

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022032824061968

文章编号:1674-599X(2024)03-0035-13

引用格式:文梦芝,凌同华,张亮,等.隧道衬砌结构不规则空洞正演模拟与时频分析[J].交通科学与工程,2024,40(3):35-47.

Citation: WEN Mengzhi, LING Tonghua, ZHANG Liang, et al. Forward simulation and time-frequency analysis of irregular cavities in tunnel lining structure[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 35-47.

## 隧道衬砌结构不规则空洞正演模拟与时频分析

文梦芝<sup>1</sup>, 凌同华<sup>1</sup>, 张亮<sup>2</sup>, 姚旭炜<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000)

**摘 要:** 为有效识别隧道衬砌结构各种形状的空洞, 采用时域有限差分法进行正演模拟, 分别分析空洞形状、充填介质和埋深对探地雷达电磁反射波成像效果和时频特征的影响, 并通过室内模型试验进行验证。研究结果表明: 空洞反射波的响应特征均表现为开口向下的抛物线。随着空洞上部边界由直线逐渐过渡至圆弧形或尖角形, 正演模拟图中反射波的次数减少, 反射信号减弱, 且连续小波变换时频图中的能量值也越来越小。空洞埋深越浅, 空洞充填介质的介电常数越大, 则所得模拟图像的信号越强。该研究成果可为隧道衬砌结构内空洞周围的病害发育预测和判断提供参考。

**关键词:** 探地雷达; 衬砌结构; 不规则空洞; GPRMax 正演模拟; 时频分析

中图分类号: U457

文献标志码: A

## Forward simulation and time-frequency analysis of irregular cavities in tunnel lining structure

WEN Mengzhi<sup>1</sup>, LING Tonghua<sup>1</sup>, ZHANG Liang<sup>2</sup>, YAO Xuwei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

**Abstract:** To effectively identify various cavities in tunnel lining structures, the finite difference time domain method was used to forward simulation. The influence of cavity shape, filling medium and burial depth on electromagnetic reflection imaging effect and time-frequency characteristics of GPR was analyzed respectively. And those analyses were then validated through laboratory model tests. Results indicate that the reflection response characteristics of cavities are manifested by a downward-opening parabola. As the cavity top-boundary transitions gradually from straight line to arc or sharp angle, the number of reflection wave in the forward simulation decreases, the reflected signal is abate. Moreover, the energy in the continuous wavelet transform time-frequency diagram decreases gradually. The shallower the buried depth of the cavity and the larger the dielectric constant of the cavity filling medium, the stronger the simulated image signal. The results can provide reference for the prediction and judgment of disease development around cavities in tunnel lining structures.

**Key words:** ground penetrating radar; lining structure; irregular cavity; GPRMax forward simulation; time-frequency analysis

收稿日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078061); 湖南省教育厅优秀青年项目(21B0725)

通信作者: 凌同华(1968—), 男, 教授, 主要从事城市轨道交通工程、隧道与地下工程、岩土工程灾害监测与控制等方面的研究工作。E-mail: lingtonghua@163.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

随着科技的进步,许多新技术和新工艺在交通工程建设中被广泛应用,隧道工程的建设与维护也在许多方面有了新的突破<sup>[1]</sup>。2019年,中国新增开通运营铁路隧道967座,总长1 710 km;在建铁路隧道2 950座,总长6 419 km;规划铁路隧道6 395座,总长16 326 km<sup>[2-4]</sup>。衬砌结构作为防止围岩变形或坍塌的永久性支护结构,事关隧道安全运营<sup>[5]</sup>,而空洞又是隧道工程中最常见的缺陷。因此,如何准确检测隧道衬砌结构中的空洞尤为关键。

探地雷达作为近地表地球物理成像的方法之一,具有数据采集快、检测效率高、图像直观和信号频率范围广等优点,是无损检测的重要方法<sup>[6-8]</sup>。但在实际工程应用中,由于现场环境复杂,成像图中会出现各种干扰信号,对结构中弱信号目标的识别造成不利影响,而数值模拟可以有效识别干扰信号。在数值模拟中,因时域有限差分(finite difference time domain, FDTD)法容易在计算机程序中实现,且具有很好的可扩展性而被广泛应用。FDTD法可基于GPRMax软件模拟探地雷达电磁波探测异于周围介质的反射波,并针对不同材料的物理特性、复杂形状的目标建立模型和设定吸收边界条件来模拟无界空间等特征。

