

城市道路地下空洞探测技术研究现状及发展

贾 辉 陈昌彦 孙增伟

(北京市勘察设计研究院有限公司,北京 100038)

【摘要】 阐述了城市道路地下空洞探测的必要性和重要意义,简要概述了目前城市道路地下空洞探测的主要方法及其分类、特点;重点介绍了探地雷达技术的应用现状、存在问题和未来的发展趋势。

【关键词】 城市道路;地下空洞;探测技术;探地雷达;现状与发展

【中图分类号】 TU 195.3

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2012.06.002

Research and Development of Underground Cavity Detection

Technology in City Road

Jia Hui Chen Changyan Sun Zhengwei

(Beijing Geotechnical Institute Engineering consultant Ltd., Beijing 100038)

【Abstract】 This paper illustrates the importance and necessity of underground cavity detection in city road, briefly generalizes the foremost technologies at present and their classification and characteristic, Focuses on ground-penetrating radar technology status, problems and future trends.

【Key words】 city road, ; underground cavity; detection technology; GPR; research and development

0 引言

近些年,随着城市的高速发展,地下空间不断被开发,城市道路下方原有的地层环境逐渐改变,在路面上部荷载、工程振动以及动水条件作用下,道路下方土层中逐渐产生空洞、松散区等地下病害,这些病害向上发展至地面即形成道路塌陷。根据北京市道路及地下管线相关部门的统计,近年来道路塌陷事件有呈逐年递增的趋势,城市重要道路每年均发生 200 起左右的道路塌陷,这些道路塌陷事件首先直接影响了道路的安全运行、破坏了城市的良好形象,同时在这些事件的背后隐藏着对广大人民生活及生命财产的严重威胁,因此开展城市道路地下空洞探测技术的研究,尽量将事发后抢险和治理转变为防患于未然,对于城市运行及人民生活具有十分重要的社会意义。对于工程检测领域的工程师而言,在复杂异常的城市道路工作环境下,开展地下空洞探测技术的研究是一个良好的命题,同时也面临多方面的技术挑战。

2008 年,为消除潜在的不同程度的道路地下空洞,北京市在奥运前组织了奥运路段地下空洞检测

工作,以便更好地为北京奥运会提供安全、可靠的交通保障;2009 年,值国庆 60 周年之际,为保证重要路段阅兵式的顺畅进行,北京市组织了地下管线综合检测,排查地下管线周边可能引起道路塌陷的不密实区域;之后 2010 年、2011 年北京市相继开展了一些重要道路的地下管线周边环境综合检测工作,主要针对管线周边可能存在的空洞和疏松区;道路地下空洞对城市运行的影响和危害由来已久,只是近几年随着城市的不断建设才逐渐凸显出来。近些年来在国内外重大事件背景下,北京市率先将城市道路下方及管线周边空洞的问题作为政府工作的重要组成部分,不仅先后组织了重要道路地下空洞的工程检测工作,同时也在部分科研院所及企业单位进行了科研立项,重点研究城市道路地下空洞探测的关键技术和相关问题。

目前,可用于地下空洞探测的方法主要有探地雷达法、多道面波法、高密度电阻率法、地震映像法、基于 ohm mapper 的电阻率成像法等。不同的物探方法具有不同的适用条件,在对目标体进行探测时又具有各自的优势。城市道路地下空洞的探测具有

工程环境复杂、地面干扰因素多、要求检测效率高、工期短等特点,因此上述方法并不全适用于城市道路地下空洞的探测,相比之下探地雷达法具有效率高、成果直观、解释过程简单等优点,是目前城市道路地下空洞探测中最常用的方法。

1 探地雷达探测技术的应用现状、存在问题及发展趋势

1.1 应用及发展现状

探地雷达又叫地质雷达(Ground Penetrating Radar,简称GPR)是一种利用广谱(1MHz~1GHz)电磁技术探测地下介质分布的无损探测技术。它主要利用地下介质电性参数的差异,根据回波的振幅、波形和频率等运动学和动力学特征来分析和推断介质结构和物性特征。

