

防步兵地雷地球物理探测技术国内外研究动态

冯 暄, 鹿 琪, 刘 财, 刘 洋, 王世煜

(吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026)

摘 要 战后遗留的数百万颗地雷在许多国家带来了严重的人道主义问题, 其中防步兵地雷因为其体积小金属含量低, 一旦被埋在地下将很难被发现, 所以目前迫切需要研究和发展新颖的探测技术来消除目前国际社会十分关注的探雷问题。而高敏感度、高可靠度和低花费是对探测技术的基本要求。当前正在使用和发展的探测技术包括地球物理探测技术和非地球物理探测技术两大类。地球物理探测技术中, 正在使用和具有发展前景的探测技术主要包括: 低频电磁感应、红外成像、核四极矩共振和探地雷达等技术。本文将主要介绍以上几种探测技术的原理、现状, 并总结它们各自的优缺点。研究表明将几种探测技术有机地结合于一体的复合探雷器是解决地雷探测问题的一个不错的选择和当前发展的一个趋势。

关键词 地球物理, 地雷, 探地雷达, 探测技术

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)03-0929-07

Summarization of geophysical detection technologies for anti-personnel mines

FENG Xuan, LU Qi, LIU Cai, LIU Yang, WANG Shi-yu

(College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract Millions of landmines remaining from past conflicts have produced serious humanitarian problems. Antipersonnel (AP) landmines are big troubles for detection because of small size and low metal content. So to increase applied research of novel detection technologies is urgent in order to remove AP landmines. Sensitive, reliable and low cost sensors are the first and absolute requirement for the design of demining sensors. Currently landmine detection technologies consist of geophysical detection technologies and non-geophysical detection technologies. Geophysical detection technologies mainly include electromagnetic induction, infrared imaging, nuclear quadrupole resonance, and ground penetrating radar. This paper introduces the theory and application of these technologies, and summarizes their advantages and disadvantages.

Keywords geophysics, anti-personnel mines, detection technologies, ground penetrating radar

0 引 言

现在全球大约有 68 个埋有地雷的国家, 数千万颗杀伤地雷至今没有排除掉。在欧洲和发展中国家的古今战场上, 散布的各种地雷约有 1 亿颗左右。而每年因新的局部战争又有约 1 百万颗地雷被投入使用^[1]。各国虽然为扫除战后遗留的地雷问题, 投入了

大量的人力、物力和财力, 但是效果并不怎么理想, 残余地雷伤人, 致残致死的惨痛事件时有发生^[2], 每年大概有 2 万~2.6 万人因地雷而丧生^[3]。因此, 有效地解决地雷探测问题已成为国际社会十分关注的热点、难点问题, 特别是战后的排雷工作, 对探雷技术提出了更高的要求^[2]。目前世界上的地雷多种多样, 使用过的就有 2000 多种^[4]。其动作原理通常是

收稿日期 2007-11-10; 修回日期 2008-02-20.

基金项目 国家自然科学基金(青年基金)(40704020)、吉林省杰出青年科学研究计划(20070123)和教育部留学回国人员科研启动基金(2007-1108)联合资助。

作者简介 冯暄, 1973 年生, 男, 博士, 吉林大学地球探测科学与技术学院副教授, 主要从事高频电磁波、地震波、信号处理等研究。(E-mail: fengxuan@jlu.edu.cn)

通讯作者 刘财, 1963 年生, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信号处理与分析 and 勘探地震学研究。(E-mail: liucui@jlu.edu.cn)

利用目标的直接作用(压、拉、松等),或利用目标产生的物理场(磁、声、震动和红外等)启动引信,也有采用主动式引信,如用绳索、有线电、无线电等操纵爆炸的^[1].通常按用途可分为4类:反坦克地雷、防步兵地雷、反直升机地雷和特种地雷.最常用的是反坦克地雷和防步兵地雷^[5].其中,反坦克地雷是针对重型车辆设计,引爆压力在150~300 kg之间.通常人踩踏到这类地雷不会因为引发爆炸而受到伤害,所以对这类地雷的清除通常不属于战后人道主义支援范畴^[6].

