

探地雷达技术的回顾与展望

李想堂,王端宜,张肖宁

(华南理工大学 道路工程研究所,广州 510640)

摘 要:百余年来,探地雷达在技术上逐步成熟,在地下探测领域发挥着越来越重要的作用。主要介绍国外在探地雷达的设备研制、数据处理和具体应用等方面的发展历程及研究动向,也简要介绍了探地雷达在我国的发展情况。

关键词:无损检测;无损评估;探地雷达

中图分类号:TG115.28

文献标识码:A

文章编号:1000-6656(2006)09-0479-05

Review and Prospects of Ground Penetrating Radar Technology

LI Xiang-tang, WANG Duan-yi, ZHANG Xiao-ning

(Road Engineering Research Institute of South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The past 100 years has witnessed the utility of ground penetrating radar (GPR) to solve a variety of problems in subsurface characterization and there is an overall sense of the technology reaching a level of maturity. The brief history of GPR is reviewed, including its hardware system, data processing techniques and various practical applications, both the value and the limitations of the nondestructive testing method are analyzed and its current trends of progress was discussed.

Keywords: Nondestructive testing; Nondestructive evaluation; Ground Penetrating Radar

1 探地雷达简介

探地雷达 (Ground Penetrating Radar, 简称 GPR) 是以地下不同介质的电磁性质的差异为物理前提的一种高频电磁技术。依据不同的工作方式, GPR 分为地面探地雷达和钻孔探地雷达, 前者主要用于检测地下浅层目标, 如市政设施、机场跑道、公路路基路面、桥面、铁路路基、隧道衬砌和地雷等; 后者又有单孔和双孔两种主要工作模式, 主要用于岩层裂隙探测、矿产勘探和地下水调查等。如果按用途或天线的工作模式分类, GPR 还可以进一步细分, 但其工作原理大致相同, 即发射天线发射的电磁波在地层中传播时, 如果遇到电磁性质不同的物体(目标), 将发生前向和后向散射, 散射波在多个目标之间以及目标内部还会形成新的散射, 一部分散

射波被接收天线接收。随着天线的移动, GPR 记录到各测量点处的电磁波信号, 经过进一步处理和分析后可判断地质分层情况和各层的材质等, 同时可以识别地下目标。

GPR 紧随着无线电技术的出现而萌生, 至今已有近百年的历史, 虽然当今的电磁学理论已相当成熟, 然而 GPR 技术还处在不断完善的过程中。在现有的计算机水平下, 地质结构和地质材料的多样性、目标的电磁特性和几何形状的复杂性不断向 GPR 提出新的挑战, 日趋广泛的地下探测活动推动着 GPR 硬件系统的发展和数据处理技术的创新。

2 探地雷达的发展历程

2.1 1900—1955 年的发展

在此期间, 有关无线通讯、无线测向和雷达的论文大量涌现^[1]。1904 年, Hülsmeier 首次采用电磁波探测了地面上远程金属目标。1910 年, Leimbach 和 Löwy 阐明了将电磁波用于探地的方法并申请了德国专利。1926 年 Hülsenbeck 首次采用电磁脉冲

收稿日期:2005-05-26

作者简介:李想堂(1980~),男,在读博士,主要从事道路工程结构无损检测的研究工作。

技术成功探测了地下结构,发现该方法对金属和非金属目标均适用。1929年 Stern 在奥地利通过 GPR 探测了冰河的厚度。20 世纪 50 年代初,El Said 用 GPR 实现了沙漠地下水调查。

2.2 1955—1965 年的发展

50 年代末期,一架美国空军飞机准备在格陵兰冰面上降落时,雷达高度表指示有误,导致飞机坠毁。这一事件后,人们深刻认识到电磁波穿透冰层的能力,出现了用电磁波探测冰山的研究热潮,诸多极地考察队应运而生,获取了很多新发现^[2,3]。

2.3 1965—1980 年的发展

GPR 除继续用于冰川考察外,还开始用于冻土研究、盐矿和煤矿的勘测,美国军队在 60 年代中期委托 Calspan 公司率先采用 GPR 进行了非金属地雷的探测及相关的研究^[4,5]。在此期间,阿波罗登月计划启动了,研究人员认为月球表层物资的电磁特性与冰相似,因而决定采用 GPR 作为探测工具,并针对性地设计了几种方案,最终由阿波罗 17 号携带 GPR 在月球表面完成了实地勘测。