早在1904年,德国人Hülsmeier首次将电磁波信号应用于地下金属体的探测^[1]。1910年,Leimback和Löwy以专利形式提出将雷达原理用于探地,并正式提出了探地雷达的概念。由于电磁波在地层中的传播比在空气中的传播复杂的多,因此随后的几十年里探地雷达在各个领域的应用非常少,直至20世纪60年代探地雷达技术才逐渐应用到矿井(1960, J. C. Cook)、冰层厚度(1963, S. Evans)、地下粘土属性(1965, Barringer)、地下水位(1966, Lundien)的探测中。20世纪70年代初美国GSSI(Geophysical Survey Systems Inc.)公司成立并研发出世界上第一台商用探地雷达仪^[2],随后世界上其它国家的商业通用数字探地雷达系统陆续面世,具有代表性的主要有:美国GSSI公司的SIR系列、瑞典MALA公司的RAMAC系列;加拿大探头及软件公司(Sensor & software)的PulseEKKO系列;意大利IDS公司的RIS系列;微波联合公司(M/A-Com, Inc.)的Terrascan MK系列;日本应用地质株式会社(OYO公司)的GEORADAR系列等。上述系列商用雷达的研发和应用使探地雷达技术得到不断的推广和发展,探地雷达技术被逐渐应用到工程地质探测、水文地质调查、矿井探测、地基及道路地下空洞探测、管线探查、堤坝探测、隧道探测及考古等多个领域。

我国于20世纪80年代开始探地雷达的研究。航天部爱迪尔公司推出了CIDRC道路检测雷达,电子部青岛22所研制出LTD-3型探地雷达,骄鹏公司、中国矿业大学、中国科学院电子所也都分别研制出了自己的产品。

探地雷达理论方面的研究主要集中在探地雷达

数据处理和正演模拟两个方面。经过近20~30年的发展和应用,水平和垂直滤波、空间二维滤波、反褶积、偏移等处理手段已经成为市场上主流探地雷达系统所配备的基本处理手段。正常情况下,根据处理人员对工程的需要采取合适的处理手段即可达到较好的处理效果。但是在复杂工程环境(如城市道路地下空洞探测)中实施探地雷达探测时,雷达剖面会受到周边环境的严重干扰,为提高这类环境中雷达信号的分辨率和信噪比,吴建生、张昊^[3]等研究采用radon变换的方法消除雷达剖面存在的旁侧影响;韦宏鹤^[4]、师学明^[5]、李才明^[6]等采用小波变换的方法进行去噪、消除干扰,同时保留有用信号;戴前伟^[7]、周奇才^[8]等采用希尔伯特变换的方法从解析信号中得到瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率以提高图像信号的分辨力、增强目标识别的准确性。上述研究均取得了良好的效果。

成果解释是探地雷达探测中最关键和最困难的部分,采用物理正演和数值正演的方法获得地下典型目标体(空洞、松散体等)的电磁波反射特征可以为成果解释提供可靠的依据,提高解释的准确性。王惠濂^[9]、张汉春^[10]等对地下管线、洞穴、电缆、小构造^[11]等进行了物理模拟;戴前伟^[12]、冯德山、吴宝杰、葛志广^[13]等采用数值模拟的方法对地下各种异常体的不同形态、条件、环境等进行了正演计算研究,获得了典型地下异常体的理论电磁波传播特征。美国人Goodman在工程应用过程中通过总结研发了GPRSIM正演模拟软件,是至今专门用于雷达技术研究的正演商业软件。

1.2 存在问题

探地雷达技术在应用过程中数据采集、数据处理等方面都得到了逐步的完善和发展,逐渐成为城市道路地下空洞探测的首选技术方法,但是由于探地雷达的一些基本理论和关键技术尚未得到根本解决,因此在实施探地雷达时往往不能十分有效地解决工程问题,该技术还存在以下几个方面的问题:

