

我国地球物理技术的进展

Progress of Geophysical Technology in China

陆其鹄 陈益惠 丁鸿佳 刘士杰

刘宝诚 李 颖 赵鸿儒 郑治真

(中国地球物理学会, 北京 100081)

地球物理技术是研究地球物理科学和应用地球物理科学于生产实践的一种手段。它包括的内容十分广泛,而且其含义也在不断变化和扩展,例如原来高空物理和大气物理也归属于地球物理的范畴。本文所指的地球物理,主要是指固体地球物理,与其有关的地球物理技术主要有模型试验,多种地球物理信号的观测仪器与观测方法,地球物理观测信号的分析与处理等。近年来,我国研制的具有国际先进水平的仪器设备相继问世,观测方法的研究、模型试验以及信号处理等方面也都有许多新的进展。

一、模型试验

近年来,超声地震模型试验工作进展迅速,主要有北京大学地球物理系等有关单位提出的全波震相分析的思想 and 以此为基础的多波探测技术及其应用。全波震相分析是用运动学和动力学的特征来识别、确认在一定持续时间内震波记录中全部或所感兴趣的震相,分析地震波在测点激发的三维空间内的质点振动,并用质点振动矢量图或质点振动轨迹图来表示。中科院地化所对叶蜡石、玄武岩等样品作了试验,试件直径 10~12 毫米,长 32 毫米,所达到的压力为 0.1~5.5 吉帕,温度自室温至 1600℃ 范围,在这样高温高压条件下,应用全波震相分析方法,分出了 P、S 以及三次反射的 PPP、SSS 等震相。通过模型实验研究发现了某些新震相,例如 S' 波是国外专家在理论合成地震图计算中发现的一个新震相,但他们只用了单层介质的数学模型。成都地院不仅发现了 S' 波,还发现了在两层介质界面滑行的 S_n 波;不仅在理论计算上发现,而且还得到模型试验的证实,还给出了野外观测记录中分辨出 S' 波的实例,并从物理机制上对 S' 波和 S_n 波的产生作了较详细的研究和解释。

模型试验工作进展的另一个特征是走出了实

验室,进入了工程应用领域,多波探测是其重要方面。利用多波可以提高探测薄层的分辨率。北京大学等单位曾用多波勘探技术探测出 900 米埋深中 2 米厚的煤层。北方交大用多波 CT 技术在云台山做了隧道超前探测,用 PP、SS、SP、PS 四个震相做了四幅 CT 成像图。四幅图符合得很好,都显示出前 50 米处的断层,开挖后证实了其准确性。

北京大学做过一个模型试验,研究北京凹陷的天坛—西直门剖面。模拟震源位于城区东南方一定距离以外的地壳内。由于多波的综合效应,在一些射线汇集的地区振动增强,如在天坛、前门、西四附近出现较为突出的峰值,这与当年唐山地震对此地区造成的地面实际破坏情况比较一致,解释了在土质条件等因素相同的情况下,有时远离震源处破坏反而比近处强的现象。这说明,研究地震的破坏效应不仅要研究某一点的振动效应,而且要研究诸如射线的汇集、离散等地震波的传播效应。

此外在测桩中用了多波的瞬态谱分析,研究了完整桩与断桩谱的差异,发展了断桩检测的新方法。与此同时,还发展了混凝土路面的 TVR 超声综合测强方法,并在此基础上用多波测定路面厚度,误差可在 5% 以内。

二、重力仪器

这里介绍一种达到国际先进水平的相对测量重力仪和一种绝对测量重力仪。

国家地震局地震研究所研制的 DZW 型微伽重力仪,是通过位移的相对变化来反映重力加速度的变化。DZW 重力仪采取了一系列有效措施,位移测量可达 10⁻⁴ 微米;温度可稳定在摄氏 10⁻⁴℃ (国外一些重力仪还要另加温度补偿)。整个重力加速度的相对测量为微伽量级。

