

文章编号: 1001—1749(2010)04—0397—05

# 钻孔雷达电磁波特性与桥梁地基工程评价研究

焦彦杰, 李 华

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

**摘要:** CT(层析成像)是一种有效的地球物理手段,具有信息量大,分辨率高等特点。通过电磁波特性和分析方法研究,利用钻孔雷达等工程物探设备,可以对建筑物、公路桥梁地基工程的地质情况进行探测,对地质构造与岩石特性进行研究。这里阐述了钻孔雷达的野外测量工作方法,对比试验和资料处理过程。在结合影响电磁波因素的采样试验后,得出了介电常数与孔隙度、含泥量的关系,并利用实测数据,对测量结果进行了综合解释,为该工程质量的检测提供了很好的依据。

**关键词:** CT 钻孔雷达;介电常数;电磁波

**中图分类号:** P 631.3<sup>+</sup>25 **文献标识码:** A

## 0 前言

电磁波 CT(层析成像)法是一种研究高频电磁波在介质中传播规律的地下物探方法,根据地下介质对高频电磁波的吸收差异,起到探测地质目标的作用<sup>[5]</sup>。它是一种利用在物体周边所获取的某种物理量的一维投影数据,运用一定的数学方法,通过计算机处理,重建物体特定层面上的二维图像,以及依据一系列相关的二维图像,构成三维图像的技术。

随着电子及电子计算机技术的飞速发展,近几十年来,工程物探专业根据弹性波理论、电磁波理论和电学原理,发展出了许多新的工程物探方法,并相应发展了一大批适时采集处理,软件、硬件功能于一体的工程物探探测设备。

钻孔雷达就是其中技术重要的组成部份,它属于电磁波 CT 技术的一种,只是基于电磁波频率的不同,在分辨率和探测距离上与其有所差别。它是一种研究高频电磁波在介质中传播规律的探测方法,根据地下介质对高频电磁波的吸收差异,起到

探测地质目标体的作用。根据岩石物性的不同,钻孔地质雷达可以探测较深的地质目标,径向探测深度可达百米<sup>[11]</sup>。

工程评价一般采用的方法是静力触探,动力触探,以及钻孔取芯等,并结合土工试验进行分析。虽然钻孔取芯经实验室测定<sup>[8]</sup>,其优点是结果可靠,但缺点是效率底、周期长、代表性差、费用高,对地基会造成破坏,影响工程质量。另外,一般钻探方法在取芯率低的地区就无能为力了。钻孔雷达电磁波 CT 技术受场地、地形条件的限制较少,对工作地区没有破坏。而且它在解决断层破碎带、软弱层、岩溶等地质构造方面,有着明显的优势<sup>[9]</sup>。

## 1 电磁波传播的主要特性

电磁波地下传播特性取决于地下介质的高频导电性能,而导电特性的变化,直接影响地下电磁波的传播特性与反射特性,即速度与衰减。同时,这二个特性还取决于地下介质介电性与传导性。

通常来说,在工程质量检测中,使用的探地雷达天线的主频一般相对较高,遇到的介质多为无磁

性且以位移电流为主的介质。因此,在计算电磁波在地下介质中的传播速度时,只需要考虑介电常数的因素,就可得电磁波传播速度:

$$V \approx \frac{C}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (1)$$

式中  $C$  是电磁波在真空中的传播速度,  $C = 0.30 \text{ m/ns}$  (光速);  $\varepsilon_r$  是介质的相对介电常数。

### 1.1 电磁波分析原理

当电偶极子衍射效应可以忽略,测点与发射点距离足够远时,可以将电偶极子场作为辐射场<sup>[13]</sup>。在辐射区内,介质中的电磁波传播路径可以用射线来描述<sup>[10]</sup>。电磁波速度层析成像可以用公式(2)进行描述:

$$d_i = \int_{T_i(m)} m(x) ds \quad (2)$$

式中  $d_i$  为第  $i$  条射线的测量参数,可以是直达波的走时或振幅;  $m(x)$  为介质物性分布函数;  $x$  为空间坐标;采用走时信号进行速度层析时,  $m(x)$  为介质慢度  $s(x)$ 。

