

文章编号: 1671-8585(2006)01-0014-06

地下管线探测技术综述

邹延延

(中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 简述了目前国内外的地下管线探测技术, 其中包括电探测法、磁测法、COD 法等, 分别介绍了各自的原理、特点和应用情况, 以及相关的仪器设备。在此基础上对地下管线探测技术的发展趋势作了预测, 认为它在今后的城市建设中的作用会愈加突出, 同时指出了管线探测技术中需要解决的一些问题和建议。

关键词: 地下管线探测; 探地雷达; COD 法; 城市建设

中图分类号: P631

文献标识码: A

地下管线被视为城市的生命线, 是城市的重要基础设施, 它担负着传输信息, 输送能量及排放废液的工作。当今的城市基本上都朝着功能性城市发展, 而地下管线的密集程度也可以从一个侧面反映出一个城市功能性的高低。由于历史原因, 我国许多城市地下管网分布不清, 档案资料管理不够规范, 某些厂矿企业地下管网的铺设, 甚至没有竣工图纸。上述这些都给城镇、工矿企业的建设与改造以及管线的使用与维护带来很多的困难。随着我国改革开放和经济建设的发展, 因施工过程造成损坏管线而引起人员伤亡、停水及停电等重大事故屡见不鲜。为了防止施工过程中损坏地下管线设施, 地下管线的探测已成为施工的必不可少的前提条件。探测地下管线对城市的正常运营及改造扩建具有十分重要的意义。

1 国内地下管线探测的简要历程

用地球物理方法探测地下管线, 是在 19 世纪末提出的。地下管线探测技术在我国起步较晚, 开始于 20 世纪 80 年代中期, 但发展很快, 在 80 年代末期就已经较成熟, 90 年代初形成一股热潮。国内的市政工程规划、设计部门, 测绘部门, 物探部门和建设施工单位, 以及大型骨干企业都购买仪器, 开发地下管道探测业务; 国内一些学者、工程界及仪器经销商每年举办 1~2 次学术或技术交流活动; 一些专职或兼职的职业探测公司相继成立; 政府及各省市区有关部门还以行政手段推广这项技术。1990 年, 广州黄浦区地铁口工程的勘察过程中进行了地下管线探测工作; 1996 年, 江苏工程物理勘察院完成了镇海炼油厂地下管线的探测; 2005 年, 中铁十六局完成了首都国际机场扩建工程中机场西区改造工程 L 滑行道箱涵顶进工程、首都机

场 T3 航站楼前交通工程、首都机场专机楼和公务机楼工程、首都机场扩建工程航站区综合管网工程。地下管道技术在市政管理及单项工程建设中的应用不仅考验了一批仪器, 而且培养了一批技术业务骨干, 开辟了大面积推广这项技术的路子。在此同时为了统一全国地下管线探测工作, 建设部于 1993 年编制了《城市地下管线探测技术规范》^[1] (CJJ61-94) 作为行业标准, 用于指导和规范地下管线的探测工作。

2 各种地下管线探测技术的原理及特点

地下管线按其物理性质可大致分为 3 类: ①由铸铁、钢材构成的金属管线; ②由钢、铝材料构成的电缆; ③由水泥、陶瓷和塑料材料构成的非金属管道。上述管线与周围介质在电性、磁性、密度、波阻抗和导热性等方面均存在差异, 因此我们可以利用导电率、导磁率、介电常数和密度等物理参数, 选择不同的地球物理方法进行探测。地下管线探测方法一般分为 2 种: 一种是井中调查与开挖样洞或简易触探相结合的方法, 目前在某些管线复杂地段探测中采用, 在检查验收中也需采用; 另一种是仪器探测与井中调查相结合的方法, 这是目前应用最为广泛的方法。在各种物探方法中, 就其应用效果和适用范围来看, 依次为直接法和插钎法、电探测法、磁探测法、COD 法、地震波映像法等。其中电探测法中的电磁感应探测法具有探测精度高、抗干扰能力强、应用范围广、工作方式灵活、成本低、

