

陆其鹄,吴天彪,林 君,等.地球物理仪器学科发展研究报告.地球物理学进展,2009,24(2):750~758,DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.053.

Lu Q H, Wu T B, Lin J. A reseach report on development of instrument science for geophysics. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(2):750~758,DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.053.

# 地球物理仪器学科发展研究报告

陆其鹄<sup>1</sup>, 吴天彪<sup>2</sup>, 林 君<sup>1</sup>

(1. 中国地球物理学会地球物理技术委员会; 2. 中国仪器仪表学会地学仪器分会)

**摘 要** 地球物理仪器在国防、资源探测、自然灾害监测和工程质量检测等领域中具有不可忽视的作用,近年来技术进步迅速.国际上,地球物理仪器发展趋于多功能化、轻便化、智能化、可视化、网络化和虚拟化.由于历史的原因,一方面我国对地球物理仪器的需求急剧增长,另一方面又形成了对国外仪器的过分依赖,严重冲击了我们对地球物理仪器的自主研发.在这样的逆境中,我国地球物理技术工作者仍然坚持不懈,在重、磁、电、地震、放射性等领域取得了显著成绩,并在某些领域达到了具有国际领先的水平.基于这种现状,我国地球物理仪器发展应该坚持适当引进与自主创新相结合、研产用相结合,形成标准统一、多学科交叉融合的研制体系,提高工艺水平和售后服务质量;重视地球深部探测、航空物探、海洋探测、地质灾害监测和国防工程领域的地球物理仪器开发和研制;发挥学术组织的特殊作用,集中力量组织攻关,争取在关键领域中形成我国具有自主知识产权的先进地球物理技术和仪器.

**关键词** 地球物理技术,地球物理仪器,应用领域,自主创新

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.053      中图分类号 P631      文献标识码 A

# A reseach report on development of instrument science for geophysics

LU Qi-hao<sup>1</sup>, WU Tian-biao<sup>2</sup>, LIN Jun<sup>1</sup>

(1. *Committee of Geophysical Techonology, China Geophysical Society*;  
2. *Department of Geoscience Instrument, China Instrument Association*)

**Abstract** Owing to its non-replaceable effects in some important fields such as national defence, resource detection, natural hazard monitoring and engineering inspecting, the techniques of geophysical instruments are developing fast. Around the word, geophysical instruments are tending to be multi-functional, portable, intelligent, visible, net-connectible and virtual. In our country, because of historical affects, the need of geophysical instruments is increasing fast, and on the other hand, over relying on foreign instruments has heavily depressed the independent research and production of our own instruments. In such an unfavorable circumstance, our geophysical technologists keep to do their unremitting efforts and gain some notable achievements in the fields of gravity, magnetism, electricity, seismology and radioactivity. Based on this situation, the policy for the development of our geophysical instruments should be as follows: by combination of suitable importation and independent innovation and cooperation among research, production and application, setting up a studying and producing system with syncretism of multiple disciplines, unite criterion, high level of craftworks and good quality of services after sale; paying much attention to the development of the instruments for the application fields such as earth exploration, navigation geophysical detection, ocean exploration, geological hazard monitoring and national defence and so on; making use of special function of academic organizations, converging the powers of all circles, so as to form advanced geophysical techniques and instruments with our own independent intellectual property rights for the key fields of national construction.

**Keywords** geophysical technology, geophysical instrument, application field, independent innovation

## 1 地球物理仪器的地位和作用

地球物理仪器主要包括:磁法、电法、重力、形变及震动,放射性测量等,在军事上和国民经济建设中都起着重要作用。

### 1.1 军事

如重力场、地磁场对空中飞行,海洋航行以及弹体发射等都有影响。军事技术越是发展,对这些地球物理量测量精度要求也就越高,至今一些国家的高精度绝对重力仪仍然对我们禁运<sup>[1]</sup>。

### 1.2 资源及环境探测

石油、天然气、煤炭等能源,地下水源,金属矿产,包括核能源用的放射性矿产,非金属矿产,以及人类赖以生存的环境和生态系统都需要进行地球物理探测和监测<sup>[2]</sup>。

### 1.3 自然灾害中的地质灾害

如地震、海啸、矿山灾害、泥石流,滑坡等,也是地球物理监测研究的内容。

### 1.4 工程质量监测

铁路、公路、航道、水坝、各种建筑物及军事设施的场地基础的检测,以及建成后工程质量的检测,地下未知埋藏物,地下洞体,地下军事目标,水下核潜艇等监测也都要用到地球物理仪器和方法<sup>[3]</sup>。

可见人类的生活及生产活动的许多领域都涉及到地球物理仪器的观测,地球物理仪器对国防和国民经济建设具有不可忽视的作用。

## 2 地球物理仪器的国际进展与发展动向

在国际上,目前地球物理仪器的进展和发展动向主要在以下几个方面。

### 2.1 扩展监测能力,多取得地球物理信息

主要是提高仪器的监测灵敏度、信噪比、扩大动态范围,展宽仪器的频带和加密观测点。例如磁力仪,目前噪声最低、动态范围最宽的是超导磁力仪,它的噪声是 fT 量级,不仅用于地球物理,测量心磁图和脑磁图,灵敏度也比心电图和脑电图高 1~2 个数量级,在 77K 高温超导时,噪声为  $10\sim 50\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,由于高温超导要经常换液氮或液氦,很不方便,经过一段高温超导热之后,现在大部分研究者又回到低温超导的研究上来,在 4.2K 的低温超导时,噪声达到  $1\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,但用高温超导的仪器,灵敏度也是高的。梯度测量也是提高灵敏度的一种办法,光泵磁力仪用梯度方法安装,噪声可达到  $2\sim 3\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