60 年代末期,丹麦与英国基于冰河调查的目的研制了由飞机搭载的 GPR(机载 GPR),但机载 GPR 投入真正的商业运作始于 1979 年,美国 SRI International 用机载 GPR 进行了为期七年的热带森林调查。

1970 年,首家生产和销售商用 GPR 的公司问世,即 Rex Morey 和 Art Drake 成立的美国地球物理测量系统公司(GSSI)。此期间 GPR 的进展表现在,人们对地表附近偶极天线的辐射场以及电磁波与各种地质材料相互作用的关系有了深刻的认识^[6],特别是 Morey 在 1974 年设计出超宽带 GPR 并通过 GSSI 迅速实现了商品化,为 GPR 开创了新的发展方向。

从 70 年代开始,GPR 在检测地下管道、坑道方面大显身手^[7~10],特别是在检测地下非金属管道时表现出无可替代的优越性,基于类似的原因 GPR 开始协助刑事勘察。加拿大地质调查部门还充分利用 GPR 探测了北极永久冻土及加拿大西部碳酸钾矿。钻孔探地雷达在偏远地区使用时暴露了设备笨重、体积大和耗能多的缺点,此外,由于当时的石油地震勘探业已经开始采用数字处理技术,因此 GPR 数据的数字化成为人们迫切的期望。

2.4 1980—1990 年的发展

在此期间日本 OYO 公司开发了一种称作 Geo-

radar 的探地雷达,在欧洲初步取得了商业成功;加拿大 A-Cubed 公司于 1981 年成立并开始开发 GPR,随后于 1988 年创建了探头及软件公司(SSI),致力于 pulseEKKO 系列 GPR 的商业推广。

80 年代初,GPR 开始用于道路和公共设施调查,并取得了初步成果,如 Ulriksen 在检测有沥青混凝土罩面的桥面板时发现水泥混凝土的含氯量的变化会导致反射波波幅的变化。从 1984 年开始,前苏联开始研制机载 GPR 用于地质和自然资源调查。当美国环保部门开始调查和清理被污染的土地时,GPR 自然成为高分辨率地下测绘的工具,并且显示出巨大的商业价值。此外 GPR 还首次应用于农业和考古。

80 年代全数字化的 GPR 的问世,具有划时代的意义^[11]。数字化 GPR 不仅提供了大量数据存储的解决方案,增强了实时和现场数据处理的能力,为数据的深层次后处理带来方便,更重要的是 GPR 因此显露出更大的潜力,应用领域得以向纵深拓展。

2.5 1990—1995 年的发展

这是 GPR 突飞猛进的发展阶段,世界上很多科研结构和商业团体对它产生了浓厚的兴趣。GSSI 公司在商业上取得了极大的成功,在 1990 年被 OYO 公司收购;Malå 公司在瑞典成立;英国 ERA 公司因为研究和销售用于探测地下炮弹和地雷的 GPR 而声誉鹊起;SSI 公司也迅速发展壮大。

在科研方面,GPR 得到了地球物理和电子工程界的更多关注,技术上实现了很多突破,如多叠数据采集、数字信号处理和二维数值模拟等^[12~14]。GPR 的应用领域也进一步拓展到地层学和环境工程等。美国在 90 年代初期开始推行 SHRP(Strategic Highway Research Program)计划时,对 GPR 进行了专项研究,1992 年在南部和东部共 10 个州的沥青路面大范围测量以评估 GPR 测量路面厚度的准确性,最终证实误差仅为 $\pm 5\%$ 。

2.6 1995—2000 年的发展

计算机的发展全面推动了 GPR 的技术进步,在大型计算机上已可进行三维数值模拟,借助普通计算机即可快速处理大量数据,因此借助 GPR 进行地下测绘并且三维可视化也变得可行。

在此期间,市场的需求催生了多种不同的便携式 GPR,如 SSI 生产的 Noggin,中心频率 1GHz,配有简化的三维图像处理软件,尤其适合水泥混凝土结构的局部检测。由于环境调查和地雷探测的需

要,机载 GPR 的研究进一步深入,美国投入的科研力量相对较多。

美国材料试验协会(ASTM)1997 年制定了首条有关 GPR 的标准 D 6087—1997(至今已更新至 D 6087—2003),指导应用 GPR 进行桥面检测。1998 年 ASTM 制定了用脉冲探地雷达测量路面结构层厚度的标准 D 4748—1998,1999 年又推出了涵盖面更广的标准 D 6432—1999,适用于脉冲探地雷达探测地下结构或地下材料的所有工程项目。这些标准的出现,一方面说明 GPR 的应用日趋普遍,另一方面则标志着 GPR 已成为工程检测的常规手段并且能为计量提供重要的参考依据。