收稿日期: 2005-07-20; 改回日期: 2005-08-23。

作者简介: 邹延延(1982—), 女, 中国地质大学地球探测信息与技术专业硕士在读, 从事三维 VSP 技术的正反演研究。

效率高等优点,是目前国内外最常用的方法。

2.1 直接法和插钎法^[2]

当阀门井和消防井分布较密时,可采取在井内直接观测和追索的方法,这是一种可行又直观的简便方法;在埋深较浅且覆盖层又很松软时,可采用钢钎接触方法,这是一种经济、简便有效和可行的方法。

2.2 电探测法

电探测法是属于地球物理探测方法的一种,通常称为电法探测。电法探测可分为直流电探测法和交流电探测法两大类。

2.2.1 直流电探测法

此方法是用2个供电电极向地下供直流电,电流从正极供入地下再回到负极,在地下形成一个电场;当存在金属管线时,由于金属管线的导电性良好,它们对电流有“吸引”作用,使电流密度的分布产生异常;若地下存在水泥或塑料管道,它们的导电性极差,于是对电流则有“排斥”作用,同样也使电流密度的分布产生异常。通过在地面布置的2个测量电极便可观测到这种异常,从而可以发现金属管线或非金属管线的存在及其位置。这种方法是以金属管线或非金属管线与其周围的涂层存在导电性差异为前提的,其中最常用的就是高密度电阻率法^[3]。

高密度电法基本原理与常规电阻率法完全相同。刘晓东等^[4]在新余市地下管线调查中,根据管道为混凝土质,其电阻率远高于围岩而易形成高阻异常,从而利用高密度电法发现了下水管道的管顶。在某中学扩建中,用金属管线探测仪无法探测到地下情况,刘万恩等采用高密度电法探测出地下管线走向及分布情况,其中有一条是直径为2.2 m的混凝土供水干管。另外,湖北神龙工勘院运用常规直流充电法,解决了武汉一住宅楼因地下供电电缆发生故障致使断电2天的难题^[5]。

尽管常规直流电法可以探测地下管线,但是由于该方法在敷设一次导线后只能完成一个记录点的数据观测,而目前在管线探测中常遇到目标体埋深不大或规模较小等情况,所以该方法效率就显得太低了;高密度电法是一种体积探测方法,与常规直流电法相比分辨力高且效率可观。但是,如果目标体的埋深过大,或是管道的直径太小,都会影响其探测效果,甚至探测不出来。为了取得较好的探测效果,需要注意选择电极间距和阵列长度,比如在大中城市利用高密度电法探测地下管道,不可避免会遇到地下杂散电流、接地条件恶劣和极化

电位差突变等影响,严重时难以得到客观的观测结果。相比之下,直流电法装置排列中的温纳排列,其测量电极间距与供电电极间距之比恒定为1/3,受外界干扰较小,应当是城市高密度电法探测中首选的排列形式。高密度电法作为今后城市地下管道探测的一种有效手段,可以与其他物探方法配合来解决金属管线探测仪无法探测地下非金属管道的难题。

2.2.2 交流电探测法

该方法是利用交变电磁场对导电性或导磁性或介电性的物体具有感应作用,通过观测发射产生的二次电磁场来发现被感应的物体。常用的交流电探测法有多种。

1) 甚低频法。

世界上许多国家为军事、商船通讯及导航目的设立强功率的长波电台,发射频率为1 525 kHz。采用这种电台作为物探工作的发射场源,达到找矿或解决其他问题的一类电磁法,通称为甚低频电磁法,简称甚低频法。目前,我国能利用的电台有:日本 NDT 电台,频率为 17.4 kHz;澳大利亚 NWC 电台,频率为 22.3 kHz;莫斯科 UMS 电台,频率为 17.1 kHz;美国 NAA 电台,频率为 17.8 kHz。这些电台功率一般为 500~1 000 kW,发射功率大,电磁波传播远,即使在 320~4 800 km 处亦可将这些电台作为找矿和解决其他问题的发射场源。

