

文章编号:1005-0523(2000)04-0024-05

探地雷达在城市道路厚度检测中的研究与应用

徐升才¹, 刘峰²

(1. 南昌市建设工程质量监督站; 2. 江西省交通科学技术研究所, 江西 南昌 330008)

摘要: 本文着重阐述了高频电磁波在路面结构层中的传播机制, 介质的介电常数、相位系数、吸收系数对探地雷达检测的影响, 以及探地雷达检测路面结构层厚度的过程¹⁹。通过应用实例说明探地雷达用于路面厚度检测, 可取得连续、快速、准确、无损的高精度检测结果¹⁹。

关键词: 探地雷达; 电磁波; 道路; 检测

中图分类号: F840.67

文献标识码: A

0 引言

多年来, 我省道路路面厚度的检测, 一直沿用机械钻孔取芯法和挖坑法, 这种方法既破坏路面结构层, 检测数据又不能全面地评价路面的厚度¹⁹。随着高频微电子技术及计算机数据处理方法的迅速发展, 探地雷达技术有了突破性的发展, 尤其是公路专用型探地雷达以其体积小、频带宽(天线频带宽度可达 0.2 GHz~6.0 GHz)、中心频率高、检测精度高、车载等特点, 在路面厚度检测中得到了广泛应用¹⁹。

1 探地雷达基本原理

探地雷达实现路面厚度探测的基本原理是电磁波在介质中的传播理论¹⁹。探地雷达向地下以脉冲形式发射电磁波, 电磁波在均匀各向同性介质中以电场和磁场相互交替变化的方式, 并以一定的速度, 由近及远传播¹⁹。当电磁波在传播过程中遇到不同介质时, 在介质交界面上就会产生反射、透射(见图 1、图 2), 探地雷达就是通过接收返回地面的反射波来探测路面结构层厚度的¹⁹。

1.1 波的传播

电磁波的发射、传播、反射、折射和绕射是由麦克斯韦方程组确定

$$\nabla \times E = -i\omega H \quad (1)$$

$$\nabla \times H = i\omega \epsilon E + J \quad (2)$$

$$\nabla \cdot E = i \frac{\rho}{\epsilon} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (4)$$

收稿日期:2000-09-01; 修订日期:2000-09-18

中国知网 <https://www.cnki.net>

作者简介:徐升才(1944-),男,江西南昌人,南昌市建设工程质量监督站高级工程师¹⁹。

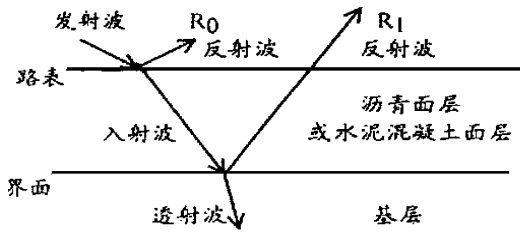


图1 电磁波在路面剖面中各界面的反射

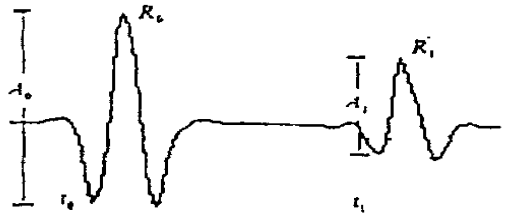


图2 电磁波在路面剖面中各界面的扫描

考虑到探地雷达天线为偶极子天线,设电磁场随时间正弦规律变化,时间因子为 $e^{i\omega t}$,根据偶极子源的麦克斯韦方程组在球坐标系中可解得电磁场如下

$$H \Phi = \frac{IdL}{4\pi} ike^{ike} \left[1 + \frac{1}{ikr} \right] \sin \theta \quad (5)$$

$$E_r = \frac{IdL}{4\pi} i\omega e^{ikr} \left[\frac{1}{ikr} + \left(\frac{1}{ikr} \right)^2 \right] \cos \theta \quad (6)$$

$$E_\theta = \frac{IdL}{4\pi} i\omega e^{ikr} \left[1 + \frac{1}{ikr} + \left(\frac{1}{ikr} \right)^2 \right] \sin \theta \quad (7)$$

天线理论中,为研究问题的方便起见,常将无源区划分为3个区域,即近场区、中间区和远场区^[19]。 kr 的绝对值作为近场区或远场区的一个衡量标准,把 $kr \gg 1$ 的区域称为天线辐射的远场区,简称远区^[19]。