许多学者<sup>[9-11]</sup>通过分析数值模拟正演响应特征、现场探地雷达反射波图像和频率特征,对溶洞、岩体裂隙、岩体破碎带等典型不良地质类型的区分及探地雷达目标的识别进行研究。KLEWE等<sup>[12]</sup>利用探地雷达评估材料的含水率,并将其作为材料质量检测的标准之一。BARYSHNIKOV等<sup>[13]</sup>使用探地雷达检测了地下隧道混凝土衬砌的不均匀性,以保证隧道在应力变化时能长时间安全运营。李尧等<sup>[14]</sup>利用GPRMax软件对有无水状态下的各种不良地质类型进行综合模拟,获得了各种不良地质类型在有水状态下的图像信号特征。LIU等<sup>[15]</sup>基于双正交小波基的探地雷达信号对空洞缺陷进行了定量识别。张胜等<sup>[16]</sup>基于时域有限差分法的正演模拟、模型试验和小波变换时能密度法对隧道掘进前方存在的空洞充填介质进行了定量识别。此外,大量学者<sup>[17-20]</sup>利用GPRMax软件对衬砌空洞大小、形状和不同充填介质等进行了数值模拟及试验分析,为实际工程的病害检测识别或者超前预报提供了参考依据。

当隧道衬砌结构存在空洞时,需要对其进行及时补救处理,不同形状空洞对衬砌结构病害的扩展

影响不同,处理措施也不一样。当空洞边界为尖角形时,衬砌结构表面受力,且空洞顶部尖角处受力大,病害向尖角(衬砌结构表面)以外发展;当空洞边界为圆弧形时,衬砌结构表面受力,且空洞两侧受力大,病害向衬砌结构内部扩展,向空洞两侧延伸。因此,本研究基于时域有限差分法,以衬砌结构内部空洞为研究对象进行正演模拟,并通过室内模型试验进行验证,分析不同空洞形状、不同充填介质和不同埋深下探地雷达电磁波反射波的响应特征,并基于连续小波变换的时频分析,对隧道衬砌结构空洞的形状、充填介质和埋深进行判断识别,为隧道衬砌结构病害识别提供借鉴。

## 1 基本原理

### 1.1 FDTD法正演模拟理论

FDTD法是一种利用电场和磁场在时间顺序上的交替排布进行空间和时间联系,将麦克斯韦旋度方程转化为差分方程,通过逐步推进模拟波的传播过程得出场分布的时域方法<sup>[21]</sup>,也是探地雷达正演模拟的最主要方法。麦克斯韦方程组是用于描述电场与磁场之间关系的一组方程,可由微分形式表述,也可用积分形式表达。方程组为<sup>[22]</sup>:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = q_v \quad (4)$$

式中: $E$ 为电场强度; $B$ 为磁通量密度; $t$ 为时间; $H$ 为磁场强度; $D$ 为电通量密度; $J$ 为电流密度; $q_v$ 为体积电荷密度。

为模拟某一特定目标或一组目标的探地雷达反射波的响应,必须根据目标的几何形状和初始条件求解方程。此外,麦克斯韦旋度方程的时间离散间隔与空间离散间隔需满足稳定性条件,即CFL(以Courant、Freidrichs和Lewy 3个人名字的首字母命名)条件。 $\Delta t$ 为离散时间间隔, $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 和 $\Delta z$ 为离散空间间隔,其满足收敛稳定的关系式为:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (5)$$

式中: $c$ 为光速。

使  $\Delta z \rightarrow +\infty$ , 得到二维情况下的稳定性条件:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}}} \quad (6)$$

## 1.2 探地雷达工作原理

探地雷达 (ground penetrating rader, GPR) 是用天线发射电磁波和接收电磁波的反射波, 并通过计算机显示图像的一组设备。当电磁波经过不同介质的分界面时, 电磁波的反射波或折射波在电脑上呈现出不同的特征。电磁波的穿透深度取决于介质的介电常数和电阻率。探地雷达检测常用于不良地质超前预报、地下埋藏物检测及人造结构成像等。