2.7 2000—2005 年的发展

进入 21 世纪,在矿产调查、考古、地质勘测、水文、农业、林业、环境工程、土木工程、市政设施维护以及刑事勘察等领域,GPR 的应用更加普遍,地雷(尤其是非金属地雷、浅埋的小型地雷)的探测依然是最具有挑战性、最热门的研究课题。

由于更多的国家开始关注 GPR 技术并加大了科研投入,新型 GPR 不断涌现,意大利甚至设计出在太空运行的 GPR。Duke 大学依照时间反转的概念设计了一种新型雷达^[15],在信号发射和数据处理方面与传统 GPR 有较大差别,原则上具备工作效率高、数据处理快的优势,有望提高 GPR 处理复杂问题的能力,该技术应用于 GPR 还处于起步阶段,一些理论问题还没有完全解决^[16,17],值得密切关注。

3 探地雷达的数据处理

在商用 GPR 出现以后,数据处理能力成为制约 GPR 发展水平、限制 GPR 应用范围的关键因素,一方面其数据量相当大,不经过处理几乎无法判读出有用信息,因而处理任务繁重,另一方面只有具备相关专业知识的专家才可能完美地处理并判读 GPR 数据。提高处理效率、减少对专家的依赖性成为 GPR 数据处理研究的两大课题。

与研制 GPR 的硬件系统相比,数据处理研究对物质条件的要求相对较少,因而吸引了世界上大批数学、地球物理、电子工程及其相关专业的优秀人才投身其中,取得了丰硕的成果。

数据处理主要指对 GPR 采集并记录的数字化数据的处理,处理过程依使用 GPR 的不同目的会有很大差异,很多情况下仅需对原始数据作简单处理,数据处理要作具体分析,讲究技巧和策略。一般地,

数据处理可分为基本处理和高级处理两部分。

3.1 基本处理

基本处理包括数据编辑整理、时变增益校正、时间和空间滤波,核心在于杂波抑制和滤波,由于 GPR 回波信号具有时变、非平稳、随机性等特点,且覆盖频谱宽,传统的傅里叶变换域滤波的降噪效果不佳。对随机噪声通过叠加的方法可以取得明显效果^[18];对相干噪声的处理比较复杂,其处理技术一直随着 GPR 的发展而进步^[19~22]。实际上,信号处理的任何新技术都值得关注,如 S 变换^[23],它秉承了小波变换的时频局部化的思想,由于巧妙地采用了与频率相关的高斯形窗函数,因而具有比小波变换更优良的性能,即可用于直接作时频分析(小波变换只能在某时间尺度下分析),更强的频率局部化能力并且天然地保持了局部化频率分量的相位特征,更高的时间清晰度,而且运算更方便,已成功应用于医学诊断、电能质量分析和地震数据处理等方面,S 变换同样适用于 GPR 的信号处理。

3.2 高级处理

为了对地下探测区作精确的刻画,需要对 GPR 数据作深入处理,可采用图像处理法和逆散射法。

(1) 图像处理法主要是对时域雷达图进行数学和图形处理,用处理过的图像提供目标的相关信息,适于目标识别类的应用领域。图像法具有处理速度快的优点,因此在地雷探测等对实时性要求极高的场合,得到了广泛应用。图像法最初借鉴了比较成熟的地震数据处理方法,如偏移、反褶积,随后 Hough 变换、合成孔径成像、全息成像、高分辨率三维图像处理、自适应图像法等也应用于 GPR 数据的实时处理或后处理。基于图像的目标自动识别属于更高级的处理过程。GPR 图像处理技术的总体发展水平目前尚处于幼年期,与医学诊断等行业的图像处理水平有较大差距。

(2) 逆散射法从电磁波的标量或矢量方程出发,根据 GPR 接收的信号反演目标及其背景的电磁本构参数、目标的几何参数(尺寸、深度和方位角等),在定量无损评估(QNDE)等方面得到了有效应用。逆散射问题除了在一些极简单的物理模型假设下有显式的解析解外,通常是非线性并且是不适定的。目前逆散射问题的求解计算大多是将其分解为一系列正问题,利用确定类或随机类优化算法进行迭代求解,因而计算量大、占用计算机内存和 CPU 时间多。如何在现有计算机技术水平下提高计算效