用二天线之间的直线段  $L_i$  代替  $T_i$ ,式(2)可以转化为线形积分:

$$d_i = \int_{L_i} (1/v(x)) ds = \int_{L_i} s(x) ds \quad (3)$$

式中  $d_i$  为第  $i$  条射线走时。

将二钻孔间的平面分为若干个像元,把式(3)分配到各像元内进行求解。在各像元内取基函数  $f_j$ ,描述研究区内介质的物性分布函数见式(4)。

$$m(x) = \sum_{j=1}^M b_j \cdot f_j(x) \quad (4)$$

把式(4)代入式(1),可得式(5):

$$d_i = \int_{T_i} m(x) = \sum_{j=1}^M b_j \int_{T_i} f_j(x) ds = \sum_{j=1}^M G_{ij} b_j \quad (5)$$

式中  $G_{ij} = \int_{T_i} f_j(x) ds$ ;  $f_j$  可以是定常数或插值函数。

由此可见,电磁波速度层析成像问题被转化为一个求解线性代数方程组的问题<sup>[1]</sup>。

### 1.2 影响介电常数的主要因素

由式(1)可知,电磁波速度与介质的介电常数有很大关系,考虑到介质的不同组份,那么介电常数可以有很多分量。表征介质总的介电常数,常用 CRM 法<sup>[8]</sup>。

$$\varepsilon_r = [V_w \varepsilon_w^a + (1 - \phi) \varepsilon_g^a +$$

$$(\phi - V_w) \varepsilon_{air}^a]^{\frac{1}{a}} \quad (6)$$

式中  $\phi$  为孔隙度;  $V_w$  为体积含水量;  $\varepsilon_r$ 、 $\varepsilon_w$ 、 $\varepsilon_{air}$ 、 $\varepsilon_g$  分别为介质、水、空气和介质颗粒的介电常数;  $a$  是一个与电场方向有关的因子。

在 1 MHz 至 1 GHz 频段范围内,体积含水量对视介电常数影响很大。同时,由于此次工作区干旱少雨,所以孔隙度也是个重要因素。在工作区选用岩样,均为泥质砂岩,通过实验室测量得到它们的关系,如图 1 所示。

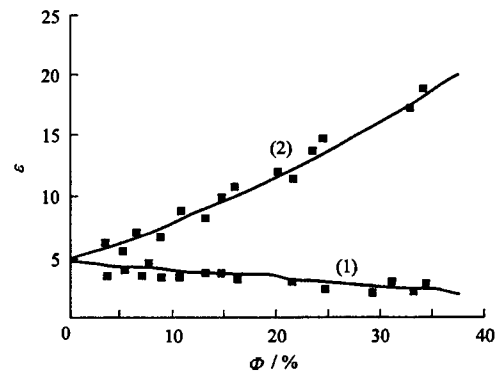


图 1 孔隙度与介电常数关系曲线

Fig. 1 Relationship curves between porosity and dielectric constant

在图 1 中,曲线(1)为干岩石的测量结果,曲线(2)为水饱和岩石测量结果。虽然结果相反,但对于某一地区岩石,在其孔隙度或含水饱和度单一确定的情况下,可以衡量岩石的介电常数。

## 2 钻孔雷达测量工作方法

根据工作方式,钻孔雷达测量可分为单孔反射测量和跨孔透射测量二种。

(1)单孔反射测量的工作方法比较简单,发射天线和接收天线同在一个钻孔。以距离或时间为参数,沿钻孔方向上下移动,以  $360^\circ$  向空间辐射并接收反射信号<sup>[1,2]</sup>。在介质中,反射波形成雷达剖面,通过发射体反射波的走时,以及振幅等信息进行分析,从而解释地下构造,判断其位置与几何形态等特征。

(2)跨孔透射测量工作比较复杂<sup>[11,12]</sup>,它的工作原理如下页图 2 所示。通过对边界处电磁波信号的测量,获取钻孔间介质物性参数的分布信息。具体方法是在二相邻钻孔分别布置发射天线和接收天线,发射天线是固定的,然后将接收天线沿着钻孔有规律地移动,每隔相应距离接收一次,可以

得到一系列的射线,并记为一次扫描。再移动发射天线,进行另一次扫描,直至覆盖整个研究区域。每条射线记录了电磁波振幅和走时等有用信息,反映射线方向岩层的平均物性参数。