战后对平民造成伤害和阻碍经济发展的主要是防步兵地雷.它一般分为爆破型和破片型两类.破片型防步兵地雷是利用炸药的力量散射出大量破片、弹丸来杀伤有生力量的地雷.它们不仅埋在地下而且有时也安置在地上,起爆时会向一定的方向弹起,在30米范围内是致命的.爆破型防步兵地雷是利用装药爆炸产生高温高压气体形成的爆轰波直接杀伤有生目标的地雷.它一般带有30~200 g的爆炸物,当雷盖受到70~300 N压力时,地雷起爆,它们一般不是致命而是造成伤残^[5,6].通常结构简单体积小,直径在5~10 cm之间,高度在3~8 cm之间.较现代的此类地雷外壳一般由塑料或木头等非金属制成.由于结构简单,造价低廉,所以大量的这种地雷被部署在世界各地,引发了许多经济发展和人道主义问题.同时由于这种地雷体积较小,金属含量较低,所以一旦这种地雷被埋在地下,将很难被发现.

1 防步兵地雷探测技术的基本要求

尽管从二战以来许多科学技术工作者在地雷探测方面作了不懈的努力,但是由于复杂多变的自然条件以及高精度的探测要求,所以地雷探测目前仍然是一项困难和富有挑战性的工作^[7].按现代战争的要求,雷场中地雷的失效率达到80%以上,部队就可以快速通过,但是战后扫雷就大不一样了^[1].人道主义排雷工作对探测器材性能的要求比战时更高,因为战后人们对排雷操作人员伤亡的心里承受能力远比战时要低的多,所以通常要求探测器材不能漏报又不能误报(有报警但不是地雷称为误报)太多^[2].而当前低金属含量或无金属含量的新型防步兵地雷使这项工作变得更加困难,它们的外壳可以由塑料或木头等非金属来制作,因此当前研究者努力发展可探测防步兵地雷的各种技术^[3].为了地雷探测的安全性和实用性,理想的探测传感器应该满足以下这些特点:

- (1)结构紧凑,体积小,重量轻,便于携带;
- (2)操作简单,实时处理,易于使用;
- (3)较低的消耗功率,能野外长时间使用;
- (4)较低的价格;
- (5)可靠的探测率;
- (6)较低的误报率;
- (7)较低的相应时间,较高的工作效率;
- (8)管理简单,便于检修,较长的工作寿命.

在这些特点中,可靠的探测率最为重要的.一般来说,探测率是指探测到的地雷数量和整个勘探区内的地雷总数的比值.对于人道主义探雷工作,通常探测率要求能达到99.9%以上.因为人道主义探雷的最终目的是将清除过的雷区返还民众作为绝对安全的民用土地.单一的技术手段很难达到这种高探测率的要求,所以经常用多种技术来共同组成一个探雷系统,例如当前金属探测器总是和其他技术一起使用^[6].

2 防步兵地雷探测技术

地雷武器在作战中的可观效应,一方面刺激了各国军队地雷武器的不断发展,另一方面也刺激了地雷探测技术与手段的进一步发展^[8].通常根据载体,探雷手段可分为:手持探雷器、车载探雷系统和机载探雷系统.同时根据探测系统的工作原理,这些技术又可分为:地球物理探测技术和非地球物理探测技术两大类.

2.1 非地球物理探测技术

2.1.1 机械

机械式探雷技术,利用探针或土钻,人工操作探察埋设的地雷^[1].对于埋设密度比较大的雷区,一般总有一些埋过地雷的蛛丝马迹,经验丰富的探雷专家能够通过这些蛛丝马迹来辨识较大的雷区.但是如果埋设密度比较小,甚至是单个的地雷,又或者是埋设时间过长,是很难通过肉眼辨认的.