1) 探测深度不够

目前,在城市道路雷达探测中,地层的复杂性、道路上方的诸多干扰以及雷达系统发射机功率有限等综合因素导致雷达有效探测深度在5m左右,而工程中关心的需要查明的问题很多在5.0m~10.0m之间。探测深度的不足严重影响了探地雷达优越性能的发挥。

2) 天线屏蔽性能不足

虽然目前市场上主流的商业探地雷达系统配备

的天线均标称为屏蔽天线,但是对于天线上方的电磁干扰、建(构)筑物干扰等都不能有效地屏蔽,这不仅影响了雷达信号的信噪比,同时也使雷达剖面复杂化,不利于雷达剖面的地质解释。

3)数据处理和解释人为干扰较多,存在较大的偏差

在进行雷达数据处理时,由于处理人员的知识背景和深度不同,对各种处理方法的原理和处理效果不够了解,在选择处理方法时大多只考虑所处理剖面的可观性而忽略了对有效信号的保留和识别,一些常规的处理方法在参数设置不当时很容易改变原有的、真实的雷达信号;在进行成果解释时,大多是依据电磁波同相轴、信号振幅、频谱等的变化来判断,而这些变化通常已经形成大家对地下异常体的一种共识或经验,如地下管线的表现形式为双曲线,事实上导致形成这种形态或变化的原因可能有多种因素,地下空洞或地上电线杆也能形成规则的双曲线。因此雷达数据的处理和剖面的解释人为因素的干扰较多,很容易导致真实异常的漏判或误判。

4)没有相关标准

在雷达技术使用过程中,不同的单位或个人对雷达成果的表述形式各不相同,对雷达异常的判别标准也存在很大差别,因此导致:①政府管理部门无法对探测成果进行横向对比;②成果使用者无法根据成果中提供的异常及其严重程度采取合理的处理措施。

1.3 发展趋势

为解决上述探地雷达技术存在的问题,更好地发挥探地雷达技术高效、直观、无损的优势,探地雷达未来有以下几个发展趋势:

1)硬件设备的改善。通过研发大功率发射机、高灵敏度接收机,增强雷达信号的穿透力,增加探测的深度,同时改善数据的信噪比;通过研发背向屏蔽式雷达天线,消除雷达天线上方构筑物或电磁类干扰,从而更加突出有效信号。

2)人机交互数据处理和解释系统的开发。通过对大量雷达探测工程实例的总结和研究,研发人机交互数据处理和解释系统,对不同环境中的雷达数据分别采用合理的处理方法和处理流程,通过集成并建立常见地下空洞等异常体的特征数据库,最终实现雷达成果的自动——半自动解释。

3)根据探地雷达的技术特点,结合实际工程的各种需要,对探地雷达数据处理、数据解释、成果表述等各方面建立统一的标准或规范性文件,规范异常体的识别、解释和定性,从而有利于施工方更好地利用探测成果采取恰当的处理措施。

2 其它探测技术方法

2.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法是上世纪80年代日本为适应山地物探的需要而提出的一种电法勘探技术。作为直流电法的一种,高密度电法结合了电测深和电剖面的功能,野外工作方法、数据处理和解释均比较简单,且数据信息丰富,对于探测低阻中的无充填空洞或高阻中的充水、湿土空洞具有较好的效果,但是对于低阻中充填水、湿土的空洞或高阻中的无充填空洞,探测效果不理想;同时在道路地下空洞探测中,传统的高密度电法为有损探测方式,需要向地面打入电极,虽然目前有人提出用电极打入软石膏放置地面代替电极插入地下的方式,但是这种方式只适合局部区域的调查,同时道路工程环境中的电磁干扰也会影响数据的有效性。对于单个剖面的数据采集,地面电极只需要一次铺设,但是当需要测试多个位置时,工作效率相对低的多,且可能会与地面交通发生冲突。

2.2 多道面波法

1994年至1995年间刘云祯最早提出多道瞬态面波的方法和概念^[14],经过近十几年的应用和发展多道面波法在岩土工程勘察、地质调查、坝基检测、滑坡调查、空洞探测等多个领域得到广泛应用。