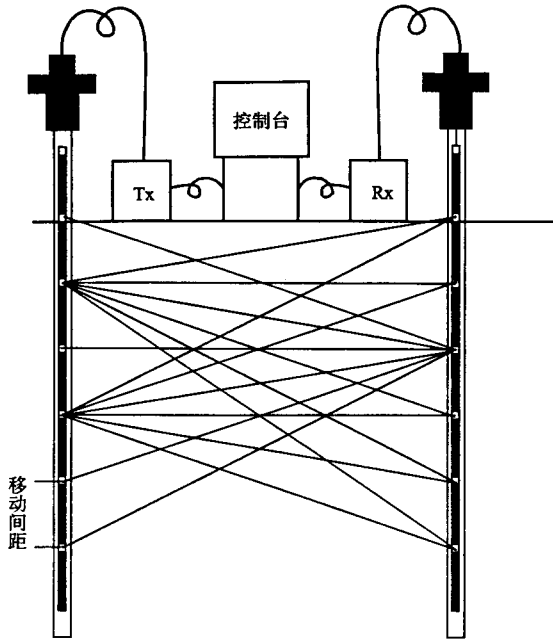


图2 跨孔透射测量工作原理示意图

Fig. 2 Diagram of cross hole transmission measurement principle

### 2.1 桥梁地基工程评价

使用瑞典 Mala RAMAC 钻孔雷达,在某油气田专用公路部份路段的桥梁地基工程中,进行了单孔和跨孔测量。

由于工作区属于干旱少雨地区,这对于电磁波传播应该是有利的工作条件。地层为第四纪晚更新世  $Q_3$ ,岩性为泥质砂岩。通过钻孔雷达的探测,需查明六个钻孔之间及其周围一定范围内,岩石特性、破碎和稳定性等情况,为该公路桥梁建设工程提供参考依据。

作者在此次工作中进行了六个孔的相互间跨孔测量,共十一组数据。还进行了 1#、2#、3#孔的单孔测量,共三组数据。鉴于篇幅限制,作者在本文中只对 6#~3#二孔间的跨孔和 3#孔的单孔测量进行解释研究。其中 6#孔深 22 m, 3#孔深 19 m, 孔间距 4 m, 二孔标高一样,均有  $\phi 75$  的 PVC 套管,钻孔位置分布如图 3 所示。

### 2.2 采集试验和数据处理

本次单孔反射和跨孔透射测量均采用雷达天线频率为 100 MHz,采样频率根据天线频率而自动确定。为了了解工作区岩石特性情况,确定具体工

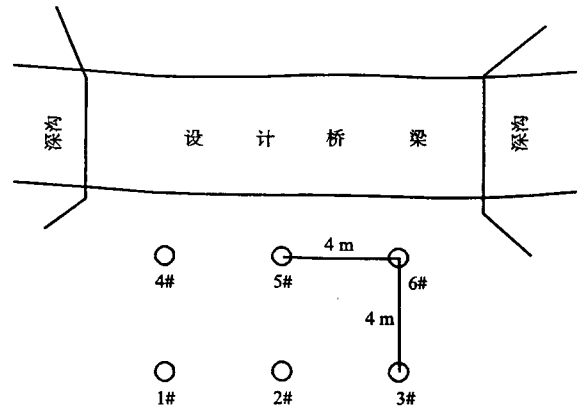


图3 钻孔位置分布图

Fig. 3 Drilling position distribution

作参数,我们先进行了二孔间的试验对比。以 6#孔为固定孔,3#孔为移动孔,分别以移动间距 1 m 和 0.5 m 进行二孔的二次完整测量。采集射线分别为 440 条和 858 条。

对二组原始数据做滤波和去除噪声处理,增强有效信息,压制杂乱回波,提高图像的信噪比和分辨率等。同时,将扫描序列和钻孔资料通过软件录入计算机,建立钻孔、射线和振幅(走时)间的内在联系。

对直达波进行拾取,剔除坏道。选定天线偏移距和其它层析成像所需要的参数,采用计算机进行图像余值和射线检查。在数据质量正确的前提下,进行数据自动反演,并用插值法对像元参数作圆滑,最后得到的孔间雷达速度层析成像见下页图 4 和下页图 5 所示。

为了对测量结果进行更好地解释,利用几个钻孔的取样进行试验,得到岩石的介电常数与含泥量曲线关系<sup>[14]</sup>,如图 6(见下页)所示。

从图 6 可以看出,在含水量相同的情况下,岩石的介电常数随泥质含量增加而增大。

### 2.3 测量结果解释

通过二组数据处理对比可知,在图 5 和图 6 中,高速区和低速区分布范围大致相同,整体规律基本一致。考虑到工作效率,整个工作区的跨孔测量均采用 1 m 的移动间距。