用探针刺探地表是目前唯一的对所有地雷都有效的一种方法.经验丰富的探雷专家能用一个很细的金属探针沿30°角来刺探地下的地雷侧外壳,而不触发地雷,一般每2厘米间隔刺探一次^[9].如果地雷在地下发生了倾斜,有可能造成探针正好碰到它的压力板而不是它的边缘外壳,所以这项工作非常危险并且非常缓慢.一个有经验的探雷专家每天能够清除20~50 m²的雷区.并且用探针不太能够识别石块等硬物体,所以误报率比较高.

2.1.2 生物

由于狗有一个非常灵敏的鼻子,能够嗅到地下地雷炸药泄漏出来的气味,所以它能在近距离里嗅到地雷。经过严格训练的狗能够用来探测地雷。因为狗是直接探测地雷的炸药,而不是地雷外壳,所以它的误报率比较低。但是由于狗是一种生物,很容易感到疲劳,所以工作效率和可靠性都比较低^[6]。对于其他可用于探雷的生物也有同样的特点,如:探雷海豚、探雷蜜蜂等^[2]。

2.2 地球物理探测技术

地球物理探测的基本原理都是根据地雷结构中某一部分材料与周围介质的物理特性差异进行探测,如:探地雷达、超声波、声波、光电、电阻抗 CT、低频电磁感应或金属探测器、红外成像、核四极矩共振、热中子活化、中子反散射及各种方法的组合等^[2]。当前正在使用和有待发展前景的探测技术主要包括:低频电磁感应或金属探测器、红外成像、核四极矩共振、探地雷达等。

2.2.1 低频电磁感应或金属探测器

低频电磁感应或金属探测器是历史最悠久、最基本,自二战以来最流行的探雷传感器。它是以探测地雷结构中的金属零部件为目的,而地雷结构中无论是其外壳、机械零部件还是电子电路中或多或少都有一些金属,所以该探雷技术一直占有主导地位,发挥了十分重要的作用。它是利用低频电磁感应的原理,用一个线圈产生一个磁场,如果地下有足够大的金属目标,那么这个目标会影响到产生的磁场,用另一个线圈通过探测磁场的变化来探测目标。当前具有代表性的低频电磁感应法包括,频域的平衡法与阻抗变换法和时域的脉冲感应法^[1]。

因为早期地雷一般都有较大或较多的金属零部件,电磁感应方法能很好的“感应”到地雷中的金属,所以这项技术在早期获得了巨大的成功,成为世界各主要探雷器生产国,如美、德、奥地利、英、中等国家大量生产并实际用于探雷的主流探雷器材^[2]。国内外便携式探雷器中,采用平衡法的有:美国的 AN/PSS-11 型、法国的 F1 型和我国的 GTL111 型探雷器等;采用阻抗变换法的有:德国 Ebinger 公司的金属探测器和我国的 GTL115 型探雷器等;采用脉冲感应法的有:奥地利 Schiebel 电子仪器有限公司研制生产的 AN-19/2 型探雷器等^[1]。以上这些探雷器都取得了一定的成功,在实际应用中获得了一定的效果。

随着电子技术的飞速发展,从直流电子管到晶体管到集成电路,乃至单片机的应用,使金属探测器

的体积、重量、耗电、智能化方面不断改进提高^[2]。但是由于现代地雷从金属外壳到塑料外壳、从金属含量较大到金属含量越来越小的发展,造成金属探测器探测地雷的可靠性不足。这迫使地雷探测器向高灵敏度发展,目前已发展到可探测 1 g 左右金属含量的零部件。这样虽然较好地解决了灵敏度问题,但同时也带来了误报增多的问题。高灵敏度金属地雷探测器不仅对土壤中的金属碎片敏感,更主要的是其土壤背景适应性明显降低,使得地雷探测器在使用中误报增多,不仅降低了探测效率,严重时更是“草木皆兵”。

