

# 基于雷达信号特征点提取的结构物埋深估算方法

高永涛<sup>1)</sup>, 徐俊<sup>1)</sup>✉, 王艳辉<sup>2)</sup>, 张院生<sup>1)</sup>, 谢健阳<sup>1)</sup>

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 北京交通大学交通运输学院, 北京 100044  
✉ 通信作者, E-mail: atxujun@163.com

**摘要** 为了克服经验法推算结构物埋深的缺陷, 基于检测对象的雷达反射波形特征, 通过提取反射波形上的少量特征点, 提出一种估算结构物埋深的新方法, 并考虑实际检测中结构物反射波形的畸变, 对估算精度进行分析评价。结果表明: 对于理想的无畸变检测数据, 该方法对结构物埋深、水平位置及电磁波速的估算结果较为精确; 当反射波形存在畸变时, 该方法对埋深的直接估算结果误差较大, 平均误差达到 55.202%, 但对于电磁波速的估算结果较为精确; 对于实测的有畸变检测数据, 可通过电磁波速估算结果及测得的目标体双程旅时对埋深进行间接估算, 估算精度满足雷达法检测对埋深估算的要求。相比经验法, 该方法在估算精度、误差控制方面具有显著优势。

**关键词** 地质雷达; 埋深估算; 反射波形; 数值计算; 畸变

**分类号** U456; P225

## Depth estimation of buried structures based on the GPR reflected waveform characteristics

GAO Yong-tao<sup>1)</sup>, XU Jun<sup>1)</sup>✉, WANG Yan-hui<sup>2)</sup>, ZHANG Yuan-sheng<sup>1)</sup>, XIE Jian-yang<sup>1)</sup>

1) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
2) School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China  
✉ Corresponding author, E-mail: atxujun@163.com

**ABSTRACT** To overcome the defects of the depth estimation of buried structures by the empirical method, a new method to estimate the depth based on the reflected waveform characteristics of buried targets was put forward by extracting few points from the reflected waveform. Accuracy analysis was performed in consideration of waveform distortion. The results show that on ideal undistorted ground penetrating radar (GPR) data, the proposed method is accurate in estimating the depth and the horizontal position of buried targets, as well as the electromagnetic wave speed. An average error of 55.202% occurs in depth estimation based on distorted waveform data even though the estimation result of wave speed is accurate as before. So the method is corrected to confirm the depth of buried targets using the estimated wave speed and the two-way travel time of the reflected wave from the structures when facing distorted GPR data, and the accuracy of estimation satisfies the requirements of the GPR method. This method is more satisfactory and robust compared with the empirical method.

**KEY WORDS** ground penetrating radar (GPR) systems; depth estimation; reflected waveforms; numerical calculation; distortion

地质雷达在岩土工程探测中的应用日趋广泛, 特别是在公路面层厚度检测、隧道衬砌检测等隐蔽性较强而又不适合进行大范围破损的检测项目时, 借助地质雷达无损检测的优势通常可以快速便捷地得到检测

结果<sup>[1-2]</sup>。在使用地质雷达进行岩土工程检测时往往需要测定结构物的埋深, 目标体埋深可根据电磁波传播速度或介质相对介电常数结合目标体反射信号双程旅时来计算得到。但实际岩土工程中的介质多为混合

杂乱介质,难以准确测定电磁波速或介质等效的相对介电常数<sup>[3]</sup>。因此目前在实际检测操作中通常采用经验法估计电磁波传播速度然后推算结构物理深,如对于隧道衬砌等钢筋混凝土结构,干混凝土介质的电磁波速范围为 $0.047 \sim 0.15 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$ ,通常取电磁波速 $v = 0.1 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$ <sup>[4]</sup>。

经验法对探测目标的埋深估算精度依赖于电磁波速的取值精度,而在面临成分复杂的结构物时通常难以较准确地估计电磁波传播速度,且对于影响电磁波传播的其他因素无法考虑,使得经验法得到的埋深估算结果往往不够精确。随着地质雷达应用范围不断拓宽,对使用雷达标定目标埋深的精度要求也越来越高<sup>[5-6]</sup>,因此在实际工程中需要探索及应用更为准确的后处理方法。对此国内外学者已经做了较多的研究工作,并提出诸多切实可行的实现方法<sup>[7-9]</sup>。宋雷等<sup>[10]</sup>结合模型实验和现场试验,对人工冻土的介电常数变化规律进行研究;孔令讲和周正欧<sup>[11]</sup>基于霍夫变换理论及边缘轮廓提取方法对波速直接进行估算;于景兰和王春和<sup>[12]</sup>通过金属板反射法,假设金属板为刚性反射边界,通过反射系数与反射波振幅正比关系进行波速估算;王新静等<sup>[13]</sup>采用 Levenberg-Marquardt 算法对雷达波形进行双曲线拟合,对不同含水条件下的土壤波速进行估算。这些研究工作对地质雷达技术的发展起到积极推动作用。

目前关于目标体埋深计算的研究基本以电磁波传播速度的确定为切入点,再通过近似公式对目标体埋深进行计算。其中一部分研究通过现场钻孔、设置金属板等方法对波速进行估算,另一部分研究主要依据反射波曲线的提取及拟合进行波速估算。上述各类方法往往会增加现场检测工作量,引入人为操作的误差且离散性过大,或者对于反射信号波形的提取及处理精度要求较高,且未考虑数据采集过程中波形畸变对估算结果的影响<sup>[14]</sup>。本文基于电磁波传播规律及地下结构物反射波形特征,提出基于雷达信号特征点提取的结构物理深计算方法并验证其计算精度;同时考虑实际检测中波形可能出现的畸变,分析在波形畸变时的埋深计算精度并据此对估算方法进行修正,以满足实际应用中的精度要求。

