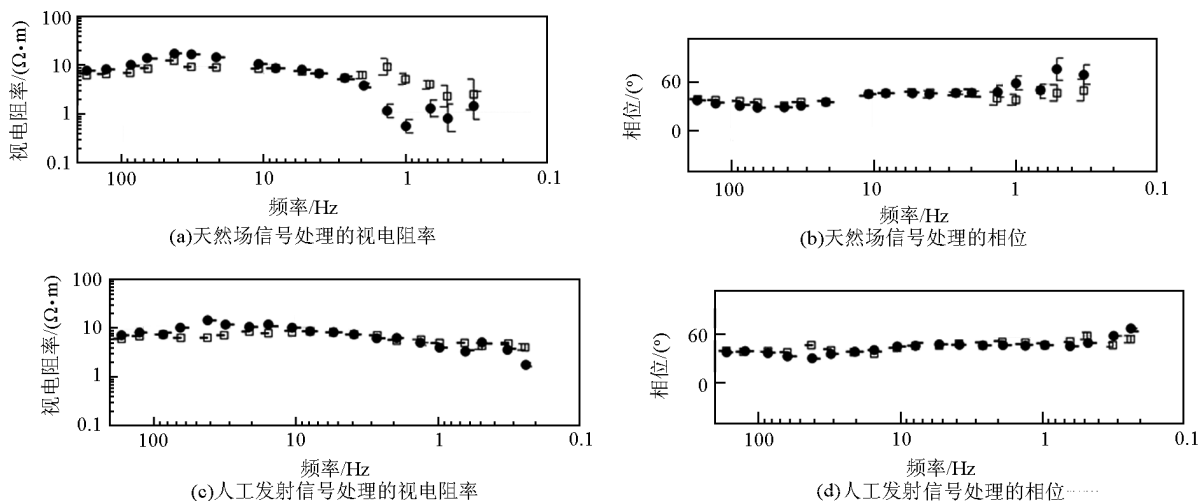
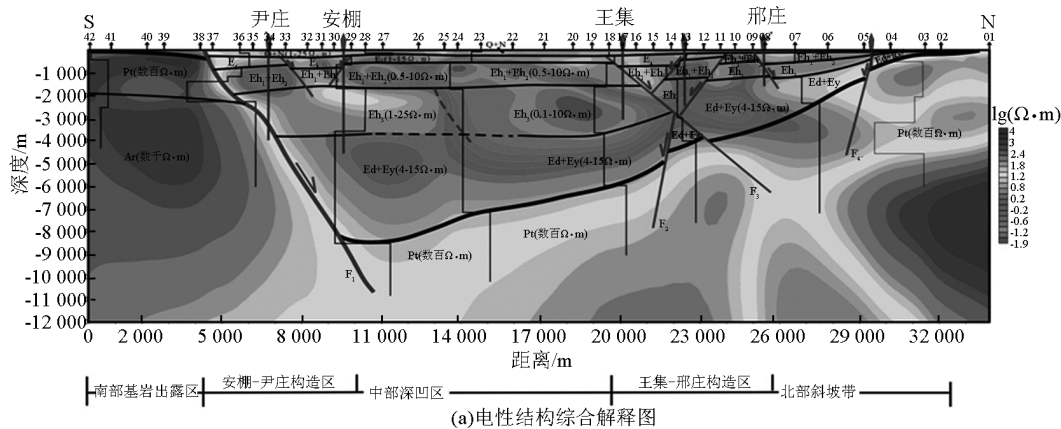