Overhauser 质子磁力仪,用数十兆赫的高频激发,回避了激发信号与接收信号相冲突,以便连续测量。

在航空重力测量方面,超导重力仪也付诸于实用。

地震探矿,为了提高分辨率,探查细微的构造,仪器的频响特性向高频端发展。

在环境放射性监测方面,美国、英国、加拿大等国已完成全国的电离辐射环境评价工作,其中最重要的资料是利用航空伽玛能谱测量数据。氡析出率仪器研制是新的热点,半导体探测器测氡仪是新的发展趋势。

采取数据处理技术,从强干扰背景下提取微弱的有用信号,也是多取得信息的重要途径。

### 2.2 仪器的小型化、轻便化

地球物理仪器主要是观测仪器,要在野外现场使用,轻便、低能耗是个重要问题,例如随着缩微技术,光刻技术,微电子器件制作技术的发展,使用微电子机械系统是值得注意的动向。微电子机械系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)集机械与电子为一体,采用微型制造技术,将机械部件,传感器,执行机构和电子系统利用显微加工技术集成到一个基材(硅、铝或其它材料)上,如地震检测,把振动传感器与模数转换器等结合在一起,直接输出数字信号、体积、功耗大大降低。在磁力仪器方面,使用 MEMS 制成铷光泵磁力仪,光源使用的是垂直空腔表面发射激光器,总功耗 195 mw,传感器体积  $12\text{mm}^3$ ,在 10 Hz 处噪声为  $50\text{PT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,短时间噪声  $0.05\text{PT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

### 2.3 仪器智能化、可视化

例如随着单片机,数字信号处理器(DSP)器件的发展,以及计算技术,数据处理技术的发展,原先许多用人工控制的功能逐步由智能化控制所取代,控制过程及产出的结果也由繁杂的数字变为图象显示,在屏幕上直观可见,可以是二维图像,也可以是三维的。

### 2.4 信息的网络化

地球上的信息是从许多观测点取得的,为了信息的快速传递,也为了资料共享,地球物理探测技术的区域性网络化和全球探测网络化在逐步发展。例如上世纪 70 年代一些国际组织已开始注意到这个问题,联合国环境规划署(UNEP),联合国教科文组织(UNESCO),世界气象组织(WMO),国际科学联合会理事会(ICSU)支持并实施了许多具有重大影响的进行环境和生态系统研究和监测全球性变化的研究计划,而环境与生态和地学密切相关,建立的全

球性和区域性的研究与观测网络主要有：全球环境监测系统(GEMS)，全球海洋观测系统(GOOS)，全球陆地观测系统(GTOS)等，促进了国际间多学科综合发展，也提高了各国自身的研究能力，有利于相互协作，跨学科、跨地区综合研究，这也是当今国际上环境与地球探测研究的一种发展趋势，相应地，仪器设备在网络信号传输、数据交换、资料共享等方面也就有了发展。

2.5 虚拟仪器的发展

数字化仪器、智能仪器的快速发展，使得仪器的精度越来越高、功能越来越强、性能也越来越好。但是，这类仪器还没有摆脱独立使用、手动操作的模式。对于较为复杂的、测试参数较多的场合，使用起来仍很不方便并受到局限。而充分利用计算机丰富的软硬件资源的虚拟仪器(Virtual Instrument, VI)技术可以克服上述缺点，它将测试仪器的信号分析与处理、结果表达与输出放到计算机上来完成，用计算机屏幕形象地模拟各种仪器控制面板，以各种形式表达输出测试结果。虚拟仪器利用计算机软件代替传统仪器的硬件来实现各种各样的信号分析、处理，完成多种多样的测试功能，突破传统仪器在数据处理、表达、传送、存储等方面的限制，这种仪器具有组建灵活、研制周期短、成本低、易维护、扩展方便、软件资源丰富等优点。虚拟仪器是未来仪器发展的主要方向之一，其两大特征是用户自定义以及软件是核心的概念。有人预计，近年来虚拟仪器将占有仪器仪表市场的50%，并有进一步上升的趋势。将虚拟仪器技术应用到地球物理仪器领域，会提高地球物理仪器的设计水平，加快研制速度，降低设计成本，是地球物理仪器未来研发中的重要技术之一。

3 我国地理物理仪器的现状分析

我国改革开放以后，国民经济恢复发展，许多工程上马，地球物理仪器的需求量急剧增长，由于文化大革命，国内的科研、生产工作遭到严重破坏，地球物理仪器的研制、生产处于缓慢、停滞甚至倒退的境地，一时难以适应当时的需求，另一方面，由于开放，看到了一些国外仪器设备，也确有优于国内仪器之处，于是形成了“造”仪器不如“买”仪器的潮流，一股潮流涌来甚难抵挡，自主研制地球物理仪器的力量被明显削弱，我国的北京地质仪器厂、上海地质仪器厂和重庆地质仪器厂不得不转产，技术人员和技术工人纷纷被转行或流失，北京地质仪器厂的重力仪车间产量曾居世界第三位，是在亚洲乃至第三

世界仅有的一个石英弹簧重力仪生产基地，也被迫撤销，当时该厂坚持保留下了一个重力组，到2005年仅有的2名技术工人留守阵地，年产量仅10台左右。曾有伊朗客户要求订货，厂方却无法供货。