## 1 基于特征点提取的埋深估算原理

### 1.1 雷达波场属性

地质雷达是利用电磁场的波动特征进行目标探测的一种方法,高频率的电磁波通过宽带短脉冲形式触发脉冲,脉冲通过发射天线进入探测介质传播及反射,然后由接收天线接收反射脉冲并记录。当雷达波场随时间变化时,互耦电场和互耦磁场的变化关系用麦克斯韦方程组描述。在多数情况下,电场分量 $E$ 服从式

(1) 所表示的标量方程:

$$f(\beta, t) = Ae^{-j\left(\frac{\beta}{v} - \omega t\right) - \alpha\beta} \quad (1)$$

式中 $A$ 为信号峰值强度, $\beta$ 为波传播方向上的距离量, $v$ 为波速, $\omega$ 为正弦信号的角频率, $t$ 为传播时间, $\alpha$ 为衰减系数。

雷达波场属性中关键的参数是波速 $v$ 、衰减系数 $\alpha$ 和电磁阻抗 $Z$ 。对于固定介电常数、磁导率和电导率的简单介质,在正弦时谐信号的激励下,当激励频率 $f$ 高于转换频率 $f_1$ 时,波场中电流从传导电流为主转换为位移电流为主,波场从扩散为主转化到以传播为主,波场的传播特性与角频率 $\omega$ 无关,而仅仅由介质的电磁属性决定。转换频率 $f_1$ 及高频段电磁波波速可用式(2)和式(3)表示:

$$f_1 = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon} \quad (2)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\kappa}} \quad (3)$$

式中 $\sigma$ 为电导率, $\epsilon$ 为介电常数, $\mu$ 为磁导率, $\kappa$ 为相对介电常数, $c$ 为真空中的光速。

地质雷达探测的激励频率 $f$ 通常远高于转换频率 $f_1$ ,即在地质雷达探测过程中,电磁波在介质中的传播速度仅与介质的电磁性质有关。

### 1.2 电磁波传播路径及埋深估算方法

假设介质为各向同性均匀介质,地质雷达天线为收发共置天线对,测量过程中天线发射端(T)与接收端(R)距离 $d$ 保持不变,雷达数据采集模式为反射探测模式。检测过程中屏蔽天线沿测线移动,发射天线和接收天线之间的电磁波传播路径可分为三类:空气中的直达波;沿介质表面传播的直达波;介质内部的反射波。雷达检测主要通过对介质内部反射波的分析来实现对介质内部异常体情况的分析,故对电磁波传播路径的分析同样主要以反射波为主。天线收发端与介质表面的距离可忽略不计,电磁波在介质中的传播及反射路径如图1所示。

当接收端位于 $x_1$ 处时,对应的电磁波双程旅时为 $t_1$ , $x_2$ 位置对应的双程旅时为 $t_2$ ,目标体所在位置为 $x_a$ ,埋深为 $H$ 。由于介质中电磁波传播速度 $v$ 保持不变,可得 $(x_i, t_i)$ 关系满足下式:

$$vt_i = \sqrt{H^2 + (x_a - x_i + d)^2} + \sqrt{H^2 + (x_a - x_i)^2} \quad (4)$$

式(4)中未知量参数为目标体埋深 $H$ 、目标体水平位置 $x_a$ 及波速 $v$ 。从接收到的每道信号振幅特征确定目标体反射信号的双程旅时,即 $(x_i, t_i)$ 为已知量。目标体反射波形类似双曲线,根据式(4)可知从反射波形上选取任意三个特征点 $(x_i, t_i)_{i=1,2,3}$ ,可直接完成对未知量 $H$ 、 $x_a$ 和 $v$ 的求解计算。

### 1.3 实际检测中的反射波形畸变

使用地质雷达进行实际检测时,往往会因各种干

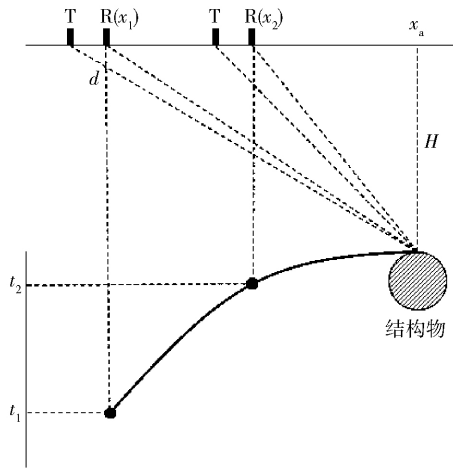


图1 电磁波传播路径  
Fig. 1 Propagation of electromagnetic wave

扰因素的存在造成信道间距不一致而引起反射波形畸变,从而与式(4)所描述的反射波形形成偏差。例如使用测距轮模式触发天线时,测距轮转动固定距离  $\Delta d$  天线发射端产生一道波信号,理想情况下天线实际移动距离  $\Delta d_a$  与  $\Delta d$  相等。而在实际检测过程中测距轮标定误差、检测时测距轮空转或滑动等因素的随机出现会导致二者并不相等,例如当测距轮标定偏大或空转时  $\Delta d > \Delta d_a$ ; 当测距轮标定偏小、卡死滑动或悬空停转时  $\Delta d < \Delta d_a$ 。但在雷达检测图中,每道波信号仍按设定的天线触发间距  $\Delta d$  排列。故上述情况出现时,结构物反射波形会出现畸变,图2表示  $\Delta d < \Delta d_a$  时波形畸变的效果。

