

试论探地雷达技术在搜救作业中的贡献

张一宁

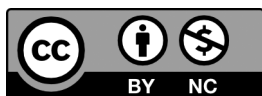
东北大学理学院，沈阳

摘 要 | 探地雷达（GPR）是浅表地球物理科学技术中的一项重要手段。其重要性体现在它的应用广泛性和有效性。在工程检测、环境保护、文物考古、灾害救援、反恐安检、资源勘探、水文水利等科学技术领域中探地雷达都在发挥着其他手段无法取代的重要作用。关于探地雷达发展历史、基本系统及原理、信号处理与成像等方面的综述性文章已经很多。本文将重点评述作为浅表地球物理观测技术重要手段的探地雷达在几个基础地学与工程技术领域中的应用。这些方面包括沙漠中高大沙丘的内部结构与形成机理，永久冻土的现状探测与演化预测，民用基础设施（公路、桥梁、大坝、堤防）内部或地基内空洞及软弱带的检测，以及地震灾害现场生命探测与救援。本文还将用一定篇幅评述探地雷达技术的变异形式（如钻孔雷达、探月雷达）。最后将就探地雷达技术现存的问题及发展方向提出个人见解。需要强调的是，尽管本文以探地雷达的科研应用为主题，浅表地球物理科技成果在各个领域的成功应用绝对不可能倚赖任何单一手段或方法。所有成功的实例都证明一定要强调某一方法为主，其他手段为辅，多手段、多方法的有效配合，才有可能最大程度的减小探测结果的非唯一性，提高准确度和精确度。

关键词 | 浅表地球物理；探地雷达；高大沙丘；永久冻土；生命探测与救援

Copyright © 2021 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 探地雷达在浅地表地球物理科学技术中的应用

1.1 沙丘内部结构及形成

机理随着亚洲内陆干旱化、水资源与生态恢复、沙尘暴源区等研究的不断深入,风沙形成的机理研究已成为国内外十分关切的问题。高大沙丘(沙山)的形态能够提供沙漠及沙漠边缘地带的古气候条件的宝贵信息,包括风况的演化历史。内蒙古西部的巴丹吉林沙漠东南部的高大沙丘是一种独特的风沙地貌。当地干旱少雨,地表水源缺稀,而其中的高大沙丘之间却分布着众多常年性湖泊。是罕见而珍贵的世界性地质遗产,为世界上规模最宏大的沙山地貌。自20世纪30年代以来,吸引了众多国内外学者对其进行研究。而其湖泊水的来源仍是学者探索的热点和难点。虽然人们对沙丘表面地貌已有较多的了解,但沙丘的内部结构对地下水运移、沙丘间湖泊形成的影响却知之甚少。解释高大沙丘的成因需将表面地貌和内部结构统一考虑。探地雷达是了解沙山内部结构最为有效的探测手段。

2.2 多年冻土现状,演化及对基础设施地基稳定性的影响

多年冻土是指保持在 0°C 或 0°C 以下至少两年的岩土体。永久冻土分为两层:上部是夏融冬冻的季节活动层;下部是终年不融的多年冻结层。按体积含冰量划分,多年冻结层可细划分为少冰冻土、多冰冻土、富冰冻土、饱冰冻土、含土冰层等五种类型。饱冰冻土和少冰冻土可视为最主要的两种典型冻土类型。饱冰冻土内部冰晶体通常呈层状或斑状构造,体积含冰量在50%以上;少冰冻土内部冰晶体通常呈整体状或网状构造,体积含冰量在25%以下。多年冻土在中国有着广泛的分布,其面积约占国土总面积的22%。青藏高原多年冻土层对气候变迁极为敏感。现有的观测表明,青藏高原浅表地温在增高,与此相伴随的则有冻土季节活动层的增厚。在地面的表现则是水面和湖面水位的下降,和气候变干之后造成的荒漠化。随着对多年冻土区研究的深入,探地雷达以其快速、高效、无损等优点,从20世纪90年代开始被广泛应用。探地雷达用于多年冻土的研究主要在于如下几个方面:1)永久冻层中冰体的大小,形态与分布;2)热状态的成层结构;3)季节活动层中含水量的空间变化;更具有挑战性的还有4)永久冻层下界面的形态。探地雷达可以清晰地、常规性地探测到夏融冬冻的季节活动层与多年冻结层界面。这一点基本上没有疑义。探地雷达用于探测冻