2.2.2 红外成像

红外技术应用于探雷尤其是远距离探测“雷场”备受人们青睐,其探雷机理是由于埋藏的地雷与土壤之间存在温差这一特点,经成像处理后识别地雷。使得高级的航空造像技术能够通过分辨地表的温度差异来探测地雷。这种技术被称为热成像技术,又称为红外成像技术等。红外成像探雷技术指的是采用被动红外技术,以探测埋设地雷与土壤背景不同热惯量而造成的温差为机理,用红外热图的方式显示探测结果。便携式探雷器和车载探雷系统中采用被动红外热像仪技术,在探头视场内的红外热图可实时显示在显示屏上,人工或自动识别地雷目标,机载探雷系统则采用被动红外行扫描仪技术,探测信号存储在飞行器设备内或实时传输给地面接收站,经图像处理后来识别雷场。红外成像探雷技术主要用于探测各种埋设的地雷和地雷场^[1]。

随着红外器件水平的不断提高,使红外技术应用于军事目标的高空侦察成为现实,更使远距离大面积实现雷场的探测成为可能。在现代战争中,由于地雷战在机动与反机动作战中的作用越来越重要,而快速高效地进行大面积雷场侦察一直是难于解决的问题。因此,红外成像技术一经提出就受到各国的广泛重视,基于红外成像的探雷技术的远距离雷场探测系统也迅速发展,具有代表性的如美国的机载雷场探测与侦察系统(AMIDARS)^[2]。

它通常在一天中的黄昏太阳刚刚下山或者早上太阳刚刚出山的时候工作。但是这种技术目前仅仅能够在非常理想的环境中有效的工作^[8,9]。

2.2.3 核四极矩共振

核四极矩共振(nuclear quadrupole resonance, NQR)是一种原子核物理现象。不同的原子核或相同的原子核在不同的物质结构形式中会在外加电磁场的作用下产生不同的核四极矩共振频率,这一波

谱特性成为判别不同物质的有效手段. 常用炸药均为含氮的结晶固体, 作为地雷装药的炸药与雷体中的其它材料及土壤相比较, 其特征是氮元素的含量明显偏高(常用炸药中氮的质量分数一般达到 10%~40%). 氮原子核是一种变形核, 电荷分布不成球对称, 其电四极矩不为零, 且其分子内电场梯度也不为零, 具备产生 NQR 的内部条件. 当对其施加合适频率的电磁场, 就会引起 NQR 现象, 通过对氮 NQR 信号的检测可作为地雷存在的判据^[10].

由于采用 NQR 技术探雷发生虚警的可能性很小, 受到了美国、俄罗斯等国家的高度重视. 1998 年量子磁公司进行了第一次 NQR 探雷器野外性能摸底试验, 探测率达到 90%, 取得了非常明显的成效, 该探雷器已由美国海军陆战队在波斯尼亚扫雷行动中试用^[10]. 俄罗斯对 NQR 探雷技术的研究在国际上已颇有名气, 尤其是其研究具有较大的深度. 世界上许多国家都希望与俄罗斯开展 NQR 技术交流, 其中俄罗斯与澳大利亚等国已进入联合开发产品阶段, 预计在未来几年内俄罗斯将开发出第一代便携式 NQR 探雷器.

但是这项技术不是仅限于实验室原理研究阶段, 就是不适合野战使用条件. 随着 20 多年从实验室到野外使用过程中许多难题的解决, 核四极矩共振技术在上世纪 90 年代取得了较大的突破, 成为一种十分有发展潜力的地雷探测技术^[10]. 以美国为代表的技术强国正在以下 3 个方面展开技术攻关^[11]:

(1) 提高弱信号接收能力. 由于 NQR 信号非常微弱, 弱信号接收技术得到了广泛的重视, 除了传统的弱信号接收技术外, 重点放在寻找使 NQR 信噪比达到最佳效果的射频脉冲序列上.

(2) 研究一种“ ∞ ”字式异型天线. 天线的接收效率对系统的信噪比有很大影响, 作为最前端的探头, 天线一方面要在一定的发射功率下得到一个比较均匀的发射电磁场, 并具有较高的接收效率; 另一方面天线还要有较强的抑制干扰的能力, 以适应野外使用的复杂环境.“ ∞ ”字式天线与低频电磁感应探雷技术中的双线圈平衡式接法相类似, 其特点是抗外界射频干扰能力较强.