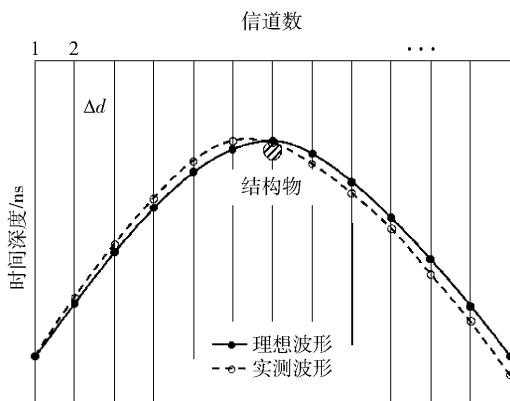


图2  $\Delta d < \Delta d_a$  时的波形畸变示意图  
Fig. 2 Diagram of wave distortion when  $\Delta d < \Delta d_a$

由于实际检测中导致波形畸变因素的不确定性及随机性,无法对畸变波形或雷达数据进行校正处理,从畸变波形上选取特征点进行埋深估计时必然会出现偏差。因此对于有畸变的反射波形数据,提取反射信号特征点进行结构物埋深估算时必须额外考虑波形畸变对估算结果精度的影响。

## 2 无畸变条件下的估算分析

首先验证通过反射波形特征点提取估算目标体埋深方法的可行性,基于理想状态下无畸变的反射波形进行埋深估算,并对估算结果精度进行分析。在实际检测或现场试验中,要获取理想无畸变的检测数据往往十分困难。本文借助基于时域有限差分(FDTD)算法的数值计算程序模拟雷达检测过程<sup>[15-16]</sup>,所得模拟数据可认为是理想无畸变的。

### 2.1 数值模型设计及计算

模拟隧道二衬检测情景设计数值计算模型。模型设计参数如下:模型区域为  $2.50 \text{ m} \times 0.55 \text{ m}$ ; 根据经验取混凝土相对介电常数  $\kappa = 6$ , 电导率  $\sigma = 0.01 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ; 在不同埋深及横坐标位置共设置8根半径为  $0.025 \text{ m}$  的钢筋,假设钢筋均为良导体材料; 天线收发端间距  $d = 0.05 \text{ m}$ 。由此建立几何模型及测线布置如图3所示。

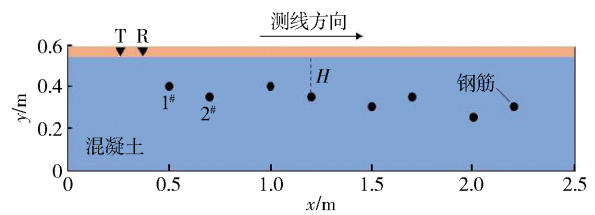


图3 数值计算模型及测线布置  
Fig. 3 Numerical model and position of the measuring line

检测雷达天线中心频率取为  $800 \text{ MHz}$ , 模型网格尺寸为  $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ , 计算时窗为  $10 \text{ ns}$ , 扫描间距取  $5 \text{ mm}$ , 共模拟  $480$  道雷达信号。数值计算所得到的雷达模拟扫描图像如图4所示。图像横坐标  $x$  为测线长度, 纵坐标  $t$  为时间深度。

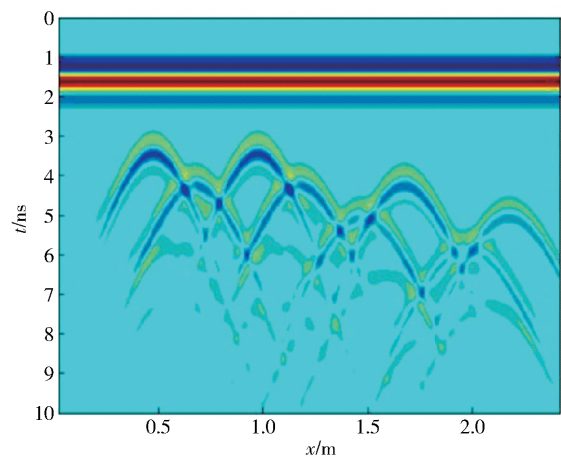


图4 无畸变的雷达检测模拟结果  
Fig. 4 Undistorted raw data from FDTD simulation

### 2.2 模拟检测信号极值点提取

相对于混凝土介质,良导体(钢筋)电导率极大,对于电磁波的反射系数  $\gamma \approx 1$ 。来自钢筋介质的反射信

号振幅强于周围普通介质材料,因此在雷达图像上会形成明显的强振幅特征波形.从图4可以看出,除7#局部受左、右侧钢筋反射信号干扰以外,1#~8#钢筋反射信号特征均较明显;顶部强振幅信号为直达波信号.从目标体反射波形中直接选取特征点时,难以准确找到单道反射信号波峰及波谷所在位置,影响估算结果的精度,因此需要对模拟数据的每一道反射信号作进一步处理以提取极值点.

图5为第58、96和115信道的波形图.由于天线收发端匀速移动,信道间距一致,因此通过信道数可直接计算得到对应横坐标位置分别为0.3、0.5和0.6 m. A、B和C分别表示该信道对应的钢筋反射信号极值点位置.区域①代表直达波信号,区域②代表检测区域内反射信号,区域③(灰色)表示根据波形确定的1#钢筋反射信号范围,因此通过搜索每一道信号中的极值点,可准确地选取任一钢筋反射波形并从中选择特征点.结合Matlab程序,对每一道信号数据进行求导计算,根据一阶导数符号变化自动搜索每一道信号中的极值点,同时设定振幅极大值和极小值范围对所有极值点进行筛选,符合条件的极值点在反射波形图中显示如图6所示,黑色标记点表示极大值,红色标记点表示极小值.