率一直是 GPR 发展过程中的热点,各国学者倾注了极大的科研激情,其前景举世瞩目^[24~27]。

4 探地雷达在我国的发展概况

中国地质大学(武汉)在国家自然科学基金资助下,从 1990 年开始在两年半时间内完成了 8 个省、自治区和直辖市 5 类岩土对象的 30 余个工程工区,包括众多地质问题的 GPR 现场探测。随着各种型号 GPR 的逐步引进以及国产 GPR 陆续上市,应用范围不断扩大,涉及矿业、环境、市政建设、土木工程、考古、探雷和极地考察等。

80 年代初,中国电波传播研究所、西安交通大学、中科院长春地理所、北京理工大学、西南交通大学、北京公路研究所和东南大学等单位开展了电波在地下传播特性的研究,研究成果集中体现在中国电波传播研究所于 1990 年研制出的 LT-1 和 LT-1A 型商用 GPR。中国电波传播研究所在随后十多年相继推出多种型号的 GPR,特别是 2004 年研制成功的 LTD-2000 小型 GPR 受到国内市场的欢迎。

1995 年北京爱迪尔国际探测技术有限公司成立,并于 1997 年推出了 CBS-9000V 型车载脉冲探地雷达。

长江工程地球物理勘测研究院等单位从 2000 年 5 月开始相控阵探地雷达的研究,2001 年其仪器研制和软件开发工作在国家 863 计划信息领域作为“高分辨率表层穿透雷达探测技术——相控阵探地雷达”课题立项。2004 年 5 月,国家 863 计划专家组在三峡工地对该课题的研究成果进行了现场验收,试验结果表明,与传统探地雷达相比,相控阵探地雷达具有探测深度大、分辨率高、信噪比高和抗干扰能力强等方面的优势。

国防科技大学电子科学与工程学院在国家 863 计划信息获取与处理技术主题支持下,历时三年,于 2005 年研制成功高分辨率 GPR 系统 RadarEye,该系统具有车载式和手持便携式两种工作方式,分浅层高分辨率和深层低分辨率多种工作模式。具备地下目标的二维、三维合成孔径成像以及地下目标分类等功能。

十多年来,我国科研人员携 GPR 硬件和软件科研成果广泛参加了国际学术交流^[28~32],既了解国外研究动态,也向世人展示了我国 GPR 的研发能力。

我国的 GPR 在 1970 年前后正式进入地球物理勘探业,与发达国家相比至少晚了 20 年,但我国在

应用研究和基础研究方面发展很快,在一些数据处理的理论研究方面已处于世界一流水平。令人欣喜的是,在中国,理性的 GPR 大市场正在孕育之中,同时一股令全球同行不可忽视的科技力量正在形成。当然也要清醒地认识到与发达国家的差距,我国有不少电子元器件要进口,很多产品还没有经受国际市场的考验。缩小乃至消除差距还要靠自力更生,上世纪末欧洲官员在美国的遭遇颇有启发意义^[33]。

5 总结

回首 GPR 的发展历程,其道路是不平坦的,有缓慢甚至停滞的时期,也有高速发展的阶段,电磁学、电子工程、地球物理、数学和计算机等学科的发展以及探索地下世界的社会需要一起推动着 GPR 技术不断前进,同时 GPR 的研究也向相关学科提出了生动的课题,彼此相互促进,无论过去还是将来都不能脱离历史背景而孤立地讨论探地雷达技术。

GPR 也有局限性,它的探测深度与分辨率是相互制约的,所以在设计或选用天线时只好折中考虑,另外它的探测效果与地质条件密切相关,当土壤对电磁波的耗散性弱并且目标的电磁特性与其环境相比反差大时,探测效果好而且数据处理相对简单,反之则表现不出较好的性能,甚至完全不适用。现阶段商用 GPR 品种繁多,数据记录格式各异,尚无世界通用的产品规范,给厂商和用户增加了麻烦,而且不利于通用数据处理软件的开发和推广。尽管如此,在无损伤检测领域至今还没有其它检测手段具有象 GPR 一样广泛的适应性,惠及如此众多的行业,在很多场合下 GPR 是无可替代的。除了车载式探雷用的 GPR 和机载 GPR 有越来越复杂的倾向外,一般民用产品正在向更精巧、更智能化、更节能和更方便的方向发展,最具吸引力的是价格更低廉,这一点对于 GPR 的健康发展具有深远意义。