(3) 减小探测信号处理时间. 探测 TNT 炸药时, 由于其 NQR 信号相对较弱, 所以其短脉冲序列信号需要更多的累加才能达到一定的信噪比; 另外傅里叶变换等运算也需一定的时间.

2.2.4 探地雷达

在地雷探测领域, 探地雷达被国内外探雷研究

专家认为是最有希望在短期内获得突破性进展的技术之一^[12,13]. 它的探测原理是运用发射天线发射频谱丰富的高频电磁波进入地下, 同时接收天线接收地下目标的散射和反射回来的电磁波, 通过分析接收天线接收到的信号, 来获得地下目标的性质、形状等特征信息. 因为地雷的塑料、金属外壳及装药的介电常数与土壤不同, 而这些介电常数差异界面能够散射和反射高频电磁波, 所以探地雷达能通过这些散射和反射的电磁波来探测地雷与土壤背景的介电常数差异, 从而识别隐藏的地雷. 它对具有一定截面积、且与土壤背景介电常数相差较大的浅表目标敏感, 可有效克服截面积较小的金属碎片对探雷器的虚警问题, 并有能力探测到非金属地雷^[1].

探地雷达的窄脉冲、宽频带等特性, 使得接收到的回波信号中目标信息十分丰富, 经过对目标信号的提取、处理和识别运算后, 可形成二维或三维图像, 有利于操作人员对地雷等地下埋设物的判别^[1,2]. 计算机技术的飞速发展使得冲击脉冲雷达技术应用于探雷成为可能, 从传统的用耳机信号判读到用图像信号识别, 将使探雷技术发展到一个崭新的阶段, 形成质的飞跃. 世界各国投入了大量的人力与经费来发展此项技术, 并取得了明显的进展^[1,2]. 探地雷达一般可分为: 脉冲雷达、谐波雷达、频率步进雷达、合成孔径雷达等. 冲击脉冲雷达技术原本主要用于土木工程、地质、考古等领域, 描绘地下浅层的地层剖面图^[14~24]. 近几年人们正将其作为一种主要新手段来探测地下浅表埋设的地雷. 美国劳伦斯国家实验室(LLNL)研制的微功耗冲击雷达技术有了长足的进步, 目前已进入雷场探测试验阶段; 冲击脉冲雷达技术也成为美国新型手持式远距离探雷系统(HSTAMIDS)中的主要探测手段之一^[1]. 谐波雷达是以发射波在物体上的谐波再辐射功率作为其回波信号的雷达. 一般自然物体不会产生谐波辐射, 半导体元件 PN 结的非线性特征会产生谐波辐射, 而金属接触点在电性能方面与 PN 结相似. 因此, 谐波雷达又可称其为非线性雷达或金属再辐射雷达. 谐波雷达可探测地下各种具有半导体元件或金属接触点的地雷. 谐波雷达技术可应用于便携式探雷器、车载探雷系统和机载探雷系统^[1]. 频率步进雷达主要是在频率域实现探地雷达的发射和接收, 通过付氏变换, 获得介质的电磁波时间域响应. 在探测能量允许的前提下, 频率步进雷达比脉冲雷达可以获得更好的分辨率和准确性^[25]. 合成孔径雷达(SAR)是利用雷达与地面目标的相对运动即

“多普勒效应”,把真实天线孔径较小的雷达通过数据处理手段合成较大的等效天线孔径.以机载合成孔径雷达为例,在飞行过程中的相同间隔上,发射一个辐射信号,接收存储来自同一目标的回波并进行信号的叠加处理,即等效于一个口径较大的线阵天线,达到了对地雷目标精确定位的目的.其特点是分辨率高,能实时传输、全天候工作.合成孔径雷达主要用于机载探雷系统中,也可用于车载探雷系统中^[1].日本东北大学研制了一种车载式的频率步进组天线合成孔径探地雷探雷系统(SAR-GPR),取得良好的效果,正在进行验证性试验^[26~29].