其原理是电台发射的电磁波在传播过程中,将会使管线及周围介质极化而产生二次场,由于管线与周围介质在物性上的差异,使二次场及其总场均有一定的差异,通过测量这些差异可发现引起差异的高阻或低阻管线^[3]。其中测量的方法有倾角法和波阻抗法。它具有场强均匀、噪声低、电台工作时间长等特点。甚低频法在理论上完全可以进行地下管线的探测,但是在实际应用中还没有得到广泛的推广。

2) 电磁感应探测法。

应用电磁法探测地下管线,通常是先使导电的地下管线带电,然后在地面上测量由此电流产生的电磁异常,达到探测地下管线的目的。其前提是:
①地下管线与周围介质之间有明显的电性差异;
②管线长度远大于管线埋深。在此前提下,无论采用充电法或感应法,都会探测到地下管线所引起的异常。从原理上讲,在感应激发条件下,管线本身及导电介质均会产生涡流。对于那些直径与埋深可比拟的管道而言,在地表所引起的异常既决定于管线本身所产生的涡流,也决定于大地—管线—大地

地这个回路中的电流,以及管线所聚集的、存在于导电介质中的感应电流。金属管线的导电性远大于周围介质的导电性,所以管线内及其附近的电流密度就比周围截止的电流密度大。这就好像在管线处存在一条单独的线电流。对一般平直的长管线,可近似将其看成由无限长直导线产生的磁异常。在距管线中心 r (单位:m)处,其磁场强度(单位:A/m)由毕奥-沙伐尔定律求得

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

式中, I 为流经管线的交变电流强度(单位:A)^[6]。常用的方法有 2 种:①主动源法,即利用人工方法把电磁信号施加于地下的金属管线之上,包括直接充电法、感应法、夹钳法及示踪法;②被动源法,即直接利用金属管线本身所带有的电磁场进行探测,同时应用电磁法进行管线探测时,其应用效果取决于管线的具体情况及环境条件^[5~7]。

李远强在一市区某路口采用瞬变电磁法探测出地下管道 4 条^[8],很明显地分辨出其位置和走向(其中 3 条管道并非埋设),自西向东分别为电力电缆、电力电缆、电信电缆和上水管道。王法刚等在某一实测区段用频率域电磁法进行地下管线探测时由于地下分布多条地下管线^[9],并存在多种干扰源,先对 1 条给水管进行充电法探测;对于电缆,则采用被动源进行探测,从被动源探测成果曲线可推求管线条数、空间分布位置及埋深。

该方法具有不接地,无损探测地下金属物的特点,在地下 5 m 以内效果都很明显,而且不论在理论或是具体实践方面都已经很成熟。虽然建立电磁场的方法有很多种,但是其中也有一定的局限。比如直接充电法是目前追索地下金属管线最为有效的方法之一,但必须有管线的出露点;夹钳法对多条电缆进行逐条分辨时有明显的优点,但通常使用时不允许中断运行。要注意的是为取得最好的探测效果,对每个工区都应通过试验后按频率选择原则选取最佳的工作频率^[3]。

1 kHz 以下:有利于长距离追踪及对大直径管道的探测。由于频率低,故不可以采用感应法工作,有时较易受到工频率干扰。

10 kHz:这是目前国内各类仪器采用较多的频率。应用感应法时,在小直径管线上较难产生大的讯号电流。

30 kHz:比较容易将讯号感应到大部分管线上,是一种较常用的频率。但追踪距离较采用低频时小,对地下水位较高的地区,其探测深度也较小。

80 kHz 以上:比较容易感应耦合到邻近平行管线,探测距离小,在管线复杂的地区应用受到限制。在干燥地区可应用感应法探测小直径电缆及短距离的电缆,同样在地下水较高的低阻地区,其应用少,效果较差。