图 2 某测点视电阻率曲线和相位曲线的对比

Fig. 2 The comparison of apparent resistivity and phase curve at one site



检波器号

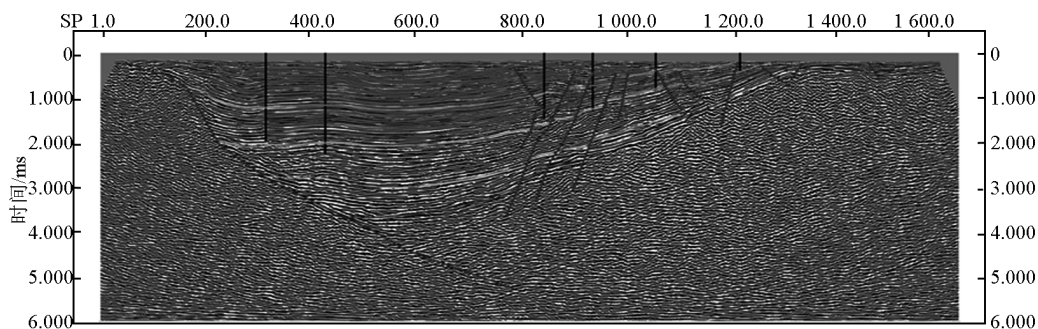


图 3 泌阳油田综合解释剖面图((a) 图为 WEM 法, (b) 图为地震法)

Fig. 3 Comprehensive WEM data (a) and seismic data (b) interpretation profile in the Biyang Oilfield

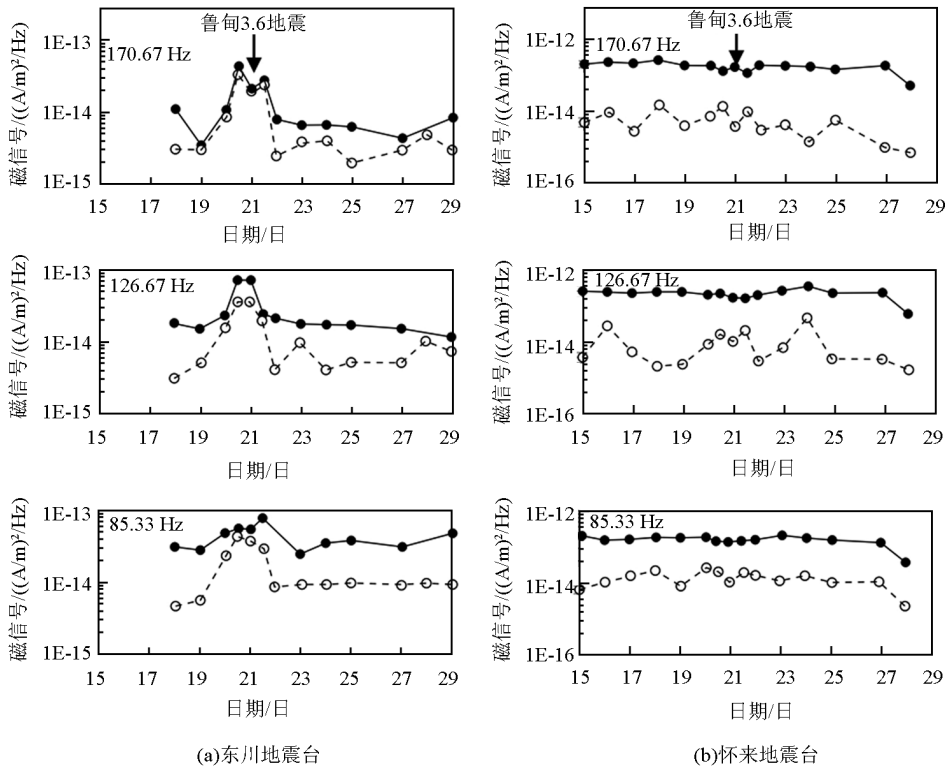


图4 东川(a)、怀来(b)地震台记录3个频率的磁场信号

Fig.4 Magnetic field of three frequencies observed at Dongchuan Station and Huailai Station

注:图中实线为实测的磁场信号,虚线为背景场

对比分析图中两个台站记录的资料,发现在云南省东川地震台9月20日晚、21日早上和21日晚上记录的磁场信号功率谱密度有增大的趋势,随后磁场功率谱密度又趋于稳定,而在河北省怀来地震台记录的磁场信号在15d的连续测量中较稳定,推测在东川地震台记录到的20晚、21日上午和21日晚的磁场谱的异常可能是该次地震前后的电磁异常变化,而在离地震区很远的怀来地震台没有记录到电磁异常的变化。

中国地震局组织有关专家对试验过程中观测到地震事件前、后的电磁异常现象进行了研究讨论,认为虽然目前关于地震电磁前兆异常的成因机制还没有统一的解释,但在地震前记录到极低频电磁异常,至少说明WEM法的出现提供了一种可能同时捕捉地下深层地震活动和相关电离层的变化(即“源和场”的异常信息)的综合技术手段,在地震预测研究和预报工作中具有实际的应用价值和发展前景。