但是由于探地雷达的高灵敏性,所以它容易受到各种噪音的影响.同时由于雷达反射信号成像的处理方法复杂,所需时间较长,距实时处理尚有一定的差距.所以信号处理是它的关键技术.日本东北大学有效的将合成孔径技术整合到他们自己开发的车载式 SAR-GPR 和单兵式的高级地雷成像系统(ALIS)的信号处理中,在阿富汗、埃及和克罗地亚的验证性试验中获得了良好的效果^[7,30~35].

2.2.5 其它地球物理探测技术

除了以上这些方法,同时还有其他的地球物理方法也可用于地雷探测,如:磁法探雷技术、中子探测技术、超声波探测技术、电阻抗层析技术等.磁法探雷技术是通过探测地雷铁磁性外壳或零部件的磁异常来发现地雷的,也可称为铁磁物体探测器.由于探测的距离较远,除了探测地下浅表的地雷外,更多的是用作探测地下或水中较深处的航空炸弹,即为航弹探测器.磁法探雷使用的电子仪器称为磁力仪,按不同原理又可分为磁通门式磁力仪、质子旋进式磁力仪和光泵磁力仪等.磁法探雷技术一般应用到便携式探雷器和车载探雷系统中^[1].中子探测技术用同位素钷作为中子源,产生中子流照射地雷,当中子流照射到地雷内炸药的氢元素时,中子的能量被衰减而形成“慢中子”,探测器通过探测“慢中子”来探测地雷^[2,36].美国能源署西北太平洋国家实验室(PNNL)研制了一种测定中子的探测器(Timed Neutron Detector),可以单兵使用.超声波探测方面,美国宇航局喷气推进实验室研制了一种在机器人运载工具上装有 20KHz 超声波探头的探雷装置,通过声阻抗的变化探测地雷^[2].超声波探雷技术目前在实验室效果较好,但距野外实用尚有较大的差距.电阻抗层析方面,加拿大开发了一种电阻抗 CT (Electric impedance tomography),在机械探针阵上配合测量系统,通过测量电阻率的不同来探测地

雷^[2].

3 展望

目前,多种技术能够被用来探测防步兵地雷,并且许多能用于地雷探测的传感器处于在研究和发展中.其中,红外成像、探地雷达、核四极矩技术有着较好的发展前景.但是还没有一项技术能够在考虑到大小重量费用的前提下,独立的高可靠高效率地完成地雷探测工作.因此多种技术通过信息处理技术,有机的综合在一起来完成这项工作是一个不错的选择.将两类或多类探雷技术按逻辑“与”方式有机地结合于一体的复合探雷器是当前发展的一个趋势.如:将探地雷达和金属探测器复合,因为两类探雷技术共同的问题都是很难克服原理性的虚警干扰,但研究发现两种干扰性质又完全不同,所以将两种技术复合使用,使其对既有一定金属含量,又有一定截面积的地雷目标报警,这样既降低了单一探测原理引起的虚警,又提高了探测性能.

致 谢 感谢日本东北大学佐藤源之教授多年的悉心指导.

参 考 文 献 (References):

- [1] 倪宏伟,房旭民. 地雷探测技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2003,1~196.
Ni H W, Fang X M. Technology for landmine detection[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003,1~196.
- [2] 周立军,梁连仲,史冉. 国外地雷探测新技术[J]. 地质装备, 2003, 4(3~4):3~6.
Zhou L J, Liang L Z, Shi r. New Detection Technology for Mines[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2003, 4 (3~4):3~6.
- [3] 王坤兴. 新型廉价扫雷装置[J]. 机器人技术与应用,1998,6: 14~16.
Wang K X. New cheap equipment for landmine detection[J]. Robot Technique and Application,1998,6:14~16.
- [4] Christopher F F. Jane's Military and Vehicles Logistics 1994-95[M]. London: Jane's Information Group,1994.
- [5] 陆庆,赵中伟,王琳. 地雷家族群英荟萃[J]. 轻兵器, 2003,7: 13~15.
Lu Q, Zhao Z W, Wang L. Landmine family [J]. Small Arms, 2003,7:13~15.
- [6] Maechler P. Detection technologies for anti-personnel mines [A]. In: Proceedings of the Autonomous Vehicles in Mine Countermeasures Symposium [C]. Monterey, the United States; CA, 4-7 April 1995,6150~6154.
- [7] Feng X, Motoyuki Sato. Pre-stack migration applied to GPR for landmine detection[J]. Inverse Problems, 2004, 20(6):99