由于“造”不如“买”导致我国原长春地质学院仪器系也不得不转变专业方向，去培养电子测量仪器与测控仪器领域的人才，地球物理仪器的人才培养也受到了冲击，如中国航空与遥感中心的光泵磁力仪生产，弄得几乎后继无人。

另一方面，诚如有人说，中国对地球物理仪器的需求救活了国外一些濒临倒闭的公司。上世纪末国外仪器的代理商在国内发展迅速。

在这里回顾了这一段历史，是因为至今进口设备仍然占很大比重，这是必须引起足够重视的现状，其实国内的地球物理仪器工作者一直在进行不懈的努力，力求国内仪器水平的提高，而且也已取得一定的成效、下面介绍一些情况：

3.1 重力仪器

以原北京地质仪器厂为例，石英重力仪生产已经恢复发展，该仪器的传感器用石英制作的弹簧，是测量重力加速度相对变化的仪器，读数精度10 $\mu$ gal，精度高、重量轻、体积小、操作简便、使用方便，Z400型石英重力仪可广泛用于地质构造和矿产的重力勘探，包括重力普查，重力详查和区域重力测量，但由于产量受到手工操作拉石英丝的限制，尚不能满足国内需求，若扩大生产能力，国内外都还有市场。2005年底该厂启动了全自动电子重力仪的研制工作，不久的将来，我国自行研制具有自主知识产权的电子重力仪的投产，会使目前电子重力仪完全依靠进口的形势有根本性扭转<sup>[4]</sup>。

西安测绘所于1998年开始了我国第一套航空重力测量系统的研制，于2003年研制成功，测量精度为5~7 mGal，与当前的国际水平相当，我国航空重力仪的任务是测定难以实施地面重力测量的地区、陆海交界区域和海洋区域的重力测量。

我国航空矢量重力测量技术的研究现已提到议事日程，正在进行跟踪论证和预研究。

绝对重力仪方面，中国计量院已成为国际上少有的几个掌握绝对重力仪研发技术的研究机构之一，我国的NIM-II型绝对重力仪的测量不确定度为4  $\mu$ Gal，美国斯坦福大学朱棣文教授研究成功了激光冷却囚禁原子的方法，并将此方法用于测量单个原子的重力加速度，估算了其测量精度可达3 $\times 10^{-9}$  g，1997年原子干涉重力仪的测量结果直接与

不确定度为  $7 \times 10^{-9}$  g 的经典的激光绝对重力仪 FG5 的测量结果进行了比对,结果表明:作用在原子上的地球引力与作用在宏观物体上的引力没有明显差别,即重力对原子的作用和对宏观物体的作用是相同的。目前中国计量科学研究院和武汉大学的理工学院也正着手此项研究<sup>[5]</sup>。

### 3.2 磁法仪器

磁通门磁力仪,目前使用很广泛,国内生产厂家也很多,所用的磁性材料是玻莫合金,现国内这种材料质量已经提高,现在国内做出来的磁通门磁力仪的水平与国外相当,测量范围  $10^{-10} \sim 10^{-4}$  (T),可测矢量场。

我国现有的磁通门梯度仪的水平也与国际上的产品相当,主要用于军事方面,可以为潜艇导航,也可用于制导,例如打坦克,有激光制导,但它对目的物有无磁性不能判别,加上磁场梯度仪可提高辨别目标的能力。

我国 CTM 型磁力仪是一种具有世界先进水平的地磁测量仪器,它可以精确测定地磁偏角  $D$  和地磁倾角  $I$ ,与观测地磁场总强度  $F$  的质子磁力仪组合,可以理想地观测地磁场矢量。

光泵磁力仪,国内产品水平与国外相近,但在物探领域还没有普遍应用,光泵磁力仪,国外在向小型化发展,我们也在努力。国产 HC-95 型手持式光泵磁力仪经过改进,灵敏度已达到 0.02 nT,全重仅 1.5 kg,与国外相比、灵敏度上还有差距。

我国的质子磁力仪,分辨率达到 0.1 nT,只要保证达到此指标,已能满足高精度磁测的要求,目前国内的生产能力也基本上能满足国内市场需求,但是前几年国内此类产品短缺,导致加拿大、捷克等国的质子磁力仪大量进口。我国质子磁力仪水平基本与国外的相当,我国 Overhauser 质子磁力仪也基本上研制成功。

磁感应磁力仪,我国的水平也与国外的相当,但要测量近直流场,线圈圈数要多、重量、体积都很大。美国 NA/CHARM 任务中所用的方法值得借鉴,他们把磁感应式磁力仪和霍尔磁力仪组合起来用,感应式磁力仪主要测量变化场,  $10^{-12} \sim 10^6$  (T),霍尔磁力仪磁场分辨率低,为  $10^{-3} \sim 10^2$  (T),可测量直流磁场。超导磁力仪是灵敏度最高的磁测量仪器,量程是  $10^{-14} \sim 10$  (T),噪声低,动态范围大,它的噪声在 fT 量级,国内尚处于研究阶段。

### 3.3 电法仪器及电磁法仪器

电法仪器利用天然地电场,或用人工场源产生

的电场,测定介质的电性参数;电磁法仪器既测电场也测磁场,也有利用天然电磁场源和人工电磁场源两种。

#### (1) 电法仪器

电法仪器中观测天然电场一般是科研的需要,生产上主要还是采用人工场源,为了提高分辨率和适于野外工作,国内主要从以下几方面着手:

① 分布式采集:用人工场源,用激电仪,高密度布测点,传统的办法是一个电极一芯电缆,用多缆测控与传输的方式,现改为分布式采集,只用有限的几芯电缆,各个测点独立采集,将各测点接收到的信号就地进行数字化,转变为数字量,这些数字量加上各测点的地址码,依序传到记录中心,各测点同步采集,但用不着实时同步传输。

② 多频率激发:为了提高对地质结构的分辨能力,采用不同频率激发,开始用双频,现又发展为采用三频,多频。也有人做了伪随机激发源,谱成份则更丰富。

③ 增强发射功率和提高接收灵敏度:为了提高探测距离,提高探测深度,增大发射功率无疑是有益的,但也有一部份人在接收环节想办法,提高接收灵敏度,降低接收部份的噪声,目的都是为了提高探测能力。

#### (2) 电磁法测深

典型的大地电磁法是利用天然电磁场,利用 E/H 的频率分布,求得地下各岩层的埋藏深度及视电阻率,天然电磁场的电场分量和磁场分量均含有与地下结构有关的细节变化。值得关注的是海洋电磁探测,目前较为成熟的是海洋大地电磁测深法 (Marine MT)。探测仪器要放置于海底或贴近于海底,它远落后于其它海洋地球物理方法,如人工地震和重磁,原因是仪器技术较长时间内未取得突破,不像重磁测量仪器或人工地震方法所用的仪器,这些仪器可布在海面或船上,由于海水对电磁信号的衰减作用,海底被测信号非常微弱,通常只有微伏级,在海底工作的仪器还需要解决承压密封,抗海流拖曳以及受控上浮等高难度技术,国家 863 计划支持了中国地质大学等单位对海洋 MT 进行研究,重点是研制海底大地电磁仪。仪器设计中,采用了先进的电子技术、材料技术和机械制造技术,使多套仪器系统在海底能同步采集到微伏级的大地电磁场信号。仪器的可靠性和安全性得到了充分保证,投放和回收的成功率高,2000 年,圆满完成了我国首次海底大地电磁探测试验,达到了预期的科学目标。为推进

该项技术走向实用化和产业化,“十·五”期间,国家 863 计划再次资助中国地质大学.海底大地电磁探测与电磁成像技术课题已使我国的 MT 探测方法和仪器走向实际应用.此外,海洋人工源电磁探测方法在国外正处在推广应用阶段.就技术和仪器而言,海洋人工源电磁探测系统比海洋天然场源系统更为复杂,中国地质大学已在此方面研究中得到国家 863 计划的支持.天然气水合物的海底电磁探测技术研究项目正在实施进程中.

### (3) 天然电磁辐射测深技术

国内有几家在从事这方面工作,目前尚未推广应用,这种方法也是利用天然电磁场,可以省去人工场源,但传统的大地电磁法是既测磁场,又测电场,并通过  $E/H$  的运算,减小天然电磁场随时间变化等因素的影响,但这样做,又在很大程度上削弱了与地下结构有关的细节变化,研究利用天然电磁场单一分量的方法,并采用相应的测量技术,对这些细节变化加以利用,是提高探测分辨率的一种途径.此项探测技术以地下岩层的相对电阻率为主要参数,以天然电磁场为场源,是从大地电磁法衍生形成的一种实用探测技术,在近地表自由空间记录天然电场垂直分量的频率分布,在一定深度范围内得出地下电性界面的埋藏深度与岩层无量纲的相对电阻率,主要用于与层状地层有关的矿产资源和深部地质结构探测.有人撰文对这种探测方法的机理作了探讨,认为当在近地表自由空间接收天然电场的垂直分量时,电磁能量按  $EXH$  的方向传播是不能到达地表的,认为应该用电性分界面的面电荷理论加以阐述,既然电磁能量的返回不是按反射方式,那么也无需担心反射能量的强弱,只测频率,探测结果反映的是地下岩层法线方向的剖面结构,在岩层倾角很大时也仍然可以测量<sup>[6]</sup>.

例如利用本项探测技术于 2001 年 11 月在大陆深钻附近进行了预测,预测结果与大陆深钻所得结果符合情况良好.也曾对地下水源,大倾角结构进行过探测,都取得了较好的结果,现正在继续这方面的观测研究.此种方法最大验证探测深度达到 7 km, 300 m 探测深度范围内,深度分辨率约为 2%,探测深度为岩层的法线深度.不受岩层倾角大小的限制,对地下较小的地质体或人为建筑以及含水层易于识别,也可在水面上对地下地质结构进行探测.

## 3.4 地震探测仪器

(1) 通过中国地震局系统实施国家九五、十五计划的不懈努力,全国的地震观测网络基本上完成

了由模拟向数字的转变,向数字化、宽频带、大动态、遥测化、网络化、智能化、集成化方向发展<sup>[7]</sup>;特别是通过“中国数字地震观测网络”项目的实施,现在我国已建成了由 150 个台站组成的国家地震台网,由 678 个台站组成的科学探测台阵和由 200 套流动地震仪器组成的 31 个区域地震台网,由 600 套流动地震仪器组成的科学探测台阵和由 200 套流动地震仪器组成的地震应急流动观测系统;还建立了由 22 个重力基准台、1500 个区域流动测点构成的国家重力台网,由 28 个基准台、58 个基本台和 800 个流动站点区域网构成的国家地磁台网、由 110 个固定台和 1500 个区域流动测点构成的地形变台网、由 97 个台站构成的地电台网以及由 177 个固定台和地下流体流动观测区域构成的地下流体台网;形成了统一的、多兵种的、并具有包括有线/无线及卫星传输的信号实时传递、分析处理、发播的综合系统的先进的现代化全国地震监测台网,此外,在监测地形变手段上,也采用了卫星遥感技术结合常规地形变测量,均取得了进展.