中国计量科学院研制的 NIM—Ⅱ 型绝对重力仪(参见封底彩图)用了波长稳定的激光源和作为

时间基准的铷钟,在时间和行程的测量上采用我国自己独创的符合法。1989年在巴黎参加国际计量组织的国际比对中,NIM-Ⅱ最早报出结果,而且准确可信,精度在10微伽以内。NIM-Ⅱ已在全国建立了48个绝对重力测量点,现已应用于基础科学研究。

三、磁法仪器

由于近年来质子磁力仪、光泵磁力仪、超导磁力仪相继问世,以及电子技术、微机技术的迅速发展,磁法仪器的精度不断提高。各种磁力仪各有各的特点,各有各的用途。质子磁力仪、光泵磁力仪的准确度高,但它们是标量仪器,不能测定磁场方向;光泵磁力仪的灵敏度优于质子磁力仪,但准确度却不如质子磁力仪。超导磁力仪是向量型仪器,灵敏度也高,分辨率可达 10^{-6} 纳特,但只是相对测量仪器,而且价格昂贵,工作条件要求也较高,一般在高精尖的科研项目中采用。磁通门磁力仪探头简单,抗干扰能力强,灵敏度也比较高,而且小巧轻便,在工程上、军事上有很多特殊的用途。古老的机械式磁力仪也有它的优点,长期稳定性好,结合电子技术和微机技术,这类仪器又有了新的发展。WWS-1型数字式双无定门磁力仪就是一例,这种改进后的新仪器分辨率可达0.01纳特。所以,目前磁法仪器的发展还未发生由某一类仪器完全取代其它仪器的迹象。

地矿部航空物探中心研制的HC-85型航空光泵磁力仪,分辨率为0.01纳特,仪器轻便,采用数字存贮记录,已向美国出口;现又改进为HC-90型,分辨率又提高一个数量级,它的探头只有0.5公斤,断电后仍可保存4000个测点的数据,设有串行、并行接口和微机打印输出。

中科院地球物理所研制的CTM-302型磁通门磁力仪(封底彩图)采用环形探头,灵敏轻便,1982年通过鉴定,性能指标达到当时国外同类仪器产品水平,1985年开始在中国南极长城站投入使用,连续八年工作稳定,之后又在中山站安装使用。

由中国科学院地球所等单位研制的CTM-DI磁力仪可精确测定地磁场倾角和偏角。在地磁总强度F、地磁水平强度H、地磁垂直强度Z、地磁倾角I和偏角D这五个常规观测的地磁要素中,D是实现一个测点地磁矢量观测必测的要素,无可替代,现有的国内外观测仪器大多精度偏低,且观测繁琐。该仪器采用了一系列新材料、新技术、新工艺,在许多关键处都有所创新,观测精度高,一机多用,便于携带,“无磁”性能优异,操作简便迅速,工作稳定可靠,适合台站或流动观测。该仪器独特之处是为测D、I分量配有“无磁”经纬仪,使观测精度达到

$\pm 0.1'$,磁分辨达到0.1纳特。该仪器的研制成功,使我国成为世界上唯一能生产整套DI磁力仪的国家,也成为世界上少数几个能够研制生产“无磁”经纬仪的国家之一。该项成果的主要性能技术指标均已达到国际上同类仪器的先进水平。

北京地质仪器研究所研制的CFJ-1型三分量井中磁力仪探管外径40毫米,能在19.6兆帕水压,温度为 $-10\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的井中工作。它采用了20位的A/D转换,数字显示,微机控制,现场实时处理,为我国井下磁场绝对值的测量提供了体积小、分辨率高、动态范围又较大的现场观测设备。

