

混凝土雷达检测新技术及应用

王正成^{1, 2}

(1、中国地质大学(北京) 地下信息探测与仪器实验室, 北京 100083 2、欧美大地仪器设备中国有限公司, 北京 100062)

摘要: 着重介绍无损混凝土雷达对建筑结构检测的新技术, 从雷达原理入手, 详细说明其成像原理, 分辨率和波形特征分析方法。通过对建筑结构无损检测的应用实例, 说明雷达检测技术的先进性和实用性。

关键词: 混凝土雷达, 无损, 电磁技术, 分辨率, 反射系数

中图分类号: TU398 **文献标识码:** A **文章编号:**

Testing New Technology and Application of Concrete Radar

Wang ZhengCheng

(1.China University of Geoscience, Beijing 100083, China 2.Earth Products China Limited, 100062,China)

Abstract: This paper introduces the advanced technology of nondestructive concrete radar for testing quality of construction engineering. It shows resolution and method of wave feature based on the principle of imaging and illustrates advantages and applications of the new testing technology through the practical projects in detail.

Key Words: Concrete radar, Nondestructive, Electromagnetic technology, Resolution, Reflect factor.

1 前言

混凝土雷达基本上是从探地雷达发展过来的, 其检测原理, 仪器, 数据处理等方式都与探地雷达极其相似, 也可以说是探地雷达在结构混凝土检测方面的拓展与延伸。结构混凝土相对土层来说, 成份单一, 结构致密, 含水量低, 适于电磁波的传播。混凝土雷达检测具有检测速度快, 分辨率高, 单面检测, 操作简便等优点, 适用于大面积和小截面构件的快速质量检查。

2 工作原理

混凝土雷达是利用电磁技术对地下或混凝土内不可见的目标和界面进行定位的无损检测设备。雷达系统通常由主机、天线、电源三部分组成, 其中天线又包括发射机和接收机两部分, 通常发射机和接收机以固定距离固定在屏蔽的天线盒内。混凝土雷达工作时, 发射机向混凝土内或地下发射高频带脉冲电磁波, 经存在电性差异的界面或目标体反射后返回测量表面并由接收机接收。电磁波在介质中传播时, 其路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的电性质和几何形态而变化, 对接收的信号进行分析处理, 可判断混凝土的钢筋、层厚和缺陷位置。根据发射信号与接收信号的 Δt (双程走时) 以及电磁波在混凝土中的传播速度 v , 可以计算出目标物所处的深度 D 。

$$D=1/2v \times \Delta t \quad (1)$$

根据检测目标物深度和精度的不同, 可选用不同频率的天线进行检测。根据雷达原理, 天线中心频率越高, 测深越浅, 分辨率越高; 反之, 天线中心频率越低, 测深越大, 分辨率越低。例如, 当对楼板, 暗墙内钢筋位置, 间距及构件厚度进行检测时, 可选用 1000MHz---2000MHz 天线; 当对底板下暗梁位置, 填充物分层厚度进行检测时, 通常采用 500Mhz---1000MHz 天线; 当对更深的大体积混凝土质量检测时, 可选用 100MHz---500MHz

作者简介: 王正成 (1977—), 男, 中国地质大学(北京) 研究生, 主要从事无损检测和工程物探工作

天线。表 1 列出了经常使用的天线的测深及主要应用。

表 1 不同频率天线测深及应用范围

| 天线中心频率 (Mhz) | 可达深度 (m) | 参考穿透深度 (m) | 主要应用范围 |
|-----------------|-------------|---------------|--|
| 200 | 1—6 | 3.5m | 暗梁、柱位置，大体积混凝土分层，地基夯填分层及墙体剥离界面，混凝土内部缺陷等 |
| 500 | 1—4.5 | 2 | 暗梁、柱位置，大体积混凝土分层，地基夯填分层及墙体剥离界面，混凝土内部缺陷等 |
| 1200 | 0.3—1 | 0.8 | 钢筋位置、间距，楼板、墙、柱的厚度，空心砖填筑质量，混凝土内部缺陷等 |
| 1600 | 0.2—0.7 | 0.6 | 钢筋位置、间距，楼板、墙、柱的厚度，空心砖填筑质量，装饰层厚度，混凝土内部缺陷等 |
| 2000 | 0.1—0.5 | 0.3 | 钢筋位置、间距，楼板、墙、柱的厚度，空心砖填筑质量，装饰层厚度，混凝土内部缺陷等 |