在介质中发射和接收电磁波的双程时间为:

$$t = \frac{\sqrt{4z^2 + x^2}}{2v} \quad (7)$$

式中:  $z$  为第一次出现电特性变化的介质表面 (即空洞上表面) 距地表的深度;  $x$  为探地雷达信号发射天线与接收天线之间的距离;  $t$  为探地雷达电磁波发射或接收时间;  $v$  为探地雷达电磁波在混凝土中的传播速度。

$$v = \frac{u}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon$  为介质相对介电常数;  $\mu$  为介质相对磁导率, 通常取 1;  $u$  为电磁波在空气中的传播速度, 通常取 0.3 m/ns。

探地雷达工作原理示意图如图 1 所示。

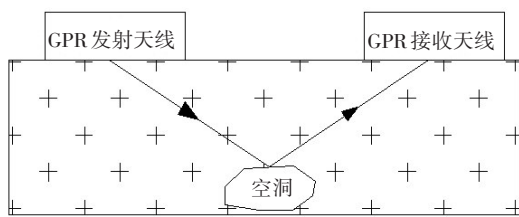


图1 探地雷达工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the GPR working principle

## 1.3 小波变换时频分析

小波分析能刻画时间序列的局部信息, 能对非平稳信号进行滤波和多分辨率时频分析, 可将时间序列扩展到时间-频率域 (即时频域)。相较于传统的傅里叶时间序列和频域分析, 小波分析可将时间和频率内的变化信息更加直观地展现出来<sup>[23-24]</sup>。探地雷达信号是典型的非平稳、非线性信号, 通过小波变换能够得到稳定的信号, 所以本研究用小波变换处理探地雷达的非平稳、非线性信号。

小波函数是以母小波  $\varphi(t)$  为小波基函数, 并对其进行缩放和平移变换得到的一系列函数:

$$\varphi_{t,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \varphi\left(\frac{t-\tau}{s}\right), s > 0, \tau \in R \quad (9)$$

式中:  $s$  为尺度参数, 控制母小波的伸缩;  $\tau$  为位置参数, 决定小波的具体位置;  $R$  为实数集。

母小波  $\varphi(t)$  为连续、非零且均值为零的函数。通过调整尺度参数  $s$  和位置参数  $\tau$  控制频率和时间的变化。若给定一时间序列  $x(t)$ , 则称  $W_x(\tau, s)$  为  $x(t)$  的连续小波变换。

$$W_x(\tau, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\varphi_{\tau,s}(t)} dt \quad (10)$$

式中:  $\overline{\varphi_{\tau,s}(t)}$  为  $\varphi_{\tau,s}(t)$  的复共轭函数。

## 2 空洞模型的建立与时频分析

### 2.1 不同形状空洞模型正演模拟及时频分析

本研究建立的计算模型整体宽为 2.00 m, 深为 0.35 m, 介质层的厚度设置为 0.30 m, 离散空间间隔  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  均为 2.00 mm, 离散时间间隔为 12 ns, 目标体为纵、横向长均为 0.10 m 的各种形状空洞。模型材料选取混凝土, 相对介电常数取 6, 电导率取 0.01 S/m, 相对磁导率取 1。本次试验模拟激励源选用中心频率为 1 600 MHz 的 Ricker 子波, 天线移动步长为 5.0 mm, 发射天线与接收天线之间的距离为 0.05 m, 共 380 个计算步, 2 543 个采样点。

模型 1~4 的上部边界由直线过渡至圆弧形。其中, 模型 1 为边长 0.10 m 的正方形; 模型 4 为下半部分宽 0.10 m、高为 0.05 m 的长方形拼接上半部分半径 0.05 m 的半圆。模型 1、5、6 的上部边界由直线过渡至尖角形。其中, 模型 5 为下半部分宽 0.10 m、高 0.05 m 的长方形拼接上半部分顶边长 0.05 m、底边长 0.10 m、高 0.05 m 的梯形; 模型 6 为下半部分宽 0.10 m、高 0.05 m 的长方形拼接上半部分底边长 0.10 m、高 0.05 m 的等腰三角形。所有空洞上边界均距地表 0.10 m, 充填介质均为空气。空洞模型示意图如图 2 所示。

不同形状空洞模型的正演模拟结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 所有图像反射响应特征均表现为开口向下的抛物线, 这是因为在空洞顶部边界电磁波行程短, 往返快, 能量损失少, 接收到的能量多; 而对于空洞两侧, 电磁波的行程较远, 耗时较长, 能量损耗较多, 接收到的能量少。抛物线顶部