1.2 介质的介电常数

介电常数反映了处于电场中的介质存储电荷的能力^[19]。表1为常见介质的相对介电常数^[19]。电磁波在两种不同介质的界面产生反射,反射系数为 $r = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1}$,由于探地雷达是接收反射波的信息来探测道路各结构层,而反射信号的强弱取决于介电常数的差异,因此,介电常数的差异是探地雷达应用于道路探测的先决条件^[19]。

表1 常见介质的相对介电常数

介质类型	相对介电常数	介质类型	相对介电常数
空气	1	花岗岩	4-7
沥青	3-5	砂岩	6
混凝土	4-11(5)	页岩	5-15
纯水冰	4	石灰岩	4-18
雪	1-2	玄武岩	8-9
PVC 材料	3	土壤和沉积物	4-30

1.3 介质的吸收系数和相位系数

复波数 k 又可表示为: $k = \alpha + i\beta$ 。由此,球面波因子 $\frac{e^{ikr}}{r} = \frac{e^{i\alpha - \beta}}{r} = \frac{1}{r} e^{i\alpha} e^{-\beta}$,可见,电磁波在无限均匀各向同性有耗介质中传播时,相位为 α ,故 α 称为相位系统;振幅除以 $\frac{1}{r}$ 的形式随距离衰减外,还以 β 的形式呈指数衰减,故 β 称为电磁波在有耗介质中传播的吸收系数^[13]。

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon \epsilon'} \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon \epsilon'} \right)^2 + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (8)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon \epsilon'} \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon \epsilon'} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (9)$$

相应地,可得到有耗介质中波长 λ 和波速 v_e :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\alpha} = \frac{1}{f \sqrt{\mu \epsilon \epsilon'} \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon \epsilon'} \right)^2 + 1 \right] \right\}^{1/2}} \quad (10)$$

$$v_e = \lambda f = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon \epsilon'} \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon \epsilon'} \right)^2 + 1 \right] \right\}^{1/2}} \quad (11)$$

由以上可以看出:电磁波在无限均匀各向同性耗介质中传播,不仅发生了振幅的衰减,而且波长缩短、波速变小¹⁹。在路面厚度检测中,雷达天线的中心频率的一般为 900 MHz、2.5 GHz,满足电磁波传播的远区行为¹⁹。

1.4 电磁波速度的确定

1) 利用反射系数求得

通过探地雷达反射曲线可以求得反系数,利用反射系数再求得该介面的介电常数,利用介电常数再求得该介质的电磁波波速,根据试验证明,此方法具有一定的误差,实用性差¹⁹。

2) 利用钻孔取芯标定电磁波波速

此方法较为成熟、实用¹⁹。在探地雷达所测剖面上的某一点,钻孔取芯,量其实际厚度值¹⁹。用剖面上该点的双程走进和实际厚度这两个参数,即可标定电磁波在该标定层内的传播速度¹⁹。

2 探地雷达检测路面厚度的过程

2.1 天线的选择

一般的探地雷达都拥有多种频率的天线,应用于路面厚度检测时,通常使用两种不同频率的天线:一种为 2.5 GHz 喇叭型空气耦合天线,它以喇叭型定向集中能量,向地下以脉冲形式发射电磁波¹⁹。因其频率高,分辨率也高,常用于沥青混凝土路面面层厚度检测¹⁹。另一种为 900 MHz 地面耦合天线,发射以量大,穿透深度深,适用于检测水泥砼路面面层厚度¹⁹。

2.2 取样密度的确定

沿路线的长度取样:根据要求,可以每 1 cm 取一个样,也可以每 10 cm、20 cm、50 cm、100 cm、...取一个样¹⁹。根据经验,通常取得 10 cm 一个样点,采集的资料非常精细¹⁹。

2.3 记录时间 R 的确定

时间大小的选择主要取决于被探测路面面层最大厚度与电磁波传播速度 v ,通常采用 $R = 5d/v$ (d 为面层设计厚度值) 进行估算¹⁹。例如:某沥青路面面层厚度设计值为 12 cm,通常电磁波在沥青砼中的传播速度为 $v = 10$ cm/ns,则记录时间 $R = 6$ ns,每个扫描的记录长度为 512

个样点,即每纳秒取 85.33 个样点,相当于 0.117 cm 取一个样点¹⁹。

2.4 电磁波波速的标定

在路面上任选一长 100 m 的路段,按 5 m 为间距在路面上做好标记,设置好各采样参数,开动汽车进行数据采集,当天线中心经过标记时,利用遥控器在记录数据上做标记¹⁹。然后采用钻孔取芯设备在路面标记上钻取两个芯样,量取厚度值¹⁹通过对记录数据进行处理、分析,计算出取芯点处的电磁波传播时间,进而计算出电磁波的传播速度¹⁹。