3 探地雷达的分辨率

探地雷达的分辨率是分辨最小异常的能力，可分为垂向分辨率与横向分辨率。垂向分辨率是指在雷达剖面中能够区分一个以上反射界面的能力。理论上可以把雷达天线主频波长的 1/8 作为垂直分辨率的极限，但考虑到外界干扰等因素，一般把波长的 1/4 作为其下限。当地层厚度超过 $\lambda/4$ 时，复合反射波形的第一波谷与最后一个波峰的时间差正比于地层厚度。地层厚度可以通过测量顶面反射的初至和底界反射波的初至之间的时间差确定出来。横向分辨率是指探地雷达在水平方向上能分辨的最小异常体的尺寸。其中横向分辨率又包含目标体本身的最小水平尺寸和两个有限目标体的最小间距。雷达的横向分辨率可以用 Fresnel 带加以说明，假设地下有一水平反射层面，已发射天线为中心，以到层面的垂距为半径，作一圆弧和反射层面相切。此圆弧代表雷达波到达该层面的波前，再以多出 1/4 和 1/2 子波长度的半径画弧，在水平反射层面的平面上得出两个圆。其中内圆称为第一 Fresnel 带，两圆之间的环带称作第二 Fresnel 带，同理还可以有第三带、第四带等。根据干涉原理，除第一带外，其余各带对反射的贡献不大，可以不予考虑。当反射层面的深度为 D ，发射和接收天线间距远小于 D 时，第一 Fresnel 带的直径 d_F 可以按(2)式计算。

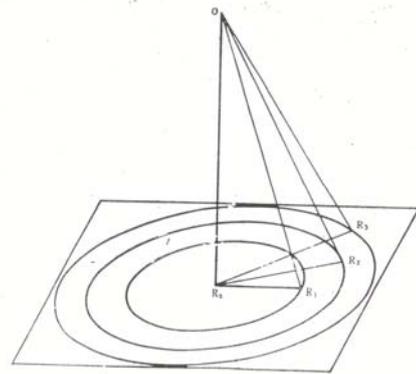


图 1 Fresnel 带示意图

$$d_F = 2\sqrt{(D + \frac{\lambda}{4})^2 - D^2} = 2\sqrt{\frac{1}{2}\lambda D + \frac{1}{16}\lambda^2} = \sqrt{2\lambda D + \frac{1}{4}\lambda^2} \approx \sqrt{2\lambda D} \quad (2)$$

其中 λ 为波长， D 为反射层面深度。Fresnel 带的出现使中断的目标体的边界模糊不清，它和绕射现象一致。因此，雷达图上目标体的尺寸都大于它的实际大小。我们可以得出结论，探地雷达的水平分辨率高于 Fresnel 带直径的 1/4，两个目标体之间的最小间距大于 Fresnel 带时才能把两个目标体区分开。

4 数据解释基础和检测技巧

4.1 反射系数 R 和折射系数 T

电磁波在不同介质的分界面上，由于不连续效应，会产生发射和折射现象。当电磁波垂直入射混凝土结构时，其反射和折射系数为：

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} - \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} + \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}} \approx \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (3)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}}{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} + \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}} \approx \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (4)$$

R：界面的电磁波反射系数；**T**：界面的电磁波折射系数； $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ：分别为第一层和第二层介质的相对介电常数； μ_1, μ_2 ：分别为第一层和第二层介质的磁导率，约等于1；当 $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$

时，**R** 为正值；当 $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ 时，**R** 为负值。**R** 的正、负差别意味着相位相反（即相位变化 π ）。

从反射系数公式可以得出两个结论：

- 1) 界面两侧介质的电性质差异越大，反射波信号越强。
- 2) 电磁波从介电常数小入射到介电常数大的介质时，即从高速介质进入到低速介质，反射系数为负，相位变化 π ，即反射振幅反向。反之，从介电常数大入射到介电常数小的介质时，反射系数为正，反射波振幅与入射波同向。

如果从空气（ $\varepsilon_{\text{空}} = 1$ ）入射到混凝土（ $\varepsilon_{\text{砼}} \approx 6 \sim 10$ ）时，混凝土反射振幅反向，折射波不反向。从混凝土后边的脱空区在反射回来时，反射波不反向，因此脱空区的反射方向与混凝土表面的反射方向正好相反。