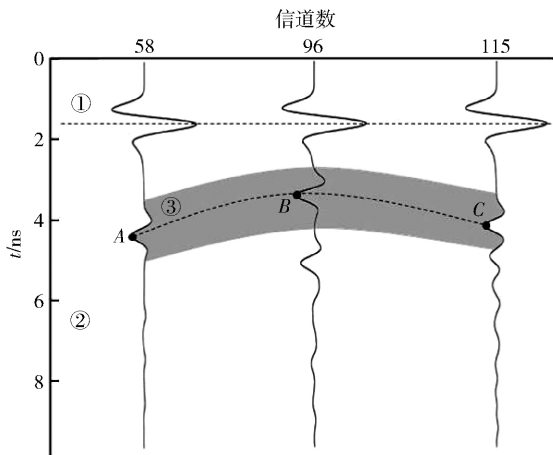


图5 单道信号波形分析  
Fig. 5 Waveform analysis of single channel

### 2.3 无畸变条件下的估算结果分析

对计算数据进行极值点提取后,在每个目标体反射波形极值曲线上分别取三点作为特征点 $(x_i, T_i)$ .其中 $x_i$ 表示第 $i$ 个特征点的水平位置, $T_i$ 表示第 $i$ 个特征点的时间深度.时间深度 $T_i$ 减去直达波信号传播时间后得到每特征点位置-双程旅时关系 $(x_i, t_i)$ ,代入式(4)所构建的方程组即可直接估算未知量 $(H, \nu, x_a)$ .

从表1中的估算结果可知:8根钢筋埋深的平均估计误差为2.071%,4#钢筋误差最大(6.500%),8#钢

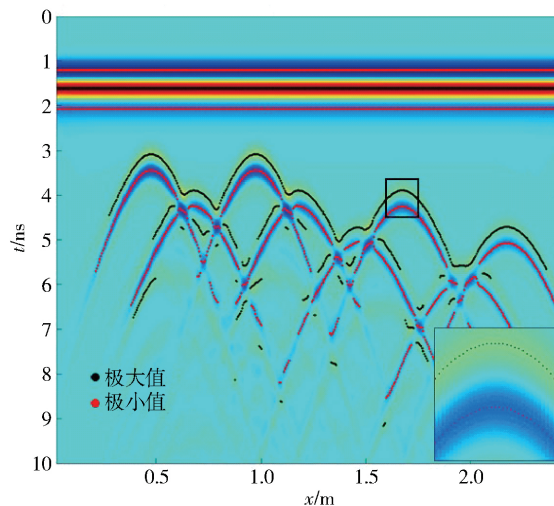


图6 根据模拟数据搜索反射波形上的极值点

Fig. 6 Searching the extreme points on the reflected waveform according to the simulation data

筋误差最小(0.000%);平均估算波速为 $0.134 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$ ,最大波速 $0.140 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$ ,最小波速 $0.129 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$ ,上下浮动小于5%;对于钢筋水平位置的估计,误差最大为3 mm,最小为1 mm.钢筋估算位置与实际位置的对比如图7所示,钢筋直径为5 cm.可以发现:除4#钢筋埋深估算值与实际值存在轻微误差(6.500%)外,其余钢筋的埋深估算值及水平位置估算值均较理想,同时根据不同钢筋反射信号特征点估算的电磁波传播速度亦较为稳定,浮动较小.通过对时域有限差分模拟得到的理想化雷达检测数据进行分析,验证了基于反射波特征点提取的结构物理深估算方法的有效性.

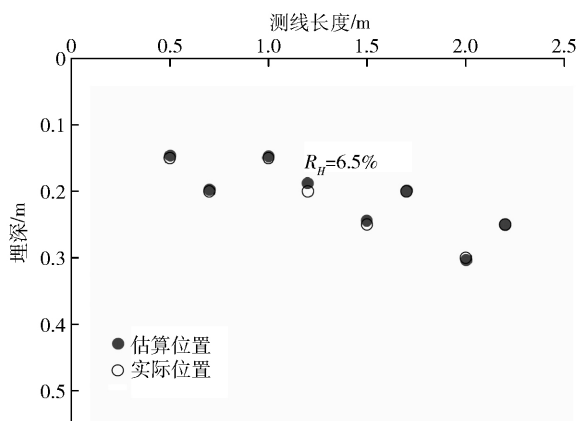


图7 钢筋实际位置与估算位置对比

Fig. 7 Comparison between the designed positions and simulated positions of rebar

### 3 基于实测波形的埋深估算分析

对于理想的反射波形,取波形上的特征点估算结构物理深时具有较高的精度.但在实际检测中,检测数据中反射波形容易出现畸变,波形畸变引起特征点

表 1 钢筋实际位置及直接估算值结果

Table 1 Designed positions and simulation results of rebar

钢筋 编号	实际水平 位置, $x/m$	实际 埋深, $H_0/m$	极值点 1		极值点 2		极值点 3		计算波速, $v/$ $(m \cdot ns^{-1})$	计算 埋深, $H/m$	计算水平 位置, $x_a/m$	埋深 误差, $R_H/\%$
			水平位置, $x_1/m$	时程, $t_1/ns$	水平位置, $x_2/m$	时程, $t_2/ns$	水平位置, $x_3/m$	时程, $t_3/ns$				
1#	0.50	0.15	0.262	3.748	0.470	2.138	0.585	2.633	0.139	0.146	0.502	2.668
2#	0.70	0.20	0.482	4.101	0.680	2.940	0.857	3.966	0.135	0.197	0.702	1.500
3#	1.00	0.15	0.850	2.775	0.972	2.126	1.085	2.621	0.140	0.147	1.001	2.000
4#	1.20	0.20	1.015	3.812	1.170	2.922	1.295	3.459	0.129	0.187	1.199	6.500
5#	1.50	0.25	1.267	4.874	1.465	3.736	1.677	4.850	0.131	0.244	1.499	2.400
6#	1.70	0.20	1.470	4.231	1.682	2.951	1.812	3.559	0.136	0.199	1.702	0.500
7#	2.00	0.30	1.810	5.269	2.047	4.738	2.160	5.381	0.132	0.303	2.003	1.000
8#	2.20	0.25	1.917	5.399	2.175	3.771	2.372	4.785	0.133	0.250	2.201	0.000