结层中冰体的大小和形态分布则需要更为仔细的研究分析。小于 GPR 分辨率的透镜状冰体分布在雷达剖面上通常显示为杂散的、相互干涉的双曲线反射,而大的冰体在雷达剖面上显示为连续的反射面。并且,反射面以下相对干净,没有太多的杂散波。这个特征使得我们可以对大的冰体的深度和水平展布做出较好的估计。由于多年冻土地层状态复杂,含有不同尺度的散射体(卵石、孤石、冰透镜体、热岩溶等),经常出现层状结构的缺失(季节活动层的不均匀分布),使用传统的反射法来分析探地雷达的数据已是勉为其难了。未来的研究应向多收发距、多通道、多频率的探地雷达阵列式数据采集发展。与此相适应的数据分析处理算法也应是基于宽频带散射,而不是层状反射的电磁波传播的全波理论。这将是工程地质学家和浅表地球物理学家所要面临的新挑战。

2.3 民用基础设施地基及堤坝中的空洞和软弱带的检测

探地雷达作为无损检测与探伤的一个重要手段已在工程实践中得到广泛应用。在这一应用领域,有两个方面的问题须研究者予以特别注意。1) 空洞或软弱带大小与雷达波长之间的相对关系; 2) 探地雷达一定要与其他探测手段联合使用以提高检测结果的准确性。当空洞或软弱带的尺寸远大于雷达波长时,这应是最简单最容易探测的情况。几何波动学的原理雷达适用。空洞或软弱带的尺寸和形状应该得到最好的描述。当空洞或软弱带的尺寸小于雷达波长,不管是使用雷达或其他基于波动理论的探测方法,基本上已无法区分出独立的空洞或软弱带。

可幸的是,利用有效介质理论探地雷达仍有可能对软弱带的大小和弱化程度做出一定评估。最有意思的情况是如果雷达波长与空洞或软弱带尺寸相当时,空洞可以明确地表现为共振腔而使雷达波在空气波的波长上发生谐振。在雷达反射剖面图上,这使空洞的存在更为明显。雷达波长与空洞或软弱带尺寸不相上下时空洞的最大特点是其顶部有强烈凸面状的反射体,其下面有低频谐振。最为常用的探地雷达空洞或软弱带探测方式是用直线剖面法,所以,当空洞或软弱带是一个三维体,而不是近似的二维体时,空洞或软弱带的三维效应是不可忽视的。这时最好的办法是在地表进行二维扫描,以得出空洞或软弱带在地面水平方向上的二维投影。钱荣毅和任明星(未发表)在北京于2003年在国内开展大规模的道路隐蔽空洞实验探测,在数年间每年进行了500 km测线长度的探地雷达探测,进行了空洞探测数据采集设计、数据处理和快速解释方法的研究。同济大学谢雄耀研究团队尝试了用支持向量机人工智能算法自动识别钢

钢筋混凝土铸件内部孔洞缺陷。浙江水利研究院和同济大学的研究团队近 10 年来持续进行大坝和海塘堤防隐患的雷达探测研究。针对海塘堤脚淘空损伤检测,详细分析了浙江某海塘堤脚沉井防冲结构及其相关介质的物理性质和空间分布特点以识别海堤内部的软弱带。检测试验和综合分析表明,采用雷达检测可指出淘空损伤现象存在的可能性及大致位置和范围,而难以断定损伤的性质及尺寸。这一事实再次证明探地雷达一定要与其他探测手段联合使用以提高检测结果的准确性。单一使用探地雷达有时无法达到预期检测效果。

2.4 灾害现场生命探测与救援

大部分的救生系统,例如视频系统,侦测的范围非常有限并且只有在移动的遇险者进入视频监测系统的视野(直视通视性)之后才能报警。另一方面,基于音频的侦测系统大大受限于间隔、障碍物、残垣以及遇险者是否还强壮和清醒到能够发出声音。而探地雷达可以穿透障碍物(例如钢筋混凝土砖墙、柏油层、泥石流和雪崩造成的积雪)进行侦测。进行灾害现场的生命探测与救援时,探地雷达主要是靠探测伤员的呼吸运动或者移动来工作的。雷达天线连续发射电磁波,对一定空间进行扫描,接收器不断接收到反射波并对返回信号进行算法处理。