如果混凝土后面充满水（ $\varepsilon_{\text{水}} = 81$ ），电磁波在该界面的反射也将发生反向，与表面反射波同向，而且反射振幅较大。

如果是混凝土中的金属物体。例如钢筋（ $\varepsilon_{\text{钢筋}} = \infty$ ），反射波反向，而且反射振幅特别强。

4. 2 反射波同向轴形态特征

在雷达数据记录资料中，根据相邻道上反射波的对比，把不同道上同一连续界面反射波相同相位连接起来的对比线称为同向轴。同向轴的时间、形态、强弱、方向正反等特征是数据解释最重要的基础，而反射波组的同向性与相似性也为反射层面的追踪提供依据。同向轴的形态与探测目标物的形态并非完全一致，由于边缘反射效应的存在，使得目标物波形的边缘形态有很大差异。对于孤立的目标体，其反射波的同向轴为开口向下的抛物线，有限平板界面反射的同向轴中部为平板，两端为半支开口向下的抛物线。

4. 3 反射波的频谱特性

不同介质有不同的结构特征，内部反射波的高、低频率特征也明显不同，这可作为区分不同物质界面的依据。例如，混凝土与地基相比，介质比较均匀，没有地基构造复杂，因此，混凝土内部反射波较少，只是在有缺陷的地方有反射，而地基中反射波明显，特别是高频波较为丰富。如果地基中含水较多，反射信号会出现低频高振幅的反射特征，易于识别。

4. 4 检测技巧

检测过程中要尽量保持天线平稳匀速前进，测线及其间距可根据工程需要合理布置，一般纵横两个方向都要布置。检测过程应尽量避免下面情况发生。1、天线不接触检测面，这

样会导致数据图像的质量下降，分辨率和测深会降低。2、在时间模式下不断改变检测速度，这会使目标物的图像扭曲变形，增大分析难度。3、在覆盖有金属或类似装置的检测面上进行数据采集，金属反射信号强烈，会在图像上产生竖直条纹。

5 工程实例

5.1 地下停车场基础拉梁检测

深圳某小区居民楼完工之后，有人反映施工单位擅自取消了地下停车场的基础拉梁，因为有地下室底板覆盖，所以传统检测方法不能判断基础拉梁是否存在。如果采用钻孔取芯的方法，不仅对结构破损严重，而且时间长，工作量大，因此不宜采用。当我们使用 500MHz 的混凝土雷达对其进行检测时，则取得十分满意的效果，现场即可判明。雷达检测具有数据采集速度快，处理简单，结果直观等优点。图 2 左侧和右侧的抛物线分别是两根拉梁反射的雷达剖面图，深度大概在 0.6 米，如下所示。