坐标值的变化从而对估算结果的精度造成影响. 本部分基于现场实测数据对该影响进行具体分析, 根据分析结果对理想条件下可行的埋深估算方法进行修正并进行误差分析, 得到满足实际检测要求的埋深估算方法.

### 3.1 实测背景

选择河北省张家口市西环路连接线一处在建隧道进行地质雷达现场检测, 获取实测数据. 检测对象为隧道二衬前端矮边墙部分. 如图 8 所示, 矮边墙已经浇筑完成, 内部预留两层钢筋接头与二衬钢筋网连接, 二衬尚未浇筑. 选取矮边墙长 5.6 m 的范围作为检测区域, 共包含单层 20 根外露钢筋, 用红色喷漆标示所在位置并分别测量钢筋埋深, 埋深测量共进行三次取平均值. 为减小检测的边缘效应, 同时避免混凝土中残余水分对电磁波传播的干扰, 在二衬浇筑且混凝土完全硬化之后, 使用地质雷达沿矮边墙边缘进行检测.

检测采用瑞典 RAMAC GUIII 型地质雷达; 天线选用 800 MHz 屏蔽天线, 其中天线收发端间距为 0.14 m, 测线长度 5.389 m, 包含 567 道波信号. 雷达检测结果如图 9 所示. 在探测图像时间深度 0 ~ 5 ns 范围内可清晰地观察到矮边墙外层 20 根钢筋的反射波形, 内层钢筋受到外层钢筋的屏蔽作用, 反射信号振幅较小, 不对表层钢筋反射波形的识别造成影响.

### 3.2 考虑波形畸变的估算结果分析

数据记录的测线长度为 5.389 m, 小于检测范围长度 5.6 m, 测距轮对于天线沿测线移动距离的测量是不绝对精确的, 即检测数据中反射波形发生畸变. 使用 Matlab 读取雷达检测数据并对雷达现场检测数据作极值点提取, 从每个钢筋对应反射波形上的极值点中分别选取三个特征点 ( $x_i, t_i$ ) 对进行估算, 分析基于畸变波形的埋深估算精度, 得到估算结果及误差如表 2 所示. 其中  $H_0$  表示实测钢筋埋深,  $t$  表示反射波形顶点处的双程旅时,  $H$  表示估算埋深,  $\Delta H$  及  $R_H$  分别表示埋深



图 8 待测区域

Fig. 8 Area to detect

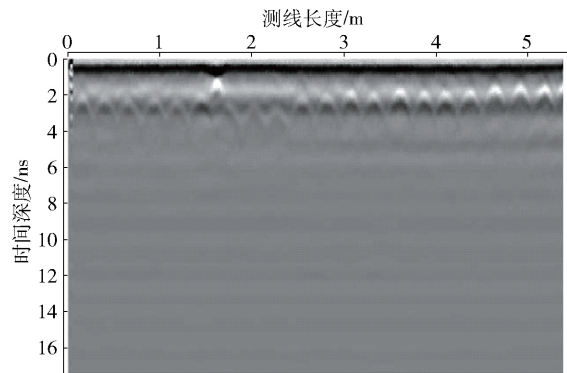


图 9 雷达检测数据

Fig. 9 Test data by ground penetrating radar

估算差值及估算误差. 由计算结果可知, 埋深  $H$  的平均估算误差  $R_H$  为 55.202%, 最大误差达 100%.

对波形畸变造成的埋深估算误差作进一步分析, 从每个反射波形的极值点中重复取特征点 10 次并进行估算, 每次所选取的特征点尽量不同, 得到埋深  $H_{m,n}$  和波速  $v_{m,n}$ , 估算结果汇总如图 10 所示, 下标  $m = 1, 2, 3, \dots, 10$  表示估算次数,  $n = 1, 2, 3, \dots, 20$  表示每根钢筋对应的特征波形. 实际电磁波速通过实际钢筋埋深  $H_0$  及对应测得的双程旅时  $t$  计算得到. 图 10 (b) 中钢

表 2 基于畸变波形数据的埋深估算误差

Table 2 Error of depth estimation based on distorted data

钢筋编号	$H_0/cm$	$t/ns$	$H/cm$	$\Delta H/cm$	$R_H/\%$
1	9.5	2.093	2.141	7.359	77.463
2	10.0	2.184	8.030	1.970	19.700
3	10.3	2.366	6.663	3.637	35.311
4	9.0	2.184	6.934	2.066	22.956
5	11.1	2.457	13.913	2.813	25.342
6	9.1	2.184	5.209	3.891	42.758
7	12.2	2.548	7.706	4.494	36.836
8	11.9	2.639	7.106	4.794	40.286
9	11.5	2.730	7.058	4.442	38.626
10	9.4	2.093	4.912	4.488	47.745
11	9.0	2.002	5.298	3.702	41.133
12	8.1	2.002	0.000	8.100	100.000
13	8.8	2.093	0.000	8.800	100.000
14	7.5	1.820	2.231	5.269	70.253
15	8.5	2.002	3.218	5.282	62.141
16	8.5	2.002	3.189	5.311	62.482
17	8.0	1.911	2.703	5.297	66.213
18	7.4	1.729	1.451	5.949	80.392
19	7.4	1.638	2.089	5.311	71.770
20	8.2	1.638	3.064	5.136	62.634