参考文献:

- [1] Annan AP. GPR—history, trends, and future developments[J]. Subsurface Sensing Technologies and Applications, 2002, 3(4): 253—270.
- [2] Bailey JT, Evans S. Radio echo sounding of polar ice sheets[J]. Nature, 1964, 204(4957): 420—421.
- [3] Walford MER. Radio echo sounding through an ice shelf[J]. Nature, 1964, 204(4956): 317—319.
- [4] Nolan RC, Egghart HC, Mittleman L, et al. MERADCOM mine detection program: 1960—1980

- [R]. Fort Belvoir, VA: US Army Mobility Equipment Research Development Command, Report 2294, 1980.
- [5] Huston D, Fuhr P, Maser K, et al. Nondestructive Testing of Reinforced Concrete Bridges using Radar Imaging Techniques[R]. VT: Department of Mechanical Engineering, College of Engineering & Mathematics, University of Vermont, Technical Report NETCR 94-2, 2002.
- [6] Olhoeft GR. The Electrical Properties of Permafrost [D]. Toronto: University of Toronto, 1975.
- [7] US Patent 3 967 282 and 4 062 010, Young JD, Caldecott R. Underground pipe detector[P]. US:1976.
- [8] Moffatt DL, Puskas RJ. A subsurface electromagnetic pulse radar[J]. *Geophysics*, 1976, 41(3):506-518.
- [9] Eberle AC, Young JD. Development and field testing of a new locator for buried plastic and metallic utility lines[A]. Transportation Research Board[C]. Washington, DC: National Academy of Science, 1977, (631):47-51.
- [10] Chan LC, Moffatt DL, Peters L. A characterization of subsurface radar targets[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1979, 67(7):991-1000.
- [11] Leckebusch J. Ground-penetrating radar: a modern three-dimensional prospecting method[J]. *Archaeological Prospection*, 2003, 10(4):213-240.
- [12] Fisher E, McMechan GA, Annan AP. Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data[J]. *Geophysics*, 1992, 57(3):495-504.
- [13] Madrid JJM, Corredera JRC, Vela GD, et al. Detection of shallowly buried objects with subsurface radars[A]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium on Better Understanding of Earth Environment*[C]. Tokyo: 1993.
- [14] Bourgeois JM, Smith GS. A full electromagnetic simulation of a ground penetrating radar: theory and experiment[A]. *Antennas and Propagation Society International Symposium*[C]. 1994.
- [15] Dehong L, Gang K, Ling L, et al. Electromagnetic time-reversal imaging of a target in a cluttered environment [J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 2005, 53(9):3058-3066.
- [16] Borcea L, Papanicolaou G, Tsogka C. Theory and applications of time reversal and interferometric imaging[J]. *Inverse Problems*, 2003, (6):S139-S164.
- [17] Yavuz ME, Teixeira FL. Frequency dispersion compensation in time reversal techniques for UWB electromagnetic waves[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2005, 2(2):233-237.
- [18] Björklund N, Johnsson T. Real-time sampling of Ground Penetrating Radar and Related Processing [D]. Luleå, Sweden: Department of Computer Science and Electrical Engineering, Luleå University of Technology, 2005.
- [19] Groenenboom J, Yarovoy AG. Data processing for a land-mine-detection-dedicated GPR[A]. *Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar* [C]. Gold Coast: 2000.
- [20] Chiang P-j, Tatum SL, Collins LM. Signal processing of ground-penetrating radar data for subsurface object detection [A]. *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VI*, SPIE[C]. Orlando, FL, USA: 2001.
- [21] Carhoun DO. Adaptive clutter suppression for ground penetrating radar [A]. *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets X*, SPIE[C]. Orlando, FL, USA: 2005.
- [22] Carevic D. Clutter reduction and detection of minelike objects in ground penetrating radar data using wavelets[J]. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2000, 1(1):101-118.
- [23] Stockwell RG, Mansinha L, Lowe RP. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 1996, 44(4):998-1001.
- [24] Hui Z, Takashi T, Toshiyuki T. Three-dimensional reconstruction of a shallowly buried mine using time-domain data[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, 39(4):276-280.
- [25] Monorchio A, Bretones AR, Mittra R, et al. A hybrid time-domain technique that combines the finite element, finite difference and method of moment techniques to solve complex electromagnetic problems [J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 2004, 52(10):2666-2674.
- [26] Anyong Q, Ching Kwang L, Lang J. Electromagnetic inverse scattering of two-dimensional perfectly conducting objects by real-coded genetic algorithm[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2001, 39(3):665-676.
- [27] Franceschini G, Franceschini D, Massa A. Full-vectorial three-dimensional microwave imaging through the iterative multiscaling strategy-a preliminary assessment[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2005, 2(4):428-432.
- [28] Zhang A, Jiang Y, Wang W, et al. Experimental