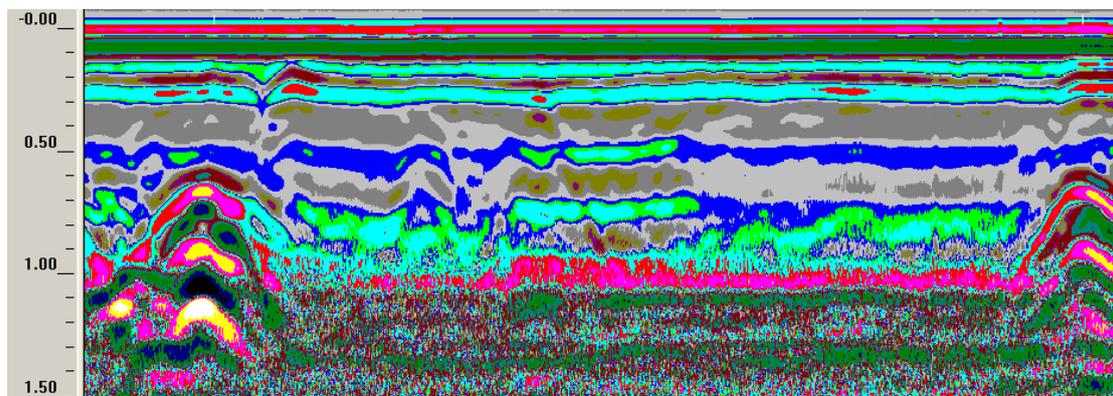


图 2 拉梁雷达剖面图

5.2 楼板厚度及钢筋检测

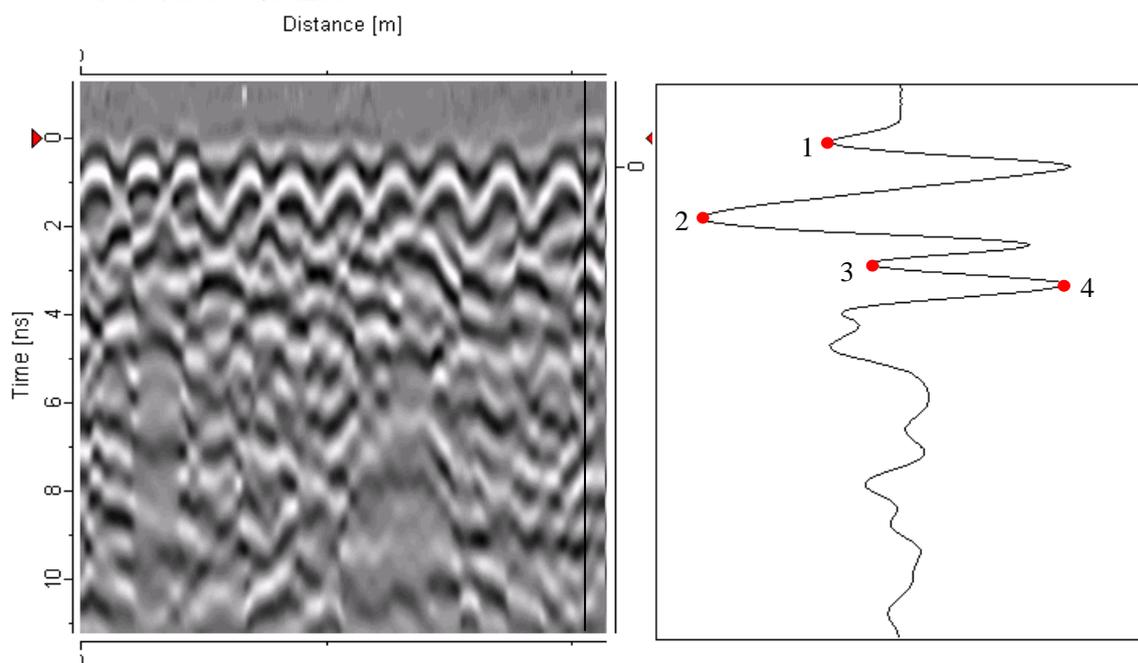


图 3 雷达截面图和波形图

图 3 是检测某楼板的雷达数据，左侧是经过处理的雷达截面图，右侧是截面图黑线位置的单道波形图。根据左侧雷达截面图能够非常肯定的找出第一排钢筋，且可以判定有第二排钢筋，但因为受第一排钢筋影响，其位置较难读取。为了得到第二排钢筋深度和楼板厚度，

有必要结合右侧的波形图进行分析。根据前面讲到的反射系数分析方法，1处为楼板面的反射位置（采样点:36,深度: 0m），2处为第一排钢筋的反射位置，其深度为（采样点数: 87, 深度 0.09m），因为波形不是位于第一排钢筋正上方，所以其值偏大，将黑线移到第一排钢筋抛物线顶点位置，从对应的波形上即可得到实际值为（采样点数: 64, 深度 0.04m），3处为第二排钢筋的反射位置（采样点数: 118, 深度:0.15m），4处为楼板底面的反射位置（采样点数: 131, 深度: 0.17m）。由此可见，波形特征分析是雷达数据解释的根本方法和重要手段。

6 结束语

混凝土雷达具有数据采集快，分辨率高，操作简单，结果直观等优点，其应用范围包括定位钢筋位置及间距，测量楼板结构层及装饰层厚度，空心砖填筑质量，古建筑墙体剥离层，暗梁的位置等。虽然混凝土雷达的应用十分广泛，但是在解决钢筋直径，裂缝深度，密集钢筋定位等问题上还存在相当大的难度。我们应该公正合理的看待混凝土雷达的功能，既不能夸大，也不能说的一无是处，在工程检测中最好和其他设备配合使用，相互校验，采用综合的方法进行判断和分析。

参考文献

- [1] 李大心，探地雷达方法与应用，北京：地质出版社，1994
- [2] Philip Kearey, Michael Brooks, Lan Hill, An Introduction to Geophysical Exploration, 2002
- [3] 王正成，王新泉，第七届全国建筑物鉴定与加固改造学术论文集上册 P139，重庆：重庆出版社，2004
- [4] 吴新璇，混凝土无损检测技术手册，北京：人民交通出版社，2003

联系人：王正成

电话：13801316290