- ~115.
- [8] 韩林, 敖四林. 21世纪地雷战武器[J]. 轻兵器, 1996, 6: 2~5.
Han L, Ao S L. Landmine in 21 century[J]. Small Arms, 1996, 6: 2~5.
- [9] Kenneth M D, Tomos G W. The detection of buried landmines using probing robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1998, 23(4): 235~243.
- [10] 房旭民, 徐政, 徐玉清, 张国进. 核四极矩共振炸药探测技术在探雷中的应用[J]. 同济大学学报, 2003, 31(6): 719~723.
Fang X M, Xu Z, Xu Y Q, Zhang G J. Application of nuclear quadrupole resonance technique in mine detection [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(6): 719~723.
- [11] 吴桑. 外军核四极矩共振探雷技术发展现状[J]. 工兵装备研究, 2002, 21(3): 61~64.
Wu S, The development of nuclear quadrupole resonance for landmine detection in foreign army. [J]. Engineer Equipment Research, 2002, 21(3): 61~64.
- [12] 徐玉清, 张国进, 高攀. 冲击脉冲雷达探雷[J]. 电波科学学报, 2001, 16(4): 546~550.
Xu Y Q, Zhang G J, Gao P. Land-mine detection with impulse radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(4): 546~550.
- [13] Davis J D. Ground Penetrating Radar-2nd Edition[M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004, 501~624.
- [14] 葛双成, 邵长云. 岩溶勘察中的探地雷达技术及应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 476~481.
Ge S C, Shao C Y. Technique and application of GPR in karst prospecting[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(2): 476~481.
- [15] 戴前伟, 冯德山, 何继善. Kirchhoff 偏移法在探地雷达正演图像处理中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 849~853.
Dai Q W, Feng D S, He J S. The application of Kirchhoff's migration method in the image processing of the ground penetrating radar forward simulate[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(3): 849~853.
- [16] 冯德山, 戴前伟, 何继善等. 探地雷达 GPR 正演模拟的时域有限差分实现[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 630~636.
Feng D S, Dai Q W, He J S, He G. Finite difference time domain method of GPR forward simulation[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 630~636.
- [17] 李嘉, 郭成超, 王复明, 张景伟. 探地雷达应用概述[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 629~637.
Li J, Guo C C, Wang F M, Zhang J W. The summary of the surface ground penetrating radar applied in subsurface investigation[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 629~637.
- [18] 李才明, 王良书, 徐鸣洁, 刘元生, 钟锴, 张善法. 基于小波能谱分析的岩溶区探地雷达目标识别[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1499~1504.
Li C M, Wang L S, Xu M J, Liu Y S, Zhong K, Zhang S F. Objects recognition of ground penetrating radar in karst regions using wavelet energy spectrum analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1499~1504.
- [19] 曾昭发, 田钢, 丁凯. 宽带探地雷达系统研究及在工程检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 455~459.
Zeng Z F, Tian G, Ding K. The broadband GPR system study and its application in engineer inspecting[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(3): 455~459.
- [20] 周杨, 冷元宝, 赵圣立. 路用探地雷达的应用技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 481~486.
Zhou Y, Leng Y B, Zhao S L. Research progress in GPR technology applied in pavement testing[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(3): 481~486.
- [21] 何亮, 王旭东, 杨放, 曹华. 探地雷达测定土壤含水量的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1673~1679.
He L, Wang X D, Yang F, Cao H. Estimation of soil water content by Ground Penetrating Radar [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(5): 1673~1679.
- [22] 葛双成, 张莎, 李强, 张民强, 王兴根. 探地雷达在海塘堤脚淘空损伤检测中的应用试验及分析[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 989~993.
Ge S C, Zhang S, Li Q, Zhang M Q, Wang X G. Experimentation and analysis on the application of detecting hollow injury in the sea wall by means of ground penetrating radar [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(3): 989~993.
- [23] 冯德山, 戴前伟. 高速公路路面厚度探地雷达检测[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 289~294.
Feng D S, Dai Q W. Application of ground penetrating radar in the survey of the pavement thickness in highway [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(1): 289~294.
- [24] 冯德山, 戴前伟. 探地雷达小波域三维波动方程偏移[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 566~574.
Feng D S, Dai Q W. The migration of GPR three dimension wave equation in wavelets domain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(2): 566~574.
- [25] 曾昭发, 刘四新, 王者江, 薛建. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1~239.
Zeng S F, Liu S X, Wang Z J, Xue J. Theory and application of ground penetrating radar [M]. Beijing: Science Press, 2006, 1~239.
- [26] Motoyuki S, Zeng Z F, Fang G G, Feng X. Stepped-frequency GPR system for landmine detection[A]. In: Proceeding of SPIE[C], Vol. 5089. Orlando, the United States; FL, 2003, 179~184.
- [27] Motoyuki S, Hamada Y, Feng X, Kong F, Zeng Z, Fang G. GPR using an array antenna for landmine detection[J]. Near Surface Geophysics, 2004, 2(1): 3~9.
- [28] Motoyuki S, Feng X, Takao K, Zhou Z S, Timofei G. Save-lyeva and Jun Fujiwarad. Development of an array-antenna GPR system (SAR-GPR)[A]. In: Proceeding of SPIE[C], Vol. 5794. Orlando, the United States; FL, 2005, 480~487.
- [29] Motoyuki S, Takao K, Kazunori T, Jun F, Feng X. Vehicle mounted SAR-GPR and its evaluation [A]. In: Proceeding of SPIE[C], Vol. 6217. Orlando, the United States; FL,