3) 电磁辐射探测法——探地雷达。

1910 年,Letmbach 等在一项德国专利中提出,用埋设在一组钻孔中的偶极天线探测地下相对高导电性的区域,正式提出了探地雷达概念。Hülßenbeck 似乎是第一个提出应用脉冲技术确定地下结构的思路。Cook 于 1960 年用脉冲在矿井中试验,但由于地下介质与空气相比具有较强的电磁衰减特性,因此,探地雷达的初期应用仅限于对电磁波吸收很弱的水层或岩盐等介质中。如 1970 年 Hersion 在南极冰层上取得了 800~1 200 m 穿透深度的资料。随着电子技术的发展以及现代数据处理技术的应用,探地雷达应用领域也已由低损耗地下介质向有耗地下介质迅速拓展^[10]。20 世纪 90 年代初,国内开始引进和研制探地雷达。探地雷达(Ground Penetrating Radar,简称 GPR)是利用高频电磁波以宽频带短脉冲形式由地面通过发射天线送入地下,由于周围介质与管线存在明显的物性差异(主要是电导率和介电常数差异),脉冲在界面上产生反射和绕射回波,接受天线收到这种回波后,通过光缆将信号传输到控制台,经计算机处理后,将雷达图像显示出来。通过对雷达波形的分析,并利用公式

$$t = \sqrt{4h^2 + x^2} / v$$

可确定地下管线的位置和埋深。式中, x 为收发中点的坐标, t 为脉冲波行程时间, h 为管线埋深, v 为电磁波在介质中的传播速度。 v 值可以用宽角法直接测量,也可以根据

$$v \approx c / \sqrt{\epsilon}$$

近似算出。式中, c 为光速, ϵ 为地下介质的相对介电常数^[11]。因与探空雷达技术相似,故亦称“地质雷达”。

张进华等在南京市白下路污水管施工过程中,利用探地雷达准确地探测到铸铁煤气管和给水管等金属管线的位置,为管道设计和施工安全提供了重要的参考依据;在金坛市管线普查过程中,不仅地下水泥管的管顶反射清晰,而且还接收到较强的管底反射信号;在上海市黄浦江边对埋深达 9 m 左右的军用光缆进行了探测,反射信号非常强,从而准确判别出光缆的空间位置^[12]。汤洪志等在华

东地质学院职工澡堂门前探测出地下 3 根水管深度,与实际情况基本吻合;钱荣毅在福州市某居民小区也利用探地雷达对 PVC 和 PE 等非金属管探测有很明显地效果。

探地雷达能够很好地探测金属管线。在探测非金属管线时同样具有快速、高效、无损及实时展示地下图像等特点,所以也是非金属管线探查的首选工具,但是当地层电阻率低时,则探测深度小投资比较大^[10]。需要注意的是在进行地下管线探测时,首先要了解管线的类型、走向和大致埋深,合理选择天线频率,设置最佳时窗和选择滤波参数。地下管线埋置较浅时,时窗设置不宜过大,以有效突出管线反射信号;管线直径较小时,探测天线的移动速度不能太快,否则在图像上很难出现双曲线特征,会在垂直方向出现线状强反射信号。测线布置应尽量垂直于地下管线的走向。

2.3 磁探测法

早在 17 世纪,瑞典人就开始用简单的罗盘观测来寻找磁铁矿。1870 年瑞典人 Thalen 和 Tiberg 制成了被称为万能磁力仪的测量地磁场相对变化值的仪器,用来研究异常磁场,开展了较广泛的磁法找铁矿工作。1915 年德国人 Schmidt 制成刀刃式垂直磁秤,大大提高了精度。1936 年苏联人 Лагачев 试制成功航空磁力仪,大大提高了磁测的速度,扩大了磁测的范围。在 20 世纪 50 年代末和 60 年代初,苏联和美国又相继把质子旋进式磁力仪移到船上,开展了海洋磁测^[13]。我国的磁法测量从 20 世纪 30 年代在云南开始,直到现在,地面磁测、航空磁测、井中磁测和海洋磁测均已大量开展。随着磁法的不断推广与技术的不断完善,它也可以用在管线的探测中。

由于铁质管道在地球磁场的作用下被磁化,管道磁化后的磁性强弱与管道的铁磁性材料有关,钢、铁管的磁性较强,非铁质管则无磁性。磁化的铁质管道就成了一根磁性管道,而且因为钢铁的磁化率最强而形成它自身的磁场,与周围物质的磁性差异很明显。通过地面观测铁质管道的磁场的分布,便可以发现铁质管道并推算出管道的埋深,这就是磁法探测的原理^[14,15]。