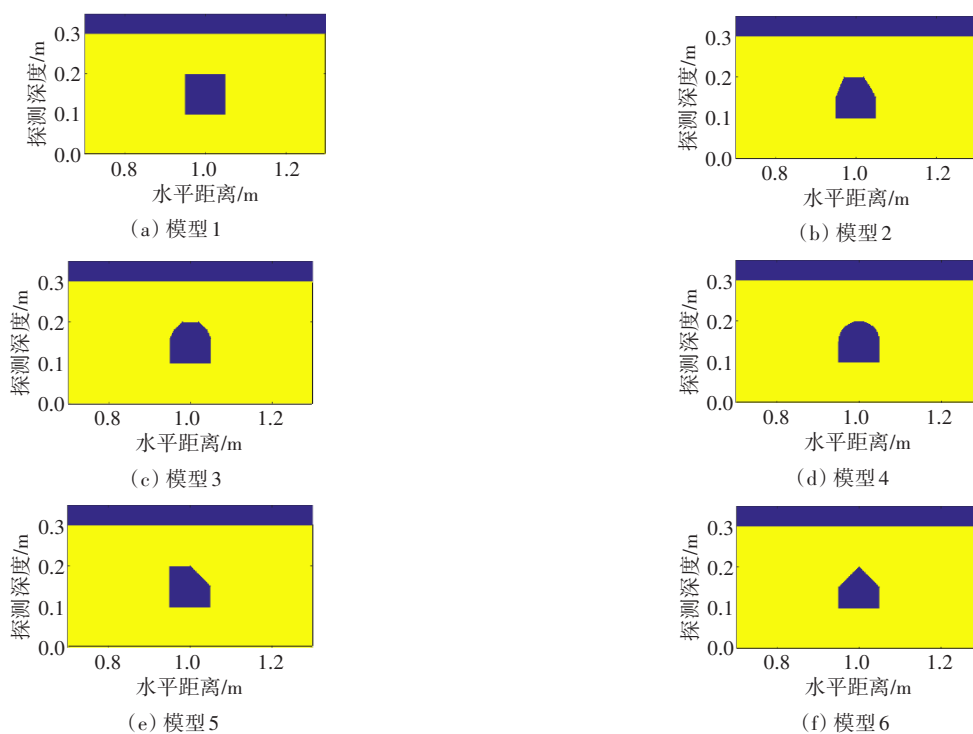


图2 不同形状的空洞模型示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of cavity models with different shapes