- 2006, 62172H.
- [30] Feng X, Motoyuki S. The application of pre-stack migration to SAR-GPR system for imaging of obliquely buried landmine [A]. In: Proceeding of SPIE[C], Vol. 5415. Orlando, the United States; FL, 2004, 1019~1026.
- [31] Feng X, Jun F, Zhou Z S, Takao Kobayashi and Motoyuki Sato. Imaging algorithm of a Hand-held GPR MD sensor (ALIS)[A]. In: Proceeding of SPIE[C], Vol. 5794. Orlando, the United States; FL, 2005, 1192~1199.
- [32] Feng X, Zhou Z S, Takao K, Timofei G S, Jun F, Motoyuki S. Estimation of ground surface topography and velocity model by SARGPR and its application to landmine detection [A]. In: Proceeding of SPIE[C], Vol. 5794. Orlando, the United States; FL, 2005, 514~521.
- [33] Feng X, Motoyuki S. Landmine imaging by a hand-held GPR and metal detector sensor (ALIS)[A]. In: IEEE International geoscience and remote sensing symposium [C]. Seoul, SOUTH KOREA, 2005.
- [34] Feng X, Takao K, Motoyuki S. Migration trajectory and migration aperture of SAR-GPR in rough ground area[A]. In: Proceeding of SPIE[C], Vol. 6217. Orlando, the United States; FL, 2006, 621725.
- [35] Feng X, Takao K, Kazunori T, Jun F, Motoyuki S. Migration and interpolation for the hand-held GPR MD sensor system (ALIS)[A]. In: Proceeding of SPIE[C], Vol. 6217. Orlando, the United States; FL, 2006, 62172M.
- [36] 莫霜. 关于地雷、探雷以及中子探雷[J]. 现代物理知识, 2004, 16(4):39~41.
- Mo S. Landmine, landmine detection, and neutron detection [J]. Modern Physics, 2004, 16(4):39~41.