在图 5 中,从上至下大部份为高速 A 区和 B 区,二区之间基本贯通,尤其在二孔之间下半部份,高速区域更加明显。由前面论述的电磁波传播特性,可知该区岩层完整性良好。在靠近 6#孔的 4 m ~ 11 m 之间的边缘地带,有少部份低速 C 区,根据工程地质资料,该处泥质岩成份增多。泥质含量影响介电常数,进而影响电磁波速度,因此在图像中

呈现高吸收系数的低速异常。此外,低速D区存在于高速B区中间,但由于B区整体性强,D区岩层和周围岩层存在少量差异所致,也有可能是少量破碎引起。由于二孔顶和底处由于边界效应,导致射线不够密,故不予考虑。

3#孔的单孔反射测量雷达图像如图7(见下页)所示,由于单孔反射是360°全方位发射和接收,尽管不能确定发射体的方向,但能确定其距离钻孔的距离。从图7可以看出,3#孔周围没有明显的裂隙和反射体。

综上所述,再根据样品试验、电磁波性质等描述,可以对6#和3#孔之间的岩层进行综合判断,其地质情况总体良好,没有大的裂隙、破碎存在。考虑到其它各组测量数据情况,在该处进行桥梁地基工程建设是可行的。

### 3 结论与问题

根据地质情况不同,钻孔雷达径向探测距离也不同。在某些电磁波强吸收性,相对介电常数大的岩石地区,其探测距离短,有一定的局限性。但总

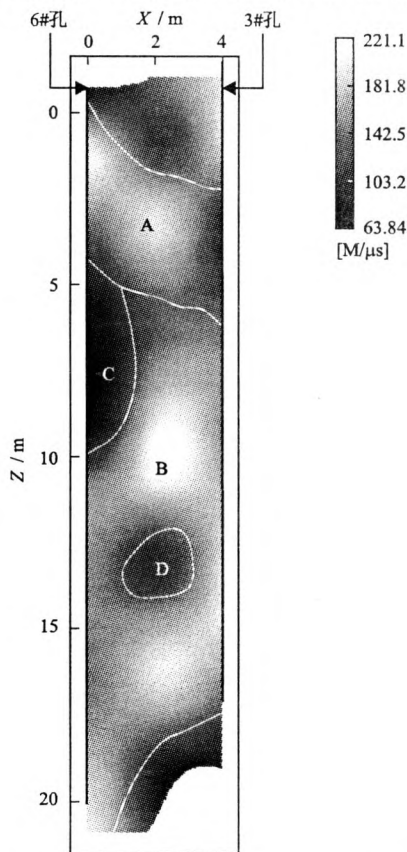


图4 6#~3#孔间雷达速度层析成像(移动间距1 m)  
Fig.4 Image of rader tomography Between Boreholes Pen #6 and Pen #3(mobile space 1 meter)

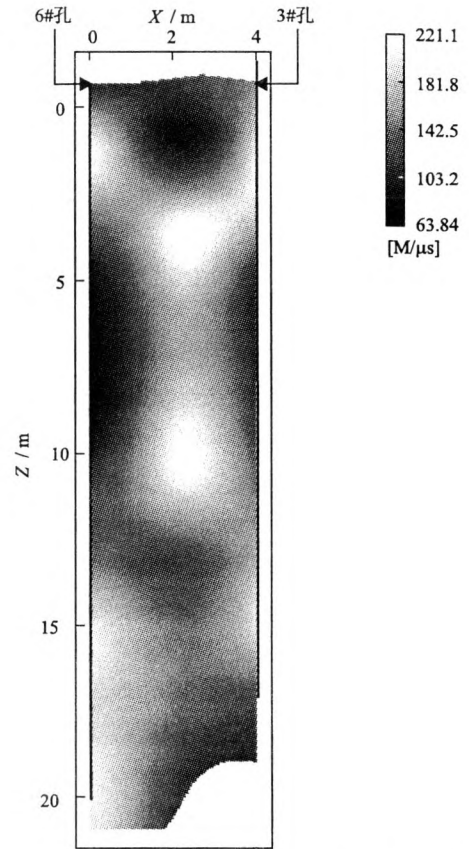


图5 6#~3#孔间雷达速度层析成像(移动间距0.5 m)  
Fig.5 Image of radar tomography between boreholes Pen #6 and Pen #3(mobile space 0.5meter)