中国科学院地质与地球物理研究所研制了海底地震观测系统,并投入了实际观测.

(2) 国产地震勘探仪器为适应地球物理勘探技术的需求朝着高分辨率,大道数三维和四维、三分量和四分量的高密度接收方向发展,使采集的数据具有宽频、高保真、高信噪比,以能更好地识别岩性、油藏流体、裂缝油藏以及改善油藏定位与储集特征、油藏连通性及提高采出效率等;目前,国内野外勘探的实际最大道数已经达到 10000 道/1 ms;同时着重于高精度勘探技术的新型传感器诸如 MEMS 地震检波器的开发.现东方地球物理公司正在研发的多道地震仪,道数可万道以上,指标高于国外产品,舍赛尔公司的产品传输速率是 16 Mbps.东方公司的是 40 Mbps.在工程地震探测方面,无线传输的地震检测系统也正在应用.

## 3.5 放射性测量仪器

成都理工大学研制的手提式高灵敏度 X 射线荧光仪的检出限,灵敏度达到国外同类先进产品的水平,实现了野外现场一次测量可同时分析 8 种以上元素的含量,对某些元素(如铜、锌、砷)的分析优于国外产品.

核工业北京地质研究院生产的 HD-2001 型低本底  $\beta\gamma$  多道能谱仪是实验室内分析粉末样品或规则建材中 U、Ra、Th、K 天然放射性元素含量或<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th、<sup>40</sup>K 比活度的仪器.该仪器的模数转换采

用了独特的技术,消除了放射性测量仪器中存在的“死时间”的影响,使该仪器在很宽的测量范围内具有良好的线性,提高了测量的准确度,解决了过去的能谱分析仪不能兼顾低含量样品和高含量样品的问题,该仪器 2007 年获国防科技二等奖。

由中国地质大学负责的海洋水下拖曳伽玛射线能谱仪的研发,与国外同类仪器相比有以下特点:探测器采用  $\phi 125 \times 110$  mm 碘化钠晶体和光电倍增管,比国外仪器拥有更高的探测灵敏度;脉冲幅度分析器在水下部分,将模拟信号在水下转变成数字信号,使数字信号传输到船上,克服了模拟信号传输过程中产生的信号畸变;采用软件稳谱技术,利用天然钾-40 放射出的伽玛射线在仪器上形成的射线峰,进行重写谱,消除了利用人工放射源对仪器本底的影响;在软件上设置了总道监视窗口,可在船上适时监视水下探测器部分与海底的接触状态,保证测量结果可靠;仪器可在水深 300 m 以浅的水域安全工作。2000 年 6 月,海洋拖曳式多道伽玛射线能谱仪在渤海近海海域进行了实际测量勘查油气田试验,完成测线 150 km,测线 5 条,定点测量点 12 个,仪器在整修试验过程中软硬件工作正常。本仪器的研制成功为我国海洋资源及环境调查提供了新的技术手段。

### 3.6 其它国际领先的仪器和技术

从总体上讲,我国的地球物理仪器与国外的差距还较大,但在某些局部,我们也有一些仪器设备和技 术 优 于 国 外,除 前 面 已 经 提 到 过 的 以 外,其 它 例 如 地 形 变 测 量,我 国 的 钻 孔 形 变 仪 可 以 测 到  $3 \times 10^{-11}$  相对形变,四分量,响应频率 DC-5000 Hz,有自检功能,性能优于美国的 GTSM 三分量钻孔应变仪。矿山井下震动测量仪器,近些年从波兰、德国、澳大利亚、加拿大、南非等国进口多台,国产的 KZ-1 型矿震仪与这些进口仪器相比,检测的分量多,采样率高,传输速率高,并有自检功能。东方地球物理公司的 PAI 技术集成了复杂山地、沙漠、过滤带、黄土坡、综合物化探、陆上地震储层描述和陆上油气富集区高精度勘探等 7 项技术分析,集中体现了我们提供采集、处理、解释一体化技术解决方案的能力,在国际上是领先水平,一些物探核心软件,如 KLSeis 地震采集工程软件系统,KLInversion 地震地质综合反演软件,GEModel-2D 二维建模与正演模拟软件,SSoffice 地震勘探测量数据处理与质量监测系统。以及一些物探装备,如山地砾石钻机系列及钻具,深井沙漠螺旋钻机系列、小型气抢震源船,沼泽

运输施工设备等也都是国际领先水平。

## 4 关于我国地球物理仪器的发展战略

### 4.1 几项原则

#### (1) 坚持自主创新,立足于“超”

我国地球物理仪器与国外相比还存在相当的差距。国外厂商渴望占有中国市场,但高精技术产品是不会卖给我们的,例如绝对重力仪,分辨率优于  $10 \mu\text{Gal}$  的就属于禁运的范围<sup>[8]</sup>。我们只能是自力更生,要自主创新,尤其是原始创新,要有自己独立知识产权的产品。仿制别人的,会有两个问题:第一是先进性,等你仿造出来,人家又发展了,你还是落后,所以要赶超,必须立足于超;第二个问题是知识产权,人家的东西,你可作为借鉴和参考,但必须走出自己的路子来,要有自己的科学思路,技术方案,实施途径。