2.5 现场检测

根据不同检测对象,选择探地雷达不同参数,然后以每小时 15~20 km 的速度开动汽车,以探地雷达专用测程轮控制距离,由计算机控制的设备不停地发射、接收电磁波,通过计算机对接收信息进行实时数字处理,显示在显示器上并将采集的数据存入磁介质(硬盘、磁带)中,将存储的文件室内计算机中,再根据不同检测对象,对所存储的文件进行后处理,得到不同的检测结果¹⁹。

2.6 数据处理

在数据采集过程中,为了保存更多的反射波特征,通常利用宽频带进行纪录,因此在记录各种有效信号的同时,也记录了各种干扰信号,通过对信号进行滤波、反褶积,增益等处理,来压制干扰信号,突出有用信号,然后利用校平软件对道路表面的信号进行校平,根据标定得到的电磁波传播速度,利用层追踪软件进行计算机自动追踪¹⁹。

3 应用实例

3.1 沥青混凝土路面面层厚度检测

某沥青混凝土路面结构为:12 cm 沥青混凝土面层、20 cm 水泥粉煤灰基层 15 cm 天然砂砾基层,图 3 是利用 SIR-10H 型探地雷达、2.5 GHz 空气耦合开线检测面层厚成果,从图中可以看出,沥青混凝土面层与水泥粉煤灰基层分界面很明显¹⁹。引夏面经现场钻取 3 个芯样验证,厚度检测平均主差为 0.13 cm,图 4 为该路面的厚度解释曲线¹⁹。

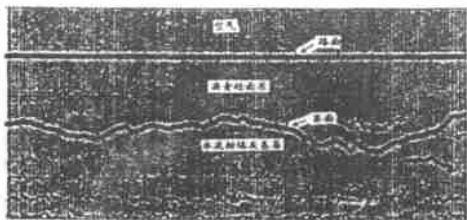


图3 某沥青砼路面面层厚度检测结果

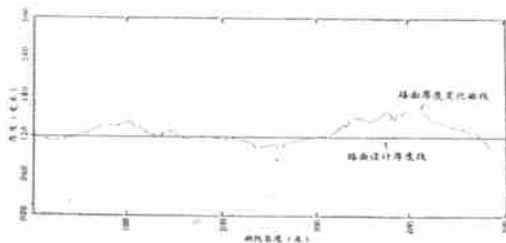


图4 图3厚度解释曲线

3.2 水泥混凝土路面面层厚度检测

某水泥混凝土路面结构为:24 cm 沥青混凝土面层、30 cm 水稳基层,图 5 是利用 SIR 型探地雷达,900 MHz 地面耦合天线检测面层厚成果,从图中可看出,水泥混凝土面层与水稳基层分界面很明显¹⁹。

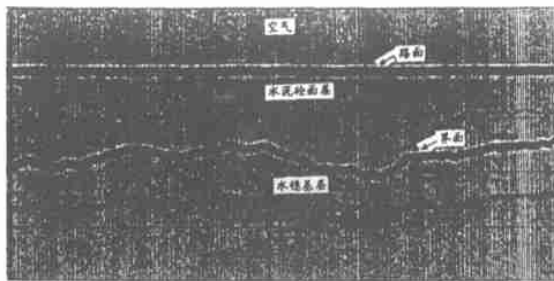


图 5 某水泥混凝土路面面层厚度检测结果

4 结论

由以上讨论可知,应用探地雷达检测沥青混凝土、水泥混凝土路面面层厚度,可取连续、快速、准确、无损的高精度检测结果¹⁹。

[参 考 文 献]

- [1] 张秋光·场论[M]·北京:地质出版社 19.1985 19.
- [2] 李大心·探地雷达方法与应用[M]·北京:地质出版社 19.1994 19.
- [3] 戴前伟·地质雷达的应用条件探讨[J]·物探与化探,2000,(1) 19.

The Research and Application of GPR to Detect Thickness in City Road

XU Sheng-cai¹, Liu Feng²

(¹.Nanchang Quality Supervision Station of construction project;².Jiangxi Research Institute of Traffic Science and Technology, Nanchang 330008, China)

Abstract: In this paper, some factors which affect GPR detection such as the propagating of high-frequency electromagnetic wave in the road, medium permittivity, phasic constant and absorption constant are presented. The procedure of GPR to detect road thickness is given. It has been proved that continuous, fast, precise, nondestructive results can be obtained by applying GPR.

Key words: GPR; electromagnetic wave; road; detection