体来说,它是地下深部工程不可缺少和有效的探测手段。在实际工作中,应加强电阻率CT、弹性波CT等综合应用,同时再结合传统技术,以达到提高探测水平的目的。

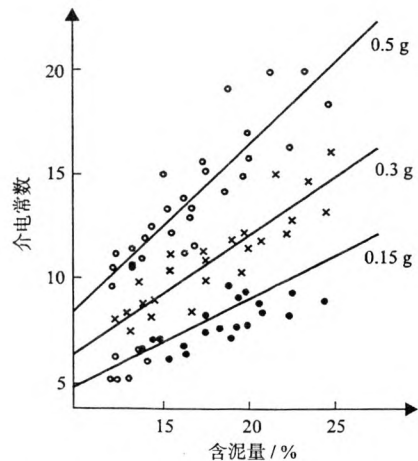


图6 岩石介电常数与含泥量关系曲线  
Fig.6 Relationship curves between rock dielectric constant and hydraulic

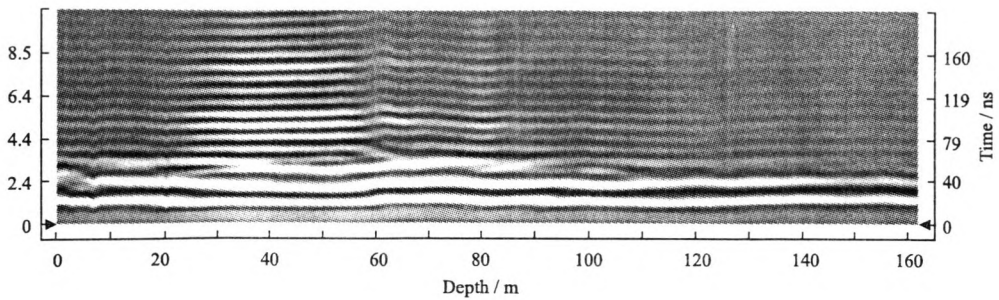


图7 3#孔单孔反射雷达图像

Fig.7 Image of radar single - borehole reflection of 3#

虽然单孔反射测量能确定反射体与钻孔的距离和夹角,但它的定位需要多个钻孔的联合测量。在今后,单孔雷达的定向性和异常趋向性,仍是值得研究的方向。随着科学技术的发展,单孔雷达的系统设计和资料的后处理技术将会有所突破。

#### 参考文献:

- [1] 宋雷,黄家会. 钻孔地质雷达工作原理及应用[J]. 物探与化探,1999,23(6):454.
- [2] 刘四新,曾昭发,徐波. 利用钻孔雷达探测地下含水裂缝[J]. 地球物理学进展,2006,21(2):620.
- [3] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [4] 高文利,马兰,罗德建. JW-5型地下电磁波探测系统设计[J]. 物探化探计算技术,2005,27(3):223.
- [5] 罗德建,高文利,郝忠友. 大透距电磁波CT在电站坝基勘察中的应用[J]. 物探化探计算技术,2007,29(增刊):157.
- [6] 李大心. 高频电磁波法在岩溶发育区土体滑坡调查中的应用[J]. 地质灾害与环境保护,2000,11(2):154.
- [7] 顾孝同. 国内工程CT技术的发展与应用[J]. 工程地球物理学报,2006,3(4):278.
- [8] 吴丰收,曾昭发,王德库,等. 沥青墙压实度的探地雷达探测研究[J]. 地球物理学进展,2009,24(2):742.
- [9] 岳崇旺,王祝文,徐加益. 电磁波层析技术在工程地质中的应用[J]. 物探与化探,2008,32(2):216.
- [10] 杜兴忠,曹俊兴. 电磁波层析成像在岩溶勘察中的应用研究[J]. 工程物理学报,2008,5(5):524.
- [11] 谭捍华,黄家会,罗强,等. 甚高频电磁波多参数层析成像技术及其应用研究[J]. 岩土力学,2008,29(12):3307.
- [12] DALE F. Rucker. Automated water content reconstruction of zero - offset borehole ground penetrating radar data using simulated annealing[J]. Hydrology,2005,309:1.
- [13] ERWAN GLOAGUEN, DENIS MARCOTTE, MICHEL CHOUTEAU et al. Borehole radar velocity inversion using cokriging and cosimulation[J]. Geophysics,2005,57:242.
- [14] 李剑浩. 混合物电导率和介电常数的研究[J]. 地球物理学报,1996,39(增刊):364.

作者简介:焦彦杰(1978-),男,学士学位,工程师,主要从事物探、地质方面的工作。