#### (2) 逐步形成对地球物理仪器评价标准的共识

我们认为要设计什么样的仪器,要看我们需要什么样的仪器,目的性要明确。什么样的仪器算好,什么样的算差,得有个评价标准,前些年,大量进口之风形成之后,许多推销商总是只把自己仪器的长处加强宣传,混淆了许多买家的视听,2008 年 5 月份我们召开了一个全国性的地球物理技术方面的会议,会上有代表就提出:“谁都说自己的产品好,我们也不知道买谁的”。我们认为买什么样的仪器要看你做什么工作,要解决什么问题,要考虑仪器的性能价格比,不是追求仪器指标越高越好,所以仪器设备要分档次。比水平,要在同一档次的仪器里比,步枪就是步枪,不能去和火箭比,步枪的水平,要在步枪这个档次里去比。下一个问题是比什么,地球物理仪器大多数是要在野外现场工作的,我们提出几条评价标准<sup>[9]</sup>,供同行们切磋时参考:

① 仪器要稳定可靠:鉴于地球物理仪器使用环境等特点,首先是仪器能在恶劣的环境下稳定工作,建议以后仪器指标里加一项“平均不间断工作时间”这一指标。

② 要能多取得信息:这就要求仪器灵敏度高、分辨率高、噪音小、动态范围大、频响宽,具体范围视各种仪器的使用目的而定。

③ 整套仪器系统的准确度要高:这里特别强调“整套系统”,一种仪器是由若干个环节组成的,外商的宣传往往是把他们做得比较好的环节的指标拿出来,以前我们有人也就跟着追他们这个指标,其实并无必要,譬如说某仪器系统,有的环节是“分析天平

的准确度”,有的环节是“天秤的准确度”那么整个系统的准确度也还只是天秤的准确度,那么我们的力量应该放在哪里?应该去抓准确度低的环节,而没有必要去追那些已经比较准确的环节的指标.

④对仪器功能指标要综合评价:一套仪器系统有多项指标,某种仪器这项指标高些,另一种仪器那项指标高些,那么整套仪器的水平哪个高,哪个低?有些国外产品,往往把某个环节上用了点新技术或用了点新器件而大加宣传,并以此证明其先进性,我们认为整套仪器是否先进,还是要全面衡量,不能只看局部指标,不等于说你用了一些我们没有用或者还没有能力用的器件或技术就证明你的仪器就是先进的.

⑤维护方便:要求仪器轻便,携带、运输方便,仪器应低功耗、高效率,从而可减轻电源的重量.

操作要求尽可能智能化、尽量向“傻瓜”型发展,最好一般人员都能操作;应增强智能检测、监测及远程遥控、遥测功能.

仪器对恶劣环境适应性要强,这样选择观测点就不会那么困难,地球物理仪器往往要在室外的高温环境,或低温环境下工作,也可能在相对温度很高的环境下工作;因此仪器要耐高温,耐低温,有些仪器还对密封防潮应有较高的要求.

仪器要结实,不能一搬动、一运输就坏,要有足够的抗震动、冲击的能力.仪器还应该对外界环境电磁干扰场,工业电网干扰,雷电等等有必需的防护能力.

⑥全球适用:我们做的仪器要能够在世界各地使用,因此在指标上,在数据格式上,在电源供应上,以及工作环境等方面都应有所考虑,一旦国外需要,要能提供出相应制式的产品.

(3) 必须坚持科研、生产、使用相结合

科研、生产,使用形成了互相制约又互相促进的三角关系<sup>[10]</sup>.科研成果要尽快转变成产品,变成生产力,现在这种转换周期很长、有许多成品成了“独生子”,出了样品就止步了.因为就研制者任务而言,他已经完成了,但我们研制的目的是为了拿出去用,成品不等于产品,产品不等于商品,最后我们要有商品到市场上去,到用户手里去.

至于需要研制什么,需要生产什么,应该听使用者的,仪器用得怎么样,还有些什么问题,应如何进一步改进和发展,使用者也应多提出建议.

科研、生产使用相结合,这个原则好说,但如何结合好还是不容易的.

(4) 要积极引用其它科技领域的新兴技术

地球物理仪器所需要用到的技术,面是很宽的,目前已涉及机械制造,一般电子技术、多种换能技术、计算机技术、数据传输及网络技术、激光技术、微电子技术、超导技术、全球定位技术、控制技术,地理信息技术等等.也要用到许多优质的材料和先进的加工工艺,这些相关领域的发展直接影响地球物理仪器的发展.许多领域的仪器原理是相通的,所用的技术也是相通的,要关注种种新兴技术的发展,把它们用到地球物理仪器中来.拓宽思路,加强学科渗透和技术交流.

(5) 重视提高工艺水平和产品的售后服务

常听人说,国内仪器爱出毛病,不如进口仪器稳定,究其原因,相当大的一部份是加工工艺问题,接插件的质量问题,接触不良,防潮不好导致噪声增大,抗温度变化的措施不力,电源质量问题等等.一般在设计原理上并没有多大问题.

工艺问题有两方面因素,一是受我们工艺水平的限制,另一方面则是不重视.

解决办法也有两个方面:一是重视工艺,仪器出厂要有不间断工作时间这项指标,另一条要强调售后服务,厂家及时负责维修.在与国外仪器竞争中,售后服务是我们的优势,我们要充分发挥这一优势,国内仪器出了故障,我们可在数小时内到达现场,我们国产仪器的维修应形成一个协作网,不要只能修自己厂出产的仪器,这样,国产仪器的维修点就可以多得多.国产仪器要对抓好售后服务这一环给予足够的重视.