多道面波法主要是基于面波的频散特性,在横向均匀的地层上,面波的传播是单向背离震源的,其频散特征在横向上也是稳定的。当地下存在空洞时,面波会朝向震源或其他方向产生反射或散射,通过对比面波的频散特征或者波形的横向变化,可以推断空洞的横向位置。在道路地下空洞的检测中,采用主动源(人工震源)时容易受到地面交通的严重干扰,同时不适合进行较长剖面的滚动采集,因此工作效率较低。在局部特定区域进行地下空洞的探测时 Park, Miller 和夏江海等(2005, 2007)尝试采用被动源(汽车、噪音)的多道面波法^{[15][16]},取得了一定的应用效果。

2.3 基于 ohm mapper 的电阻率成像法

Ohm mapper 是基于双偶极方式电阻率测量的一种电容耦合式电阻率测量仪器,测试过程中无需打电极,采用人工拖拉,实时成像,工作效率较高。对于探测高阻区域中的空洞具有一定的效果,由于这种方法与传统的直流电法相比具有无损、快速的优势,同时与探地雷达相比探测深度相对较深,因此在道路地下空洞探测中是一种值得尝试的新方法。

2.4 高密度地震映像法

高密度地震映像法是刘云祯于1994年提出的

一种新的地震波采集方法。陆域地震映像法又称为多波地震映像法,在波型的运用上可以利用面波、反射波、折射波和绕射波等;数据采集可以采用单道采集,比常规的地震反射波、折射波法效率高出多倍;在数据处理时无需进行动校正,节省数据处理时间的同时,避开了动校正对浅层反射波的拉伸和畸变影响。地震映像法通常采用共偏移距的采集方式,每次测量点为激发和接收距离的中点,时间域中各波的时序分布关系与形态特征是地层地质现象的客观反映,因此可以直接对映像剖面资料进行数字解释。高密度地震映像法最大的特点就是实时、直观,对于地层的横向变化(空洞)比较敏感。单娜林^[17]、丁荣胜^[18]、辛永祺^[19]等采用地震映像法进行了溶洞、土洞的探测,应用效果较好。

3 工程实例

笔者根据多年从事探地雷达检测的经验,将城市道路地下空洞探测过程中影响探地雷达探测效果的典型因素进行了总结,包括地下管线、道路下方脱空、人行天桥、路灯(电线)、地下井室等。一处典型的地下球形空洞见图1,其雷达图像整体表现为双曲线形式,图像内部充填为较杂乱的多次波;典型的地下管线,其雷达图像表现为明显的双曲线形式见图2;道路下方的脱空,其雷达图像除表现为信号较强外,局部信号也表现为双曲线形式见图3;道路上方人行天桥,在人行天桥的桥面不宽的情况下,其雷达图像也表现为典型的双曲线形式见图4,只有在桥面宽度较宽时,在双曲线的顶部才表现为较平整的同相轴,并有一定的延伸;路灯的干扰雷达图像,同样为明显的双曲线形式见图5;地下井室,由于大部分井室为方形,因此只在洞室的边界处表现出类双曲线的形式,主要是绕射电磁波的反映见图6。