在广东某海域进行的工程建设规划中,吕帮来和王传雷采用走航式顺利地找出了该海域一条水泥排污管线的具体位置及走向^[16]。尽管在管线探测的工作中磁法也有一定的效果,但是因为磁法需要的仪器的精度较高,而且易受附近磁性体干扰。在实际工作中磁性物体的磁化率大小、剩余磁场的

强弱和方向、磁性物体的规模和埋深及磁性体所处的地理位置,都是影响其产生的磁场分布特征及磁场强度的主要因素。

2.4 COD 法

COD 法即单道共偏移距法(common offset distance)。其原理是,当地下有管线存在时,由于非金属管线与周围介质存在着物性差异,激发的弹性波在遇到这一界面时会发生反射^[11]。反射波被仪器接收并记录,再根据发射信号的同相轴的连续性及频率的变化分析判断管线的空间位置。

岳亚东采用了此方法对哈尔滨建成厂内的排水管线进行了探测,后经厂方验证,探测结果正确。COD 法对于埋深较浅、管径较粗的管线效果会更好,但是必须注意的是其道间距必须小于波长的 1/4,一般道间距不大于 0.3 m。由于 COD 法的采集质量受环境干扰影响较大,所以最好选在夜间施工^[17]。

2.5 地震波映像法

地震波映像法是近几年才出现的新方法,是利用弹性波在地下介质的传播过程中,遇到地下管线后产生反射、折射和绕射波,使弹性波的相位、振幅及频率等发生变化,在反射波时间剖面上出现畸变,从而确定地下管线的存在。在没有地下管线的地方,地震波的形态及到达时间应该大致相同,而地震波发生畸变及出现新的波组的地方,尤其连续发生畸变的地方,则可能有地下管线存在。

杨兴其等采用地震映像法通过最佳窗口的选择,对要探测的路面进行剖面扫描,找出了地下管线的具体位置^[18]。这种方法受环境和地下介质的影响较大,要求具体操作人员具有较强的理论水平及实践经验,同时此方法在理论上及实际操作中还有许多值得推敲的地方,所以不宜随意采用此方法。

3 主要地下管线探测仪器

地下管线探测仪器的发展经历了从高频到低频,从单频到双频到多频,功率从小于 1W 到几瓦、几十瓦的历程。1915 年至 1920 年,美国、英国和德国先后生产了探测地下管线的专用仪器,这些仪器和技术源于寻找地雷和未引爆的炸弹等金属探测器。第二次世界大战后,随着电磁理论和电子技术的发展,研制出了应用电磁感应原理的地下金属管线探测仪。20 世纪 80 年代后,由于采用了新型磁敏元件、各种滤波技术及天线技术,使仪器的信

噪比、精度和分辨率大为提高,并更加轻便和易于操作,实现了地下管线的高精度和高效率的探测。20 世纪 80 年代中后期,探地雷达的开发应用,进一步拓宽了地下管线的探测范围。它不仅可以探测金属管线,也可以探测其他材质的管道。

英国雷迪公司的 RD4000 地下管线探测仪采用的是世界上最先进的技术和工艺,在功能、性能和应用范围上都远远超越了其他所有地下管线探测仪,是探测煤气、电力、电信、自来水、排水和有线电视等各类地下管线的最有效的仪器。MALA 公司推出了易捷管线探测仪 EASY LOCATOR 和玛拉 X3M 型雷达。易捷管线探测仪 EASY LOCATOR 既可以探测金属管线,也可以探测各种材质的非金属管线,与 RD4000 地下管线探测仪结合起来是地下管线探测最有效的工具。玛拉 X3M 型雷达主要用来对金属和非金属管线定位(平面位置及埋深)。美国 RYCOM 公司的地下管线探测仪 8850/8875/8878/8831 采用多频率工作模式,可以准确地确定地下电缆、管线位置并进行深度测试。其中 8831 型管线探测仪能够长距离地跟踪,在跟踪距离较长时,可较少使用发射器,使得与定位有关的时间缩短,成本得以降低。美国 Subsite 70/300/950R/T 型地下管线探测仪,能快速地探出埋设于地下的电话线、电力线、有线电视线,以及煤气、污水和自来水管线。德国竖威管线探测仪中的探地雷达 Pulse EKKO1000 型和探管仪 EL/G1,能够精确定位地下管线,可应用于城市燃气、供水及市政管网维护与普查。加拿大 Sensors & Software 公司生产的 EKKO100 及 EKKO1000 型新一代数字式探地雷达,也可广泛应用于地下管线及其他埋设物的探查。