四、天然地震仪器与观测技术

测震技术在地球物理中的应用也很广泛。地震可分为人工地震与天然地震。人工地震旨在利用地震波探测地球内部,如地震探矿、地震测深、工程地震探测等。人工地震的观测方法一般是布置测线,多点同时观测,观测资料是用计算机处理,做出结构剖面。上述几种不同目的的人工地震在观测技术上的主要差异在于观测频段不同,从而所布测线的长短以及时间精度的要求也各异。国内地矿、石油、工程等部门从事这方面工作的单位很多,多道的数字地震观测仪已有很多种,地震剖面成像技术也达到国际水平。

天然地震仪器及观测主要由国家地震局及其下属单位在进行。

一次仪表的变革主要是电子反馈技术在拾震器中的应用,拾震器的换能元件参与到电子反馈回路,这样不仅可以用机电的方法,而且可以用调整电子回路特性的办法来调整拾震器的固有参数,例如电子反馈式宽频带地震仪、力平衡式加速计等。其优点是展宽了频带,扩大了动态范围,提高了稳定性。除超长周期频段外,这类仪器国产的已有多种,其主要性能指标与国外相当。

二次仪表方面,70年代国外推出多种便携式数字记录地震仪,后来又不断改型。80年代我国也研制了十多种这类仪器,与国外同类产品相比各有特色。国内在大动态宽频带数字地震观测技术方面,过采样、非等步长采样、数据压缩、 $\Sigma\delta$ 调制、多相编码调制,以及自适应技术等都有所采用,智能控制程度也有所提高,从较简单的控制模式进入用数字信号处理(DSP)进行预处理后再进行控制。A/D转换分辨率不断提高,现在已在采用24位A/D转换。

地震信号及资料的处理已实现计算机化。我国如今的地震资料已不仅是地震图纸,还有数字盘片或磁带。原有的地震图可通过数字化仪采样,模拟磁带记录可通过计算机控制的数据采集;已经是数

字信号的则通过接口直接输入,由计算机加工成记录在磁介质上的数字资料。以微机为中心的小型地震数据处理系统在国内已很普遍。

我国已建成九个数字地震台网,1985 年开始运行,现已取得大量资料。核爆炸虽是人工震源,但其观测系统与天然地震类同,由上述九个台中的三个台又组成了一个地震核查系统,三个台的信号通过卫星通道传到北京数据处理中心,传输率为每秒 64 千字节,并与国际联网。处理中心用了 Sun 4 工作站,运算速度为每秒 22 万次,内存 160 兆字节,可以根据实际地震波形即时设计滤波器,提高信噪比,可以给出频谱等地震参数,可以编制报告,还可以进行国际话路通话、国际电子邮件通邮等。

我国拟在全国形成一个数字地震信息网,有国家、区域、地方三级数据处理中心,通过各种通讯方式实现观测站、处理中心、用户之间,以及各级数据处理中心之间的信号汇集和数据交换。

五、电法仪器与观测技术

以前对于电流频率为零的测量称为“电法”,频率不为零的叫“交流电法”(后称为“电磁法”),以后者用得较多,发展较快。被动式的仪器是用以观测自然界电场的,例如岩性检测仪(Petro Sonde),就是用电磁波法观测自然界本身的电磁场来确定地下岩石的岩性,从而用于找矿,有关机理的研究引起国内许多学者的兴趣。地震前发生电磁信息的变化是靠观测大地电磁场的变化获得的,属于被动式的,或称无源的,即无人工激励源。而发展更快的是主动式的,即有源的观测仪器和方法,如大地电磁测深、地壳的分层结构研究、用地质雷达进行的浅层较精细结构的探测、以及地下管线探测、电磁波 CT,等等。

随着工程测量发展的需要,管线检测仪引起国内许多人的兴趣,英国的 RD,美国的 Subsite 在国内市场上很受欢迎。中国地质大学管线探测技术研究中心推出了 GX 系列地下管线检测仪(参见封底彩图)已达到国际 90 年代最新水平。美国 Subsite 70 型是 90 年代最新产品,它的最大探测深度是 6 米,GX 系列可达 10 米,探测精度等其它指标各有高低。