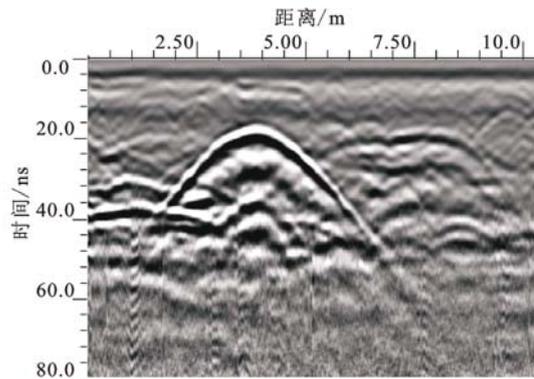


图2 典型地下管线探地雷达图像

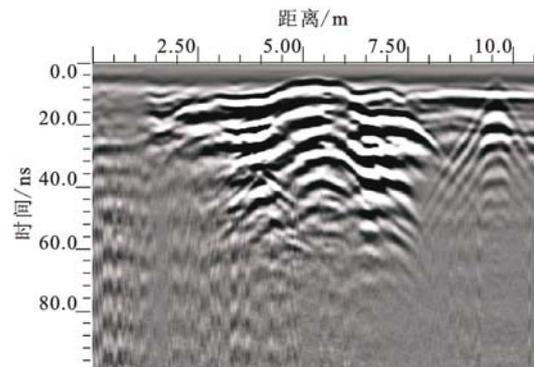


图3 典型路面下方脱空探地雷达图像

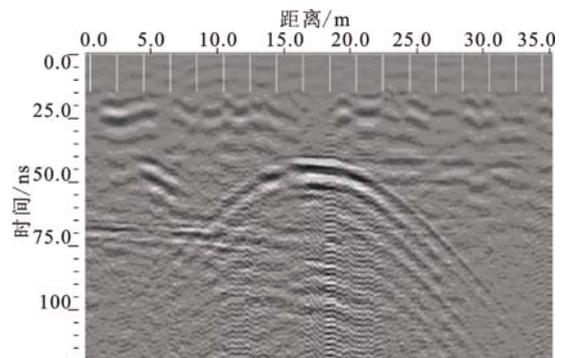


图4 典型道路上方人行天桥探地雷达图像

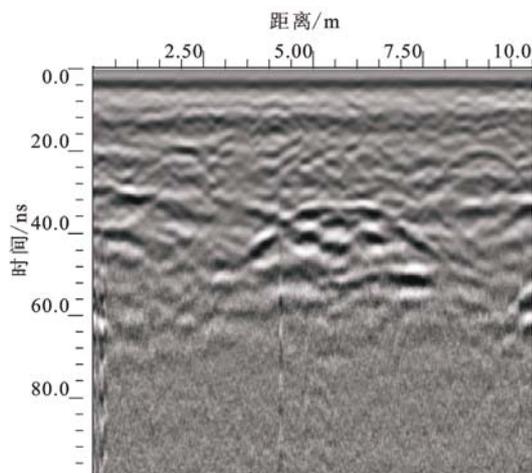


图1 典型地下球形空洞探地雷达图像

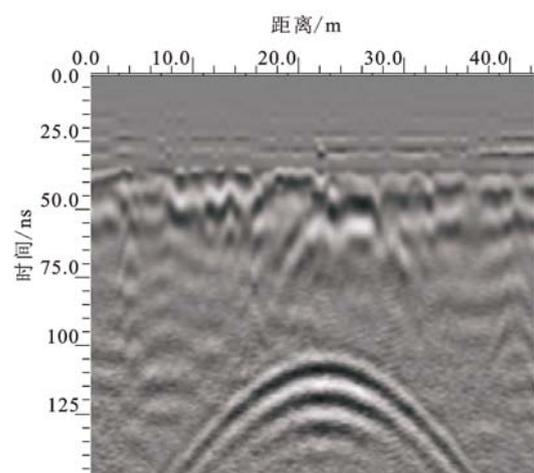


图5 典型道路两侧路灯探地雷达图像

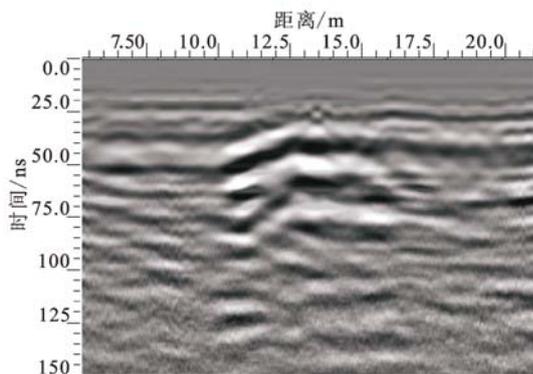


图6 典型地下井室探地雷达图像

从上述各种典型干扰的探地雷达图像来看,大部分具有双曲线的形态特征,在不了解周边环境分布的情况下,地下或地上构筑物很容易被错误的解释为空洞或者脱空;对于一些电磁类的干扰,目前已经有一些数据处理的方法可以进行减弱或消除其影响,但是对于地上、地下构筑物在雷达图像的反映却很难消除,因此对探地雷达有效信号的处理及成果解释造成较大影响,从而可能为后期的治理造成不必要的损失,这些都是探地雷达技术在城市道路地下空洞探测过程中存在的问题。