西安华傲通讯技术有限责任公司的 GXY 系列地下管线检测仪,已成为此类仪器中国内广大用户的首选品牌,其中 GXY-2000 型地下管线探测仪是国内唯一全数字式地下管线探测仪。GXY 系列地下管线探测仪适用于各种复杂的地下管线探测、定位及故障查找。在不开挖的条件下检测,不但能准确测出埋地金属管线的位置,而且能准确地对破损点进行定位,GXY 系列管线探测仪也能够精确确定地下管线的平面位置、走向、埋深和种类。

4 结论

随着我国市政建设和西气东输等工程的开展,国家对城市建设投资规模的进一步加大,地下管线

的工程量也日益增加,对地下管线的探测及其他相关方面的要求愈来愈严格,由此可见,地下管线探测技术在国内的应用和发展前景是广阔的。但是也应该看到,地下管线探测技术至今尚不完善,不少技术难点还有待继续完善和开发。

1) 在探测小间距并行管线时,由于各管线相互间产生干扰,且各管线中产生的感应电流的方向不同,其产生干扰的方式也不同。所以,在实际工作中,要特别注意管线中电流的方向^[19]。针对不同电流方向产生的不同干扰,采用不同的修正方法,才能满足探测精度的要求。

2) 对于并排管道的管线区分,拐点、终点、分支点及变坡点的确定,以及上下重叠管线的探测等难点,要应用适当的方法和技术参数来解决。

3) 在野外采集数据时尽可能减少噪声的影响,提高信噪比;同时可以将小波变换^[20,21]、遗传算法^[22~25]、模拟退火^[26]、神经网络^[27~30]等各种方法,应用于地下管线探测信号的分析处理和资料解释,以提高地下管线探测的精确性。例如可以利用小波方法去除探测信号中的噪音,提高探地雷达探测地下管线的精度。

4) 可以和化探相结合,结合物化探两者的优点,也可以结合多种方法一起来提高地下管线探测的精确度。

参 考 文 献

- 1 上海岩土工程勘察设计研究院主编. CJJ61-94 城市地下管线探测技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1993
- 2 雷林源. 城市地下管线探测与测漏[M]. 北京:冶金工业出版社,2003. 7~10
- 3 区福帮. 城市地下管线普查技术研究与应[M]. 南京:东南大学出版社,1998. 104~123
- 4 刘晓东,张虎生,朱伟忠. 高密度电法在工程物探中的应用[J]. 工程勘察,2001(4):64~66
- 5 贺颖,王振东. 工程物探在我国的发展前景[J]. 水文地质工程地质,1998(2):54~55
- 6 王蔷. 电磁场理论基础[M]. 北京:清华大学出版社,2001. 45~62
- 7 Pellerin L, Alumbaugh D L. Tools for electromagnetic investigation of the shallow subsurface[J]. The Leading Edge,1997,14(11):1 631~1 640
- 8 李远强. 瞬变电磁法在地下金属物体探测中的应用[J]. 北京地质,2002,14(3):31~32
- 9 王法刚,叶国弘. 频率域电磁法在探测地下管线中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(S1):1 788~1 789