筋编号“0”表示每次通过 20 个反射波形特征点得到的波速平均估算值  $\bar{v}_n (n = 1, 2, 3, \dots, 20)$ 。根据估算结果可知: (1) 反射波形畸变对埋深估算的精度影响显著, 根据畸变波形取特征点直接估算得到的埋深估算值与实际值相差较大; (2) 波形畸变具有随机性, 选取同一反射波形上不同的特征点得到的埋深估算结果存在较大波动; (3) 对于电磁波传播速度的估算结果相比埋深估算更为理想, 除个别估算值误差较大外, 波速

估算值接近实际波速值, 估算结果波动较小, 且当多个目标体存在时, 取波速平均估算值可进一步减小波速估算误差。

### 3.3 波形畸变时的埋深估算方法修正

基于上述分析可知, 通过畸变波形对目标体埋深  $H_0$  的直接估算误差较大, 对电磁波传播速度的估算精度受畸变影响较小。因此虽然已经对结构物理深估算的有效性及其精度在理想检测情况下已经得到验证, 但在实际雷达检测应用过程中进行埋深估算时, 必须考虑实测波形畸变的影响对该方法进行修正, 以保证本埋深估算方法的实际可行性。

考虑电磁波速估算结果  $v_{m,n}$  受畸变影响较小, 取单次 20 个特征波形波速估算结果的均值  $\bar{v}_n (n = 1, 2, 3, \dots, 20)$  作为波速估算值  $v_e$ 。将  $v_e$  及测得的各目标体双程旅时  $t_n$  代入式 (5) 对结构物理深  $H_n$  作近似计算:

$$H_n = \frac{1}{2} v_e t_n \quad (5)$$

分别将 10 次取特征点得到的波速估算值  $v_{m,n} (m = 1, 2, 3, \dots, 10)$  及钢筋双程旅时  $t_{m,n}$  代入式 (5) 计算钢筋埋深  $H_{m,n}$ , 并与使用经验法 (取  $v_e = 0.1 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$ ) 估算得到的钢筋埋深  $H_n$  进行对比, 对比结果如图 11 所示。结果表明: 经验法对于埋深估算的误差为 14.5%; 使用特征点估算时最大埋深误差出现在第 6 次选取特征点时 (误差 10.40%), 最小埋深误差出现在第 4 次选取特征点时 (误差 4.42%), 单次估算误差均小于经验法估算误差。

为了分析本方法进行埋深估算的误差范围, 另在隧道内随机选取三处矮边墙实验段 (A 段、B 段和 C 段) 进行地质雷达检测并通过特征点提取的方法作埋深估算分析, 与经验法取  $v_e = 0.1 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$  时的埋深估算结果进行对比, 如图 12 所示。图 12 (a) 和 (b) 分别表示 A 段检测结果及误差对比, 经验法估算误差为 14.0%, 本方法拟合误差为 4.43%; 图 12 (c) 和 (d) 分

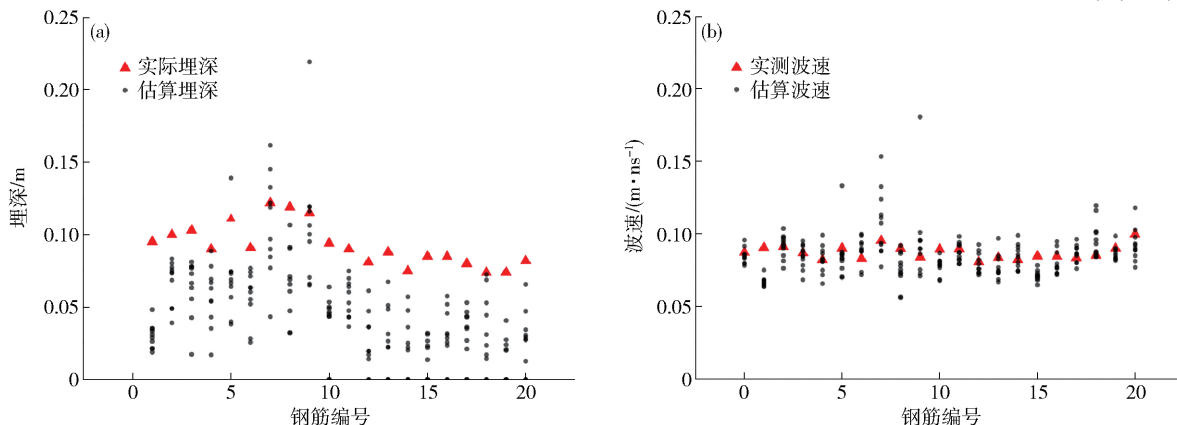


图 10 10 次取特征点估算结果. (a) 埋深; (b) 波速

Fig. 10 Summary of estimated results according to ten selections of feature points from the waveform: (a)  $H$ ; (b)  $v$

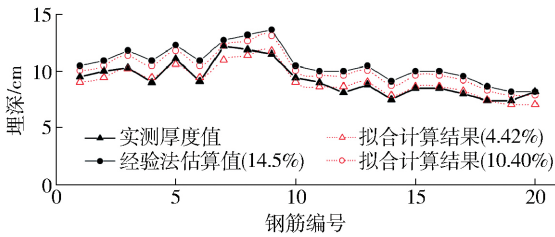


图 11 估算方法与经验方法的精度对比

Fig. 11 Accuracy comparison between the estimation method and empirical method

别表示 B 段检测结果及误差对比,误差分别为 20.8% 及 5.65%;图 12 (e) 和 (f) 分别表示 C 段检测结果及误差对比,误差分别为 15.8% 及 8.86%.