第 11 届中国声发射学术研讨会会议纪要

第 11 届中国声发射学术研讨会于 2006 年 7 月 28 日—8 月 1 日在浙江省杭州市举行,大会由浙江省特种设备检验中心承办。参会正式代表共 86 名,中国无损检测学会副理事长耿荣生教授、副理事长沈功田研究员出席了会议。

大会共收到论文 60 余篇,其中 48 篇被录入到论文集。参会论文中综述类(含标准)7 篇,仪器与信号处理类 4 篇,结构应用类 19 篇和材料表征类 18 篇。内容涉及航空航天领域、承压设备检验、大型常压储罐检测、医学研究和变压器检测等方面声发射技术的应用、仪器研制、传感器设计、信号分析处理及定位技术和检测标准等。

在大会开幕式上,中国无损检测学会副理事长沈功田研究员宣读了无损检测学会的贺信;浙江省质量技术监督局陈振华总工程师致欢迎词;中国无损检测学会副理事长耿荣生教授祝贺学术研讨会的顺利召开,并介绍了第 17 届世界无损检测会议的筹备进展和对声发射专业委员会的要求;声发射专业

委员会主任戴光教授代表第八届声发射专委会作了工作总结报告;最后,浙江省特种设备检验中心丁守宝主任介绍了本单位的发展情况,并表示将全力办好此次会议,促使大会获得圆满成功。

大会特别邀请了多名国内声发射领域的专家对国内外声发射技术的发展情况作了报告,指出了国内声发射技术发展和应用水平,以及与国外发达国家相比在某些领域的差距,为我国声发射技术的发展指明了方向。

大会特别邀请了美国 Memphis 大学的教授 Gang Qi 博士介绍了声发射技术在医学领域的应用和研究成果,并介绍了 2007 年将在美国举行的第五届国际声发射学术交流暨第 50 届声发射工作组大会的筹备情况。

大会还邀请到国内外多家声发射仪器厂家参会,给大会带来了国内外最新的声发射技术及仪器进展等有关信息。

(无损检测学会声发射专业委员会)

studies on GPR velocity estimation and imaging method using migration in frequency-wavenumber domain [A]. 5th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory[C]. Beijing: 2000.

- [29] Cui TJ, Qin Y, Wang G-L, et al. Low-frequency detection of two-dimensional buried objects using high-order extended Born approximations [J]. Inverse Problems, 2004, (6): S41—S62.
- [30] Wentai L, Yi S, Chun Lin H. A TAM-BP imaging algorithm in GPR application [A]. 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology[C], 2004.
- [31] Fang G. New design of the antipodal Vivaldi antenna for a GPR system [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 44(2): 136—139.
- [32] Hui Z, Sato M, Hongjun L. Migration velocity analysis and prestack migration of common-transmitter GPR data [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2005, 43(1): 86—91.
- [33] Bruschini C, Bruyn KD, Sahli H, et al. Study on the state of the art in the EU related to humanitarian demining technology, products and practice [EB/OL]. <http://www.eudem.vub.ac.be/publications/Files/eudemfinal.pdf>, 1999.

(上接第 474 页)

眉睫,这将对保障其安全运行发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 吴鸿启. 客运架空索道安全技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [2] GB 12352—1990, 客运架空索道安全规程 [S].
- [3] GB/T 13676—1992, 双线往复式客运架空索道设计规范 [S].
- [4] GB/T 13677—1992, 单线固定抱索器客运架空索道设计规范 [S].
- [5] GB/T 13678—1992, 单线脱挂抱索器客运架空索道设计规范 [S].
- [6] GB 9075—1988, 架空索道用钢丝绳检验和报废规范 [S].
- [7] GBJ 127—1989, 架空索道工程技术规范 [S].
- [8] JB/T 4730—2005, 承压设备无损检测 [S].
- [9] 任吉林. 电磁检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [10] EN 1711: 2000, 焊缝无损检测——用复平面分析的焊缝涡流检测 [S].
- [11] 任吉林. 金属磁记忆检测技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.