- 10 Anna A P, Cosway S W. Ground Penetrating Radar Survey Design[A]. Chicago: Annual Meeting of SA-GEEP, 1992
- 11 王惠谦. 探地雷达概论[J]. 地球科学, 1993(4): 22~24
- 12 张进华, 马广玲, 缪速文, 等. 探地雷达在地下管线探测中的应用[J]. 现代雷达, 2004, 26(8): 8~10
- 13 Pipan M, Baradello L, Finetti I, et al. 2-D and 3-D processing and interpretation of multi-fold ground penetrating radar data: A case history from an archaeological site[J]. Journal of Applied Geophysics, 1999, 41: 271~292
- 14 Rury J. Magnetometer survey[J]. Geophysics, 1998, 35(5): 812~830
- 15 谭承泽, 郭昭雍. 磁法勘探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1985. 10~15
- 16 吕帮来, 王传雷. 磁测在港航工程勘察中的几个实例[J]. 工程地球物理学报, 2004(6): 496~498
- 17 岳亚东. COD 法在非金属管线探测中的应用[J]. 煤炭技术, 2003, 22(7): 72~73
- 18 杨兴其, 赵伟, 张世明. 地震波映像法在援厄下水道改造工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2000(5): 67~68
- 19 赵献军, 伍卓鹤. 管线探测中不可忽视的问题——电流方向[J]. 工程勘察, 2004(1): 69~71
- 20 Kumar P, Foufoula-Georgiou E. Wavelet analysis for geophysical applications[J]. Reviews of Geophysics, 1997, 35(4): 385~412
- 21 吴畏, 郭华, 张井, 等. 小波变换在探地雷达探测地下管线信号处理中的应用[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 493~496
- 22 赵改善编译. 求解非线性最优化问题的遗传算法[J]. 地球物理学进展, 1992, 7(1): 90~92
- 23 高玉根, 王国彪. 基于网格法的遗传算法及其应用[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 361~363
- 24 李晶, 邹强, 钟本善, 等. 波阻抗遗传算法反演方法的研究及应用[J]. 物探化探计算技术, 2001, 23(1): 16~21
- 25 曹立斌, 鲁永康. 用改进的演化算法进行地下管线资料解释[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(1): 70~74
- 26 Pedersen J M. 模拟退火地震反演[A]. 牛毓荃译. 第 61 届 SEG 年会论文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 1993. 501~504
- 27 Roth G, Tarantola A. Neural networks and inversion of seismic data[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 6 753~6 768
- 28 Lawrance S, Giles C L, Tosi A C, et al. Face recognition: A convolution neural-network approach[J]. IEEE Transactions on Neural Network, 1997, 8(1): 98~111
- 29 Looney C G. Pattern Recognition Using Neural Networks: Theory and algorithms for engineers and scientists [M]. New York: Oxford University Press, US, 1997. 480
- 30 Cheng H D. Automatic real-time pavement distress detection using fuzzy logic and neural networks[J]. Proceedings on Non-Destructive Evaluation of Bridges and Highways, SPIE, 1996, 140~151

=====
 (上接第 13 页)

- 47 Hale L D, Thompson S A. The seismic reflection character of the continental Mohorovicic discontinuity[J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87: 4 625~4 635
- 48 Allmendinger R W, Nelson K D, Potter C J, et al. Deep seismic reflection characteristics of the continental crust [J]. Geology, 1987, 15: 304~310
- 49 Nelson K D. A Unified view of craton evolution motivated by recent deep seismic reflection and refraction results[J]. Geophysical Journal International, 1991, 105: 25~35
- 50 Brown L D, Wille D M, Zheng L, et al. COCORP: New perspectives on the deep crust[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1987, 89: 47~54
- 51 Hammer P T C, Clowes R T. Moho reflectivity patterns: A comparison of Canadian LITHOPROBE Transects[J]. Tectonophysics, 1997, 269: 179~198
- 52 彭聪, 赵一鸣. 中国东部含金砂卡岩矿床分布规律与深部地球物理背景研究[J]. 物探与化探, 1999, 23(6): 415~420
- 53 吕庆田, 侯增谦, 赵金花, 等. 深地震反射剖面揭示的铜陵矿集区复杂地壳结构形态[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(5): 442~449