对于混凝土这类单一介质环境,通过经验法可以

相对准确地对电磁波传播速度进行估计.但通过现场试验分析可知,通过经验法推算结构物埋深的误差依然达到 15% ~ 20% 的范围,且考虑混凝土标号、强度、养护时间等因素的差异,经验法对埋深的估算误差是未知且不可控的;对于多介质、内部结构复杂或参考资料有限的介质环境,经验法估算埋深的误差波动范围会更大.本文所提出的基于雷达波形特征点提取的结构物埋深估算方法区别于经验法定性的估计,从反射波形特征出发对埋深进行定量估算,在实际工程检测中其估算精度高于经验法,且无需对介质环境进行关注,可认为其估算误差范围是可控的.从实验结果可知,估算误差通常在 5% ~ 10% 范围,且通过对检测环境及检测效果的改善,估算误差可控制在更低的范围,满足雷达法检测对埋深估算的精度要求.

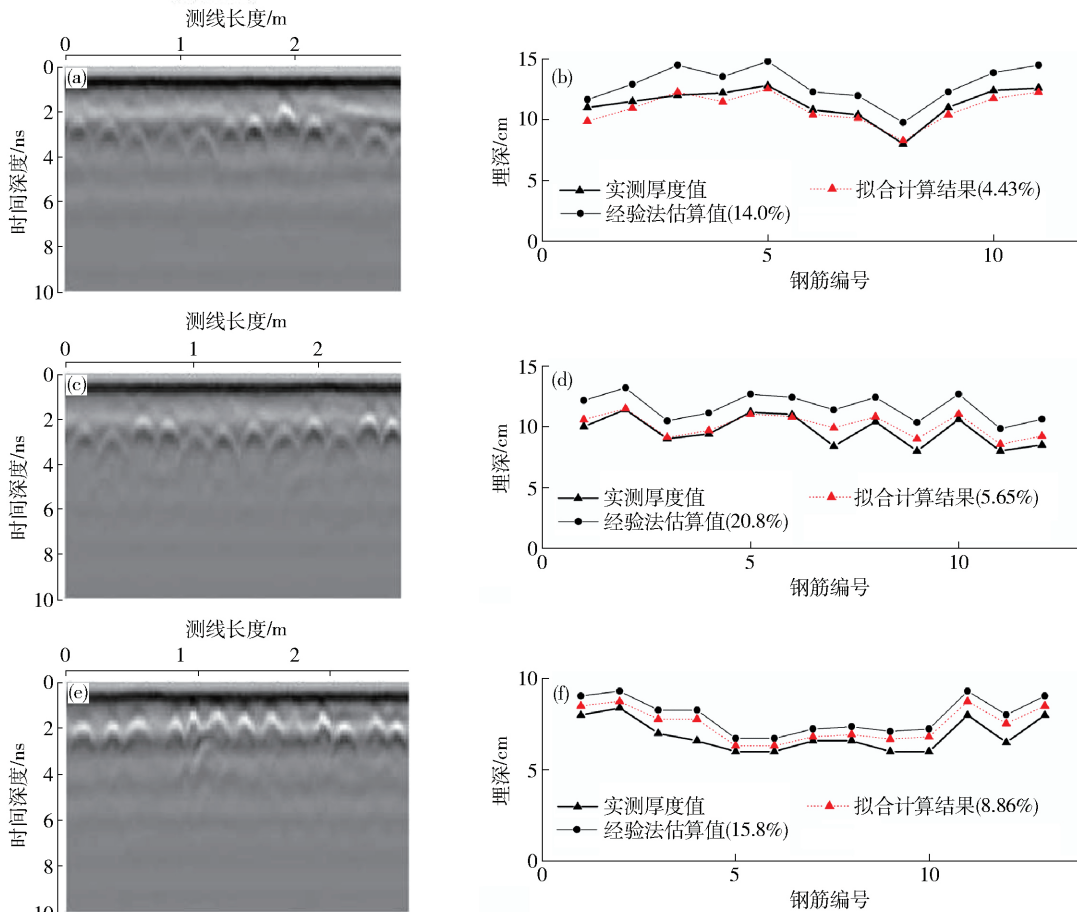


图 12 实验段雷达检测数据及埋深估算结果分析。(a, b) A 段; (c, d) B 段; (e, f) C 段

Fig. 12 Ground penetrating radar data and depth estimation results of test areas: (a, b) section A; (c, d) section B; (e, f) section C

### 4 结论

(1) 提出估算方法可同时实现对结构物埋深及电磁波传播速度的直接估算.在理想检测情况下估算结果精度较高.基于无畸变反射波形的分析结果表明该估算方法对于埋深的平均估算误差为 2.071%,根据不同反射波形得到的电磁波传播速度亦较为稳定.

(2) 实测数据通常会出现波形畸变,使用直接估算方法估算地下结构物埋深的精度显著下降.在波形畸变的影响下,对于钢筋埋深的平均估计误差为 55.202%,最大误差达 100%,且受波形畸变出现的随机性影响,多次在同一反射波提取特征点时得到的埋深估算值波动较大.