## 6 应用前景

WEM工程是我国一项创新性科学工程,工程的实施可使其优越性得到进一步发挥,使其效果得到进一步改进。工程建成后将是世界上第一个利用极低频进行大范围地下资源探测、地震预测和前沿科学研究的科技基础设施,将为我国研究地下深层地质、空间物理和无线电物理等提供一种有力的新科学研究手段,具有广阔的应用前景。

### 6.1 促进电磁技术的发展

电磁法正从天然源电磁法(无源)到人工源电磁法(有源)发展,电磁资料解释手段从一维、二维到三维发展<sup>[10,13]</sup>。目前电磁法在石油天然气、矿产等资源探查和工程勘探中发挥着重要作用,浅层资源探查和工程勘探以人工源电磁法为主,深层资源探查以MT法为主,其电磁资料解释手段都以一维、二维正反演技术为主。由于实际地电剖面电阻率通常是以二维或三维构造分布,若进行一维或二维反演解释,很可能得不到可靠的地电结构,有时甚至会

得到严重畸变的结果,因此需要用三维模型来更为精确地模拟三维构造。同时,目前勘探的主要工作已向地表地质条件复杂的地区转移,实际的地电断面难以满足二维反演的假设条件,二维反演解释结果也不能真实反映地下电性结构,从而影响了地下地质信息的认识。现有的人工源电磁法其信号覆盖范围小,不适于大面积三维数据采集,故不具备实际工程应用价值;MT法适合于三维电磁法,但抗干扰能力弱,要得到高质量的MT三维采集数据存在很大困难,这将直接影响三维MT法的实际效果,故目前应用极少。

WEM法通过建立一个固定的大功率发射源,信号覆盖全国,信噪比达10~20 dB,既具有MT法探测深度大、成本低的优点,而又具有人工源电磁法(CSAMT等)抗干扰能力强、探测精度高的特点,是一种全新的地下资源探测与地震地磁监测方法和技术。WEM法的信号由一个固定的发射源统一发射,便于大面积组网式观测,具有信噪比高、覆盖面积大等特点,为三维电磁勘探技术的发展提供了理想的条件,将明显地提高地下资源探测精度和地震电磁监测地震预测水平。因此,WEM法将有力推进电磁勘探技术的发展,促进我国地下资源勘探和地震电磁监测技术实现跨越式发展,将是资源勘探和地震预测上一项国际性的重大科技创新。

## 6.2 提高我国地下资源探测水平

随着我国国民经济持续快速发展,资源不足的矛盾日益突出,加强地下资源勘探力度已成为保持我国经济可持续发展的战略选择。目前,我国地下资源中易发现、易识别、易探测的地表露头矿和浅层矿越来越少,隐伏资源和深部资源成为未来我国地下资源开发的主体。“攻深探盲”是我国地下资源勘探和开发的主要方向,勘查难度急剧增大,寻找地下资源的风险和成本越来越高,急需研制开发具有穿透能力强、适用面广、经济方便的地下资源勘探手段<sup>[14]</sup>。WEM工程通过人工发射0.1~300 Hz极低频电磁波信号来探测地下深部的矿产资源,可以实现大面积、大深度和高精度地下资源探测目的,从根本上克服了传统电磁方法探测范围小、深度浅、近场干扰等缺陷,弥补了人工地震法在很多特定地质条件下的局限性,使我国实现全国国土面积的电磁法资源普查、详查成为可能。同时,地球物理勘探资料解释具有多解性,WEM工程的实现可为资源普查详查中地震、电磁和其他地球物理手段的联合解释提

供保障<sup>[15,16]</sup>,为我国新一代地下资源勘探提供重要技术支撑,为国家战略资源安全提供保障,有力地促进我国国民经济建设持续发展。

近年来,一种海洋油气勘探新技术——海洋电磁法已出现在西方海洋油气勘探中,海洋电磁法与海洋地震法联合解释在海洋油气勘探中取得了很大的成就<sup>[17]</sup>。目前,我国已将海洋大地电磁探测技术研究列入国家“863”计划,并取得了一定的成果<sup>[18]</sup>。WEM法发射的高信噪比信号和背景场经过海水衰减后依然保持高信噪比,因此,WEM法也完全适用于海洋资源的勘探。WEM工程项目的启动将进一步推动我国海洋电磁探测技术的发展,为我国海洋石油矿产资源的勘探开发提供一种新手段。