电磁波 CT 技术十多年来在国内已有明显进展。CT 技术就是用射线探测加上计算机处理成像,是一种无损探测方法。国内电磁波 CT 的设备大体上有两类,一类是用于井孔,一类是用于坑道。地矿部计算中心、物化探研究所、河北煤研所等单位,共同研制了相应的仪器设备,并用于勘查厂房地基、水电站坝基、金属矿体等方面。近年来国家地震局地球物理研究所在这方面也做了很有成效的工作。

他们采用双井电磁波 CT,在一个井孔发射,另一井孔接收,发射频率 10 兆赫左右,分若干档,发射功率最大为 100 瓦,收发井孔的距离最大可到 100 米,在山东某金矿做出很清晰的层析成像图(参见封底彩图)。1992 年通过国家黄金局鉴定,确认为国际领先水平,同年在日本召开的地学成像(Geotomography)会议上得到国外同行的好评。

中南工业大学研制的 F-1 频谱激电仪,是双频道振幅—相位和频谱测量的仪器,它可作激电普查兼异常初步评价,又可作评查研究,可发送一对双频,也可发送和观测八对双频信号,组成 0.028~32 赫共 16 个频点的频谱测量。他们不仅在仪器研制方面,而且在理论和方法上也进行了卓有成效的研究。例如,从电化学理论出发,建立了当电流密度不很大时矿物—溶液界面的面极化等效电路模型,分析计算了双频电流激发下该等效电路的过电位响应,并分析了双频道频谱激电非线性效应的实践结果。

中国电波传播研究所“随钻电磁波传输信道可行性研究”项目 1991 年通过国家鉴定。目前是通过泥浆把井下信息传送上来,若用电磁波传输则迅速方便得多。该项目组在十口石油钻井中进行了十多次实测研究,获得了在不同频率与地层电阻率情况下,地面信号电位随源深变化的可靠数据,最深传输深度达到 3 280 米,比国外发表的唯一实例还深 200 米。

探地雷达是在对电磁脉冲研究的基础上于 60 年代发展起来的一种主动遥感、非破坏性的地质勘探技术。如果激发电磁脉冲的宽度极窄,能量高度集中在传播方向附近,就成了电磁导弹(Electromagnetic Missile)。电磁导弹具有良好的慢衰减性和方向性,有利于提高探测距离。又由于脉冲极窄,从而频带甚宽,分辨能力也更强,无疑是探地雷达的发展方向。

六、信号处理

地球物理信号处理旨在从所观测得到的地球物理数据中识别、量测有用的信息并进行估计、预测和外推。观测到的地球物理信号往往有以下的特点:其一,伴随着很强的干扰背景,于是必须用时域的、频域的各种滤波方法以及自适应滤波方法解决强干扰背景下微弱信号提取的问题;其二,地球物理过程在本质上是一个非稳态过程,因此对地球物理数据的处理必须采用非稳态理论和随机信号理论。谱估计是现代信号处理中的重要方法之一,在地球物理学中已有广泛应用,这方面工作的焦点是提高频率分辨率。例如 1967 年伯格(Burg)提出了

(下转第 15 页)

法规管理系统等——都是地球系统工程的主要内容。我国应将地球系统工程作为一项前沿科学技术研究领域并作为一项长期科学发展计划予以重视。

3. 将资源、环境、灾害等问题纳入地球系统科学研究

从某种意义上讲,资源、环境、灾害等研究弥补了地球科学对社会、环境以及全球问题关注不足的缺陷。但是,从实体的、系统的角度看,资源、环境与灾害基本上是地球系统的一个断面。人们通常将对己有利的那部分地球系统列入“资源”,将有害的部分纳入“灾害”,将已经改变、正在改变或将要改变的对自己有(潜在)危害作用的那部分划为“环境”。三者本质上均可归结为地球系统及其环境,因此应将这三者纳入地球系统科学研究领域。这种对客观上整体存在的地球系统做人为的肢解,显然不符合系统的思想,也不利于地球科学的整体系统性发展。因此,地球科学须总结各分支学科(包括边缘领域)的研究成果,从系统角度重新认识并重新构筑地球科学的研究对象——地球系统以及研究目标,这样才能更好地判定各分支学科的相应位置与发展趋向。