(3) 基于畸变的反射波形对电磁波传播速度进行

估算仍可取得较高的精度. 在 10 次取不同特征点分析中, 波速估算值基本接近实际值, 估算结果波动较小; 且当多个目标体存在时, 取波速平均估算值可进一步减小波速估算的误差.

(4) 对于有畸变的雷达数据, 采用修正后的埋深估算方法, 结合波速估算值及测得的结构物双程旅时近似计算结构物埋深可取得理想的结果. 实验结果表明修正后的埋深估算方法的误差通常在 5% ~ 10% 范围甚至更低, 在估算精度及误差控制方面相比经验法有明显优势, 能够满足雷达法检测对埋深估算的精度要求.

## 参 考 文 献

- [1] Harry M J. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011  
(Harry M J. 探地雷达理论与应用. 北京: 电子工业出版社, 2011)
- [2] Yang Y Q, He S H, Qi F L, et al. Simulation test of GPR non-contact detection on lining of railway tunnel. *Chin J Rock Mech Eng*, 2011, 30(9): 1761  
(杨艳青, 贺少辉, 齐法琳, 等. 铁路隧道衬砌地质雷达非接触检测模拟试验研究. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1761)
- [3] Yang G, Liu D W. Frequency spectrum characteristic of quartz sandstone rock mass with GPR. *Chin J Eng*, 2015, 37(11): 1397  
(杨光, 刘敦文. 石英砂岩体的地质雷达波频谱特征. 工程科学学报, 2015, 37(11): 1397)
- [4] Ni X Q, Wang Y Q, Wang G Q. Study on thickness measuring of tunnel lining-wall by geologic radar method. *Mod Transp Technol*, 2006, (3): 50  
(倪修勤, 王云泉, 王国群. 地质雷达方法检测隧道衬砌厚度研究. 现代交通技术, 2006, (3): 50)
- [5] Kang F Z, Qi F L, He S H, et al. Application of ground penetrating radar to disease detection of Kunlun Mountain Tunnel. *Chin J Rock Mech Eng*, 2010, 29(2): 3641  
(康富中, 齐法琳, 贺少辉, 等. 地质雷达在昆仑山隧道病害检测中的应用. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 3641)
- [6] Yang Y Q, He S H, Qi F L, et al. Simulation tests on GPR detection of composite linings of railway tunnels. *Chin J Geotech Eng*, 2012, 34(6): 1159  
(杨艳青, 贺少辉, 齐法琳, 等. 铁路隧道复合式衬砌地质雷达检测模拟试验研究. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1159)
- [7] Chen D L, Huang C L, Su Y. An integrated method of statistical method and Hough transform for GPR targets detection and location. *Acta Electron Sin*, 2004, 32(9): 1468  
(陈德莉, 黄春琳, 粟毅. 用统计方法和 Hough 变换进行 GPR 目标检测与定位. 电子学报, 2004, 32(9): 1468)
- [8] Dolguy A, Dolguy A, Zolotarev V. Optimal radius estimation for subsurface pipes detected by ground penetrating radar // *11th International Conference on Ground Penetrating Radar*. Columbus, 2006
- [9] Ristic A V, Petrovacki D, Govedarica M. A new method to simultaneously estimate the radius of a cylindrical object and the wave propagation velocity from GPR data. *Comput Geosci*, 2009, 35(8): 1620.
- [10] Song L, Zhang X J, Yang W H, et al. Experimental study on GPR model for artificial freezing projects. *Chin J Geotech Eng*, 2012, 34(1): 115  
(宋雷, 张小俊, 杨维好, 等. 人工冻结工程地质雷达模型试验研究. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 115)
- [11] Kong L J, Zhou Z O. Research on measurement of wave speed for sub-surface penetrating radar. *Acta Electron Sin*, 2002, 30(9): 1330  
(孔令讲, 周正欧. 浅地层探地雷达波速测量方法的研究. 电子学报, 2002, 30(9): 1330)
- [12] Yu J L, Wang C H. Estimation of EM wave velocity in detecting underground target by GPR. *Prog Geophys*, 2003, 18(3): 477  
(于景兰, 王春和. 探地雷达探测地下目标时的波速估计. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 477)
- [13] Wang X J, Zhao Y L, Hu Z Q, et al. Estimation method and comparative analysis of ground penetrating radar electromagnetic wave velocity based on different water contents. *J China Coal Soc*, 2013, 38(Suppl 1): 174  
(王新静, 赵艳玲, 胡振琪, 等. 不同水分条件下探地雷达电磁波波速估算方法与对比分析. 煤炭学报, 2013, 38(增刊 1): 174)
- [14] Ling T H, Zhang S, Li S R. Hilbert-Huang transform method for detection signal of tunnel geological prediction using penetrating radar. *Chin J Rock Mech Eng*, 2012, 31(7): 1422  
(凌同华, 张胜, 李升冉. 地质雷达隧道超前地质预报检测信号的 HHT 分析法. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1422)
- [15] Lü G, Li N, Liu X X, et al. FDTD forward modeling of geometric shape and fillings of lining defects of highway tunnel. *Chin J Rock Mech Eng*, 2014, 33(7): 1415  
(吕高, 李宁, 刘新星, 等. 公路隧道衬砌缺陷几何形态及填充物 FDTD 正演分析. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1415)
- [16] Zhong S, Wang C Y, Wu L X, et al. Borehole radar response characteristics of point unfavourable geo-bodies: forward simulation of its surrounding rock and filling condition. *Rock Soil Mech*, 2012, 33(4): 1192  
(钟声, 王川婴, 吴立新, 等. 点状不良地质体钻孔雷达响应特征: 围岩及充填效应正演分析. 岩土力学, 2012, 33(4): 1192)