## 6.3 提高我国地震电磁监测和地震预测水平

我国是一个震灾严重的国家,20世纪60年代邢台地震、70年代唐山地震和2008年的四川汶川特大地震,给我国人民生命财产造成了巨大损失。由于地震发生的机理十分复杂,地震预测是世界重要的前沿科学技术之一。目前,人类还没有能够准确预报地震。地震前有许多地震前兆现象,国际上众多专家公认,在众多地震短临前兆现象中,电磁场异常是对地震短临前兆反应最灵敏的物理现象之一<sup>[19~21]</sup>。有更多的观测实例证明和更多的研究人员认为,电磁场观测可能成为实现短临地震预报的突破点。而现有的电磁监测方法都是接收天然电磁信号,存在对发生的电磁异常现象无法准确识别是地震原因还是非地震原因的问题,使得观测和研究结果不能被广泛确认。现阶段地震预测所面临的最关键问题是探测手段不足,开展地震前兆信息监测的能力也严重不足。

WEM台提供的稳定高精度电磁场信号,覆盖范围大,可以在某些地震频发区域长期组网接收,同时观测所在区域地壳结构的电性参数变化信息,以及电磁信号在传播过程中携带的大气层和电离层信息,为我们提供了一种同时捕捉地下深层地震活动和相关电离层变化(即“源和场”的异常信息)的综合技术手段,可以在很大程度上提高对异常的识别和捕捉能力,为确定地震发生地点、时间和震级提供一种最新的科学研究工具,其可能是一种极有发展前景的地震前兆电磁观测方法。

## 6.4 促进相关领域的发展

国外对极低频的研究十分重视,如俄罗斯专家提供的“国际极低频研究计划”,其研究内容主要是

空间物理(磁层、电离层、大气层)和地质与应用地球物理(资源、高分辨率层析法、大陆架、地震预测)的研究,足见利用极低频的研究范围很广,涉及多个学科,利用极低频进行地下资源探测和地震预测研究只是其中的一部分。WEM工程建成后可以为全国提供一个极稳定、穿透能力很强的极低频电磁信号源,为多学科如大气物理、电离层、磁层物理、地质与地球物理、无线电物理等提供一种新的公用性、开放性的科学研究平台,促进相关领域的发展。

## 7 结语

极低频探地(WEM)工程是配合我国地下资源“攻深探盲”战略、提高地震重大自然灾害监测预报水平的重大科学技术基础设施建设项目。极低频发射台发射0.1~300 Hz的极低频信号基本覆盖全国,信噪比可达10~20 dB,可以实现大面积、大深度和高精度地下资源探测目的,从根本上克服了传统电磁方法探测范围小、深度浅、近场干扰等缺陷,弥补了人工地震法在很多特定地质条件下的局限性,使我国实现全国国土面积资源普查、详查成为可能,为我国新一代地下资源勘探提供重要技术支撑。WEM工程提供的稳定高精度电磁场信号,可以在全国台网同时观测,既可监测地震引起的空间电磁场异常,也可监测震源区附近的电阻率异常,实现了真正的四维观测,大大提高了对地震前兆异常的识别和捕捉,为确定地震发生、地点、时间和震级提供了一种全新的监测预测手段,可以为防震减灾服务。WEM台辐射的稳定、高信噪比极低频信号也可为其相关学科提供服务,应用前景十分广阔。

## 参考文献

[1] Barr R, Jones D L, Rodger C J. ELF and VLF radio waves [J]. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 2000, 62: 1689-1718.

[2] Bernstein S L, Burrows M L, Evans J E, et al. Long range communications at extremely low frequencies [C]//*Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(3): 292-312.

[3] Bannister P R. Wisconsin test facility transmitting antenna pattern and steering measurements [J]. *IEEE Transactions Communication*, 1974, 22(4): 412-418.

[4] White D P. Extremely low frequency (ELF) propagation measurements along a 4 900 km path [J]. *IEEE Transactions communication*, 1974, 22(4): 452-457.