4.2 应予关注的地球物理仪器发展领域

(1) 大探测深度地球物理勘查仪器研究与开发

我国面临比世界其他国家更为严重的资源与环境问题.我国现有矿山的开采深度越来越深,较浅深度的资源会越来越少.要持续发展,必须向深层探测.地震法勘探是找油的主要方法,为了作精细探测,为了向深部探测,测线要长,测点要密,频响要宽.于是多道地震仪一直在快速发展,现在已经达到万道以上,相应地对于仪器有两方面问题,一是震源,一是信号接收和数据采集.应注重研制车载式精密高频可控震源;时间可控的多点程控爆炸机.在信号接收方面,由于道数很多,就必须小型,低功耗.采用 MEMS 系统把传感,数采集为一体是有效的途径,应抓紧这方面工作, MEMS 直接输出数字化数据,这与原先的用动圈换能器另加数据采集相比是一个明显的进步,但用 MEMS 碰到一个如何提高信



噪比的问题,原来用动圈型地震检波器可以组合检波,用了 MEMS,出来已是数字信号,就不能用简单的串、并联办法.为了提高采用 MEMS 系统的信噪比,以达到向深部探测的目的,建议做一个信号叠加器芯片,每个测点布多个 MEMS,每个 MEMS 的输出按同一时刻的采样值在芯片里叠加,相当于将若干个动圈型地震检波器串联起来,这样的芯片,就我国现有的微电子技术水平,做起来并不难.

地下水问题,属于生命线工程,我国许多缺水地区的地下水深度达 150 m 以上,目前引进的核磁共振找水仪探测深度有限,必须开发适应大于探测深度 200 m 的地下水探查仪器,包括大探测深度的核磁共振找水仪,电磁法探测找水仪及两种方法以上的联用仪,用天然电磁辐射测深技术找水,也是一种有效而简易的方法.

深部资源的探测有多种途径,但任何一种仪器都有它的长处,也有它的不足,因此多种方法并用,进行综合观测,形成一个综合地球物理信息监测与处理系统是必要的.

## (2) 航空物探技术

地形复杂的山区,陆海交界边缘,难以地面人为探测的地区,以及海域资源的探测,需要用航测.重点要研制高精度全张量航磁测量系统,大探测深度的航空电磁测量系统以及航空重力梯度测量系统.

## (3) 海洋探测仪器

我国海域广阔,海底资源丰富,现在探测能力还很不足,尤其是我国南部海域,这种情况必须改变,要着重研究不同水深的水底电磁法仪器,包括不同水深的时间域电磁法仪器,海底 MT 仪器、海底电磁测深仪器,海洋磁力仪和海洋磁力梯度仪.海洋震源及相应的地震勘探仪器,海底拖曳式多参数探测仪以及海底水合物探测专用仪器.海底水合物的存在影响海洋地震勘探的可靠性,它会产生似海底反射层,有观测结果表明,在含有水合物的区域内电阻率的变化比声波速度变化高两个数量级,海洋探测也要综合探测,用海底电磁探测获得海底纵向及横向电阻率变化、再加上地震法等.

## (4) 地球物理仪器为国防服务

主要是探测军事目标、导航、反潜等.主要是电磁仪器和重力仪器,尤其要注意梯度测量仪器的发展.

重力梯度测量首先是出于军事的需要,上世纪 70 年代美国海军花了 10 亿美元研究一个测量重力梯度的系统,梯度测量值与测点的高程无关,从而重

力梯度异常比重力异常具有高得多的分辨率.这在军事上有用,对石油、矿产勘探也很有用,它可以比重力仪对地质细微结构得到更好的分辨率.现在世界上正在使用的 37 种重力仪器中,梯度仪只有 4 种,而正在研制的 24 种重力仪器中,重力梯度仪占 18 种,而重力仪只有 6 种,国外某能源公司认为全张量重力测量技术有望成为油气勘探的一项革命性技术.可见重力梯度测量是重力测量的发展趋势.不过,现在重力梯度测量数据的解释方法在应用方面都还不成熟.对于我国来说既要加速重力梯度仪的研究,也要加强精确的重力梯度数据的处理方法和解释理论的研究.

同样,磁梯度测量也消除了测点高度的影响因素,也应加速发展.

## (5) 对地质灾害的监测研究

地震、海啸、滑坡、泥石流、矿山灾害都需要多种地球物理仪器进行监测研究,汶川大地震造成的灾难又一次教训了我们,必须坚持不懈地加强自然灾害的预测,预报工作,决不能知难而退,应该承认任何事物都有一个从量变到质变的过程,大的灾害前不可能没有前兆,没有观测到或者没有识别出前兆,不等于没有前兆,应该广开思路,要有非找到前兆信息不可的决心,当然抓前兆信息有一个艰苦的去伪存真的过程,而且前兆信息也未必是单一的,也可能有多种,不同的地震类型前兆的反映也未必相同,但应该坚信前兆信息应该是有的.

近年来矿难也屡次发生,尤其是煤矿,主要是水患、瓦斯突出及冲击地压,我们主张在煤矿开展震动监测,现在煤矿已有多种监测手段,但对于了解矿体内部应力状况的变化只有通过震动监测.

除上所述,地球物理仪器是地球物理各学科研究的基础,在各学科的发展研究报告中也已述及了该学科仪器应予重点发展的内容.