4 结 论

基于道路检测工程的紧迫性、工程实施的便宜性以及探地雷达法本身操作简单、成果直观、解释方便的技术特点,目前探地雷达法仍然是道路地下空洞探测的首选方法,但是在应用过程中应当正视探地雷达法的不足,总结其存在的问题,并研究解决的方法,使探地雷达技术不断发展和完善,增加探地雷达探测结果的可靠性和说服力,从而可以得到更好、更广泛的推广应用。

根据现有的各种地下空洞探测方法的技术特点,为增加空洞探测、解释的准确性,宜采用综合探测的方法,探地雷达法作为快速检测的手段可以用来普查,在圈定可疑区域后再根据工程环境、地球物理工作条件并结合其它方法的技术特点来选择合适的探测方法,同时在必要情况下需要实施钻探或钎探的方法,以验证探测成果的准确性。

5 致 谢

本文在整理、写作过程中,受到北京市勘察设计研究院有限公司白朝旭、张辉、陈义军、苏兆锋、肖敏等的大力协助,在此表示感谢。

参 考 文 献

[1] 陈义群,肖柏勋.论探地雷达现状与发展[J].工程地

球物理学报,2005,2(2):149-155.

- [2] 李华,等.探地雷达的发展进程及前景讨论[J].地球物理学进展,2010,25(4):1492-1502.
- [3] 吴建生,张昊.拉东变换在探地雷达资料处理中的应用[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(9):1270-1273.
- [4] 韦宏鸽.基于小波变换的探地雷达弱信号增强[J].地球学报,2003,24(增刊):258-261.
- [5] 师学明,等.小波变换在地质雷达干扰波压制中的应用[J].工程地球物理学报,2008,5(3):279-286.
- [6] 李才明,等.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.
- [7] 戴前伟,等.探地雷达数据的解析信号分析及应用[J].西部探矿工程,2007(3):130-131.
- [8] 周奇才,等.探地雷达图像数据处理及应用研究[J].物化探计算技术,2010,32(6):665-668.
- [9] 王惠濂.探地雷达目的体物理模拟研究结果[J].地球科学——中国地质大学学报,1993,18(3):266-284.
- [10] 张汉春,曹振峰.沙滩内小型管线的探地雷达模型实验研究[J].地球物理学进展,2010,25(4):1516-1521.
- [11] 葛如冰,孟凡强.探地雷达检测路面脱空大小的模型试验[J].物探与化探,2009,33(5):599-602.
- [12] 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.
- [13] 葛志广.北京市城市道路地下空洞探地雷达探测正演模拟研究[D].中国地质大学硕士学位论文,2010.
- [14] 刘云帧.工程物探新技术[M].地质出版社,2006.
- [15] Park C. B., Miller R. D., Ryden N., Xia, J. H. and J. Ivanov, 2005. Combined Use of Active and Passive Surface Waves. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 10:323-334.
- [16] Park C. B., Miller R. D., Xia, J. H. and J. Ivanov, Julian., 2007. Multichannel analysis of surface waves (MASW)-active and passive methods. *The leading edge*. 26:60-64.
- [17] 单娜琳,程志平.地震映像方法及其应用[J].桂林工学院学报,2003,23(1):36-40.
- [18] 丁荣胜,等.高密度电阻率法和地震映像法在采空区勘察中的应用[J].物探与化探,2010,34(6):732-736.
- [19] 辛永祺.高密度地震映像技术在空洞探查中的应用[J].山西建筑,2006,32(3):93-94.

收稿日期:2012-09-05