[5] 卓贤军, 赵国泽. 一种资源探测人工源电磁新技术[J]. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(增刊): 114-117.

[6] 赵国泽, 陆建勋. 用人工源超低频电磁波监测地震的试验与分析[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(10): 27-33.

[7] 赵国泽, 汤吉, 邓前辉, 等. 人工源超低频电磁波技术及在首都圈地区的测量研究[J]. *地学前缘*, 2003, 10(增刊): 248-257.

[8] 卓贤军, 赵国泽, 底青云, 等. 无线电磁法(WEM)在地球物理勘探中的初步应用[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(6): 1921-1924.

[9] 刘国栋, 陈乐寿. 大地电磁测深研究[M]. 北京: 地震出版社, 1984.

[10] 王家映. 我国石油电法勘探评述[J]. *勘探地球物理进展*, 2006, 29(2): 77-81.

[11] 魏文博. 我国大地电磁测深新进展及展望[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(2): 245-254.

[12] 杜树春. 发射场地效应及其与地电构造的关系[J]. *地质与勘探*, 1991(12): 40-42.

[13] 胡祖志, 胡祥云. 大地电磁三维反演方法综述[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(1): 214-220.

[14] 孙中任, 张国瑞, 魏文博, 等. 目前电磁法用于矿产勘查面临的几个问题的思考[J]. *地质与资源*, 2005, 14(4): 305-309.

[15] 何展翔, 贺振华, 王绪本, 等. 油气非地震勘探技术的发展趋势[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(3): 473-479.

[16] 赵邦六, 何展翔, 文百红. 非地震直接油气检测技术及其勘探实践[J]. *勘探技术*, 2005, 10(6): 29-37.

[17] 何展翔, 孙卫斌, 孔繁恕, 等. 海洋电磁法[J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(4): 451-457.

[18] 魏文博, 邓明, 谭捍东, 等. 我国海底大地电磁探测技术研究的进展[J]. *地震地质*, 2001, 23(2): 131-137.

[19] 汤吉, 赵国泽, 王继军, 等. 张北—尚义地震前后电阻率的变化及分析[J]. *地震地质*, 1998, 20(2): 164-171.

[20] 王书明, 王家映, 林长佑. 大地电磁在地震预报中的应用[J]. *地质科技情报*, 2002, 21(2): 105-108.

[21] 卓贤军, 赵国泽, 王继军, 等. 地震预测中的电磁卫星[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(2): 1-5.



# The extremely low frequency engineering project using WEM for underground exploration

Zhuo Xianjun<sup>1</sup>, Lu Jianxun<sup>1</sup>, Zhao Guoze<sup>2</sup>, Di Qingyun<sup>3</sup>

(1. China Ship Research and Development Academy, Beijing 100192, China; 2. Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Academia Sinica, Beijing 100029, China)

[ Abstract ] The ELF ( extremely low frequency ) engineering project for underground exploration is one of the major national science and technology infrastructure projects approved by Chinese government, which will apply to resource exploration, earthquake predication and other frontier sciences. The background, construction content, key technology and test results are introduced. On the basis of which, the application prospect of the project are expected.

[ Key words ] wireless electro magnetic method( WEM ); resource exploration; earthquake predication

---

( 上接 41 页 )

# Study on the grouting technology adopted in F1 weathered trough for Xiamen Xiang'an Subsea Tunnel

Guo Xiaohong<sup>1</sup>, Wang Mengshu<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
2. CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd., Wuhan 430056, China)

[ Abstract ] Focusing on F1 weathered trough which has maximum water inflow and great difficulty in construction in Xiamen Xiang'an Subsea Tunnel, full sectional grouting reinforcement and waterproofing, 5 m grouting inside heading, 70 m along longitudinal direction of tunnel and superfine cement single fluid grouting as major grouting material were applied according to poor geological conditions and the character of sudden water inflow. Meanwhile, the corresponding parameters of grouting were established after drillings for grouting were conducted. The results of field monitoring and numerical calculation during construction show that the grouting effect meets the qualifications of design and construction of Xiamen Xiang'an Subsea Tunnel. The research results can provide technical reference for similar projects in grouting and waterproofing.

[ Key words ] Ximen Xiang'an Subsea Tunnel; grouting reinforcement; stability; numerical simulation