基于这样的工作原理,所以,探地雷达搜救既不受 Los 的限制,也不受救援现场复杂介质造成的杂散波的影响。假如被探测者已死亡,返回信号是相同的。假如目标在动,则信号有差异。通过对不同时间段接收的信号进行比较等算法处理,就可以判定目标是否在活动。呼吸与心跳是两个最重要的生命体征。呼吸运动造成的胸腔运动幅度可达 $1 \sim 2\text{cm}$;有规律而且频率较低,一般是 $0.1 \sim 0.4\text{Hz}$,因此,可以把呼吸运动和其他较高频率的运动区分开来。由于心跳幅度较小,探地雷达很难在复杂的救灾现场探测到心跳信号。莫斯科国立鲍曼科技大学的遥感实验室在俄国率先从生物医学工程方面开展了人类生命体征的雷达探测研究。西安第四军医大学王健琪研究团队将探地雷达应用于灾害现场生命探测与救援推向实用化,并应用于 2008 年汶川地震灾区搜救现场。

3 结论与展望

随着应用范围的不断拓宽,实际问题对尚处于成长期的探地雷达提出越来越高的技术要求,其中探测深度和分辨率的矛盾显得越来越明显,这对硬件、

软件都提出了更高的挑战。在硬件方面，三维探地雷达阵列已开始出现在商业市场上，高速数据采集技术正逐步向高端发展。在冲击脉冲雷达有了长足的进步与广泛的应用之后，调频连续波（FMCW）雷达技术由于其特有的优势，又开始受到研究人员的青睐，以应对在某些领域中脉冲雷达无法解决的问题。在FMCW技术中，探地雷达系统最常采用的是步进调频连续波（SFCW）。很多研究院所及高校都有自己的SFCW探地雷达系统用于科研开发。在商业市场的推广上尚不普遍。在软件方面，叠前深度逆时偏移、全波反演、经验模式分解、压缩感知等最新成像技术最新算法都已在探地雷达数据处理中崭露头角。相信在不久的将来探地雷达数据处理与成像的水平会更上层楼。需要强调的是，尽管本文以探地雷达的应用为主题，浅地表地球物理的成功一定要强调多手段，多方法，以期最大程度的减小探测结果的非唯一性，提高准确度。

参考文献

- [1] 方广有，张忠治，汪文秉. 脉冲探地雷达的模拟计算[J]. 微波学报，1998，14（4）：288-295.
- [2] 傅磊，刘四新，刘澜波，等. 机载探地雷达数值模拟及逆时偏移成像[J]. 地球物理学报，2014，57（5）：1636-1646.
- [3] 葛双成，梁国钱，陈夷，等. 探地雷达和高密度电阻率法在坝体渗漏探测中的应用[J]. 水利水电科技进展，2005，25（5）：55-57.

Discussion on the Contribution of GPR Technology in Search and Rescue Operations

Zhang Yining

School of Science, Northeastern University, Shenyang

Abstract: Ground penetrating radar (GPR) is an important means in shallow

geophysical science and technology. Its importance lies in its universality and effectiveness. GPR is playing an important role in engineering testing, environmental protection, archaeological relics, disaster relief, anti-terrorism security inspection, resource exploration, hydrology and water conservancy and other scientific and technological fields that cannot be replaced by other means. There have been many articles on the development history, basic system and principle, signal processing and imaging of GPR. This paper reviews the application of ground penetrating radar (GPR) as an important means of shallow geophysical observation in several basic geoscience and engineering fields. These include the internal structure and formation mechanism of tall sand dunes in the desert, the detection and prediction of the status quo and evolution of permafrost, the detection of cavities and weak zones in civil infrastructure (roads, Bridges, DAMS and dikes) or in the foundation, and the detection and rescue of life in earthquake disaster sites. Variations of GPR technology (e.g., borehole radar, lunar radar) will also be reviewed at length. Finally, I will put forward my personal opinions on the existing problems and development direction of GPR technology. It should be emphasized that although the topic of this paper is the scientific application of GPR, the successful application of superficial geophysical achievements in various fields cannot depend on any single means or method. All successful examples have proved that it is necessary to emphasize one method as the main and other methods as the auxiliary, and only by effective cooperation of multiple methods and multiple methods can the non-uniqueness of detection results be reduced to the greatest extent and accuracy and precision be improved.

Key words: Superficial geophysics; Ground penetrating radar; Tall dunes; Permafrost; Life detection and rescue