4. 重视土圈研究

土圈,并不仅限于土壤,它实际上也是一个独

立的地球圈层,与农业发展、生物演化、气候变化、土地沙漠化及水土流失等问题密切相联。在美两国的地球科学前沿,对土圈关注均有限,这显然不利于地球科学的整体发展。

5. 继续以大项目研究带动地球科学前沿

由于我国地球科学研究无论在人员、资金,还是成果、信息、活动等方面都受到部门、学科分块的限制,故应以大项目研究,以科学问题的提出、阐明及解决为主线,这样才会更有助于跨学科、高度综合的地球科学研究。

6. 加紧筹建中国地球系统信息共享系统

坚持信息共享、快速及时的原则,与国际同类系统尽早联网,这是提高我国地球科学水平的长效措施。

7. 调整地球科学政策

地球科学发展目标应更多地考虑人类社会日益紧迫的社会与环境问题,注重科研成果的社会效益取向,大力营造有利于跨学科研究的各种环境,力求科研语言的通俗化。这些都有利于不断提高社会公众及有关决策管理人员对地球科学的了解,由此推动我国地球科学事业的全面发展。

(责任编辑 蔡德诚)

(上接第 18 页)

最大熵谱法,把分辨率提高了几倍,但缺点是存在谱线分裂,谱峰偏移。1983 年约翰逊(Johnson)等人提出了最小交叉熵谱法,并对多信号组进行了处理,改进了最大熵谱法。但是无论是富氏谱、功率谱,还是最大熵谱,都是属于稳态理论,对于非稳态的地球物理数据处理结果并不理想。1980 年克拉森(Claasen)等人提出了瞬态谱理论,现已用于地球物理数据处理。但有些地球物理过程往往很长,数据又少,时间域有限,为了在有限的时间域找到确定的谱,并提高瞬态谱的分辨率,小波变换理论也已在地球物理信号处理中应用。现代信号处理技术应用于地球物理问题有其特有的难点,往往是初始条件未知,边界条件未知,控制条体也未知,加之资料离散、有限,往往又是突发性的。所以地球物理学家们必须结合地球物理学的特点改进和发展新的方法。

信号处理是从事地球物理观测研究必不可少的环节。地矿部计算中心、国家地震局数据信息中心、石油煤矿系统以及中科院下属的许多单位,还有许多大专院校都在地球物理信号处理方面引用或提出了许多新方法,验证了一些科学论断,也解决了生产中的不少实际课题。

(责任编辑 肖庆山)

(上接第 21 页)

的数据格式有 TIFF、GIF、PCX 等多种,可以从这些数据格式中采用国际标准化组织推荐的,并在实际上广泛采用的数据格式作为数据交换标准。地理信息系统中使用的图形数据比较复杂,许多商品软件都是采用自己的数据格式,一些大型公司为了保护用户在地理信息上的投资,一般仅提供几个国际上流行的 GIS 商业软件中数据文件的转换程序。出于各种原因,这些数据格式没有公开,至今没有形成公认的数据交换标准。这种状况,给地理信息系统的用户带来许多不便。针对这种情况,建议我国电子信息标准化委员会会同有关部门,制定统一的地理数据产品规范和数据交换标准,予以颁布推广,在广泛使用的基础上逐步修改完善。例如,作为数字地图的地理信息产品,其产品的规格应该与我国基本比例尺地形图分幅一致,便于用户分幅检索和区域拼接。

以上是发展我国地理信息产业的一些思考与建议,希望引起大家对发展我国地理信息产业的关注,促进我国的地理信息产业的健康发展。

(责任编辑 冷远猷)