## 5 发展我国地球物理仪器的保障措施

中国的地球物理仪器要快速发展,必须把各方面的积极性都调动起来,这是一个政策性很强的问题,应该由政府有关部门采取相应的政策,对此我们提出一些看法和建议:

### (1) 要保护中国产品优先进入中国市场

现在有些招标办法客观上是保护了已经进入中国市场的外商,譬如投标资格,要求招标所列仪器设备已经有了多少国内用户,已经用了多少年等等,而我国的现状是,改革开放以后进口设备很多,国外厂



商已经占领了相当大的市场,这样的规定无疑有利于这些国外厂商继续扩大他们的市场,而如果国内某单位新试制出一些产品,目前很可能还没有用户,这就会被排斥在外,这样的规定应该修订.也许会有人说,没有用过的设备我用起来不放心,或者,只是一个小企业生产的,他们不能按时供货又怎么办?这样的顾虑是合情理的,那应该用具有法律效力的协议、合同来保证,新投标者的产品没有用过,可以辅以专家推荐意见,可以用资产抵押担保,大单位、大企业担保等等办法.但是方针不能变,在国内某产品与国外相当,甚至性能指标还高于国外同类产品时,必须采用国产的.

(2)集中力量组织攻关

对一些难度较大的设备由政府有关部门立项,投入足够的资金,组织强有力的队伍,有计划、按进度去攻坚克难,提倡拼搏精神.对于较大的项目的立项和验收尤其要重视不同行政系统的同行专家意见、经常在一起工作的人往往会有一些相似的习惯,相似的看法和想法,无形中会有一些圈子,多听圈外人员的意见对事业的发展会有好处,俗话说“旁观者清.”

(3)注意发现和扶植有创新的仪器设备

发明和创新有时并不一定能订计划,也不一定需要大兵团作战,有许多重大科学发现或技术成果也就只是几个人在一个实验室里做出来的,这些发明创新者有些可能是工作在很有基础的大单位,但也有可能是出自一些小企业,甚至是个体户.在我国地球物理技术界就有一些这样的例子,有些离退休的老同志由一些民营企业提供一点资金或自己筹集一点资金做出了世界领先水平的仪器设备,我们有关政府部门应该给予扶持.我们国家具有高级职称以上的科研人员,一半已经离退休,其中有许多人身体状况很好,他们很愿意再为国家、为人民做点事,这应该受到欢迎,关于发挥老知识分子的作用的问题,2005年国务院办公厅曾发过一个9号文件,希望这份文件能真正落实执行,人们也常常谈论人才短缺的问题,其实这一批人才若能让其发挥作用,对国家是会很有好处的.

(4)地球物理仪器的特殊性 & 学术团体的作用

地球物理仪器使用的面很广,从事研发生产的部门也很多,没有哪个部门总管,于是重复研制的现象很普遍,石油系统、地质系统、矿业系统、地震系统、水电系统、计量系统还有许多大专院校,都在做,

各个部委都垂直领导,自成系统,这就是地球物理仪器所处的特殊情况.于是就出现了一些需要解决的问题:横向的交流、互补、合作,谁来组织?地球物理仪器的评介标准又如何达成共识?一些民营的小企业,乃至个体科技工作者又由谁来关心?等等,我们认为对于这种情况,科协应发挥更多的作用,中国地球物理学会在中国科协的领导下应该在这方面多做些工作.

科协及其下属的社会团体的优势在于拥有各个方面的专家,应充分起到桥梁作用,发挥这种优势.这种桥梁作用包括横向和纵向两方面,希望能形成一种机制:下面学术团体有建议或要求能通过科协向上传递,科协又能够向中央反映、汇报,或与有关部委沟通,并且能把反馈信息再往下传到下属的就会团体.上面有什么精神,科协通过下属的社会团体传达到广大科研群众,下面去领会、去推动、去执行,如能形成一种可运行的桥梁作用的机制,我国的学科发展将会出现更为生动活泼的局面.

**致 谢** 参加本文撰写工作的还有邓明、陆士立、郭有光、陈斯文、岳棋柱、易碧金等同志,文稿经过了集体讨论.

参 考 文 献 (References):

[1] 刘代志,黄世奇,钱昌松. 发展军事地球物理,为国家安全作贡献 [J]. 地球物理进展,2006,21(1):248~250.

[2] 胡祥云,杨迪坤,刘少华,等. 环境与工程地球物理的发展趋势 [J]. 地球物理学进展,2006,21(2):598~604.

[3] 钟世航. 中国工程物探仪器现状及发展的思考. 2006 中国(上海)国际地质科技论坛上报告. 2006.

[4] 吴天彪. 我国地面重磁仪器的现状与前景. 2006 中国(上海)国际地质科技论坛上报告. 2006.

[5] 郭有光. 绝对重力测量技术的进展和 GA-1 型绝对重力仪 [D]. 北京:中国地球物理学会地球物理技术委员会,2006.

[6] 岳棋柱. 天然电磁辐射测深技术的应用[J]. 地球物理学进展,2004,19(4):873~879.

[7] 陈祖斌,滕吉文,林君,等. BSR-2 宽频带地震记录仪的研制 [J]. 地球物理学报,2006,49(5):1475~1481.

[8] 林君. 自主创新,发展我国的地质仪器. 2006 中国(上海)国际地质科技论坛上报告,2006.

[9] 陆其鹄. 发展中国地球物理仪器的几点体会. 2006 中国(上海)国际地质科技论坛上报告,2006.

[10] 滕吉文. 中国地球物理仪器的研制和产业化评述[J]. 石油物探,2006,45(3):209~217.