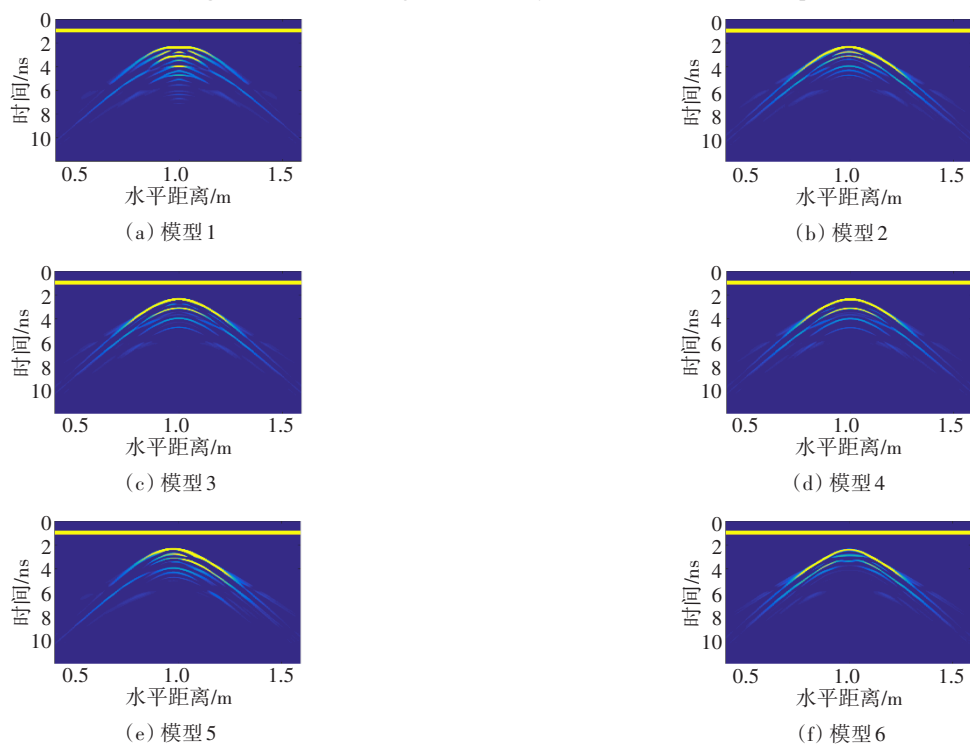


图3 不同形状空洞模型的正演模拟结果

Fig. 3 Forward simulation results of cavity models with different shapes

为来自空洞顶部的反射信号,据此可以大致判断空洞上边界的形状特征。空洞模型的大小关系着模拟结果图像的抛物线曲率。空洞大小不同,电磁波接收相等强度信号的时间就会不同,图像的曲率也就不同。在图3(a)中有多条明显的反射波,抛物线

顶部有多条曲线叠合,并呈现出水平弧度。随着空洞上部边界由直线过渡至圆弧形,曲线叠合的情况有所减轻,反射波的条数越来越少。当边界为圆弧形时,抛物线清晰光滑,曲线叠合情况不明显。模型5的右侧明显切削,故图像的右侧反射波明显,且



在图像右侧有多条曲线叠合,图像反射波强烈区偏右侧;模型6的左右两侧切削,空洞上部边界为尖角形,故图像顶部有明显的弓形特征,反射波的条数有所减少。

利用双正交小波基函数Bior2.6对空洞模型探地雷达实测信号的单道信号进行连续小波变换,得到对应的二维、三维时频图,如图4~5所示。

从图4~5可以看出,信号能量最大值随着空洞

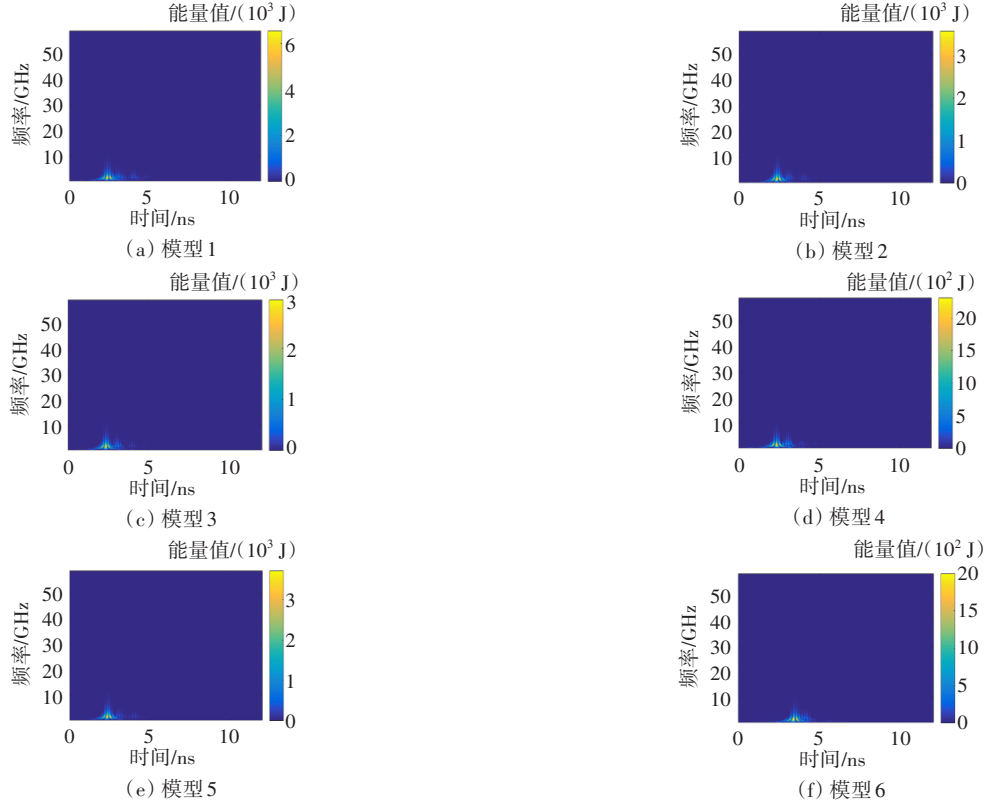


图4 不同形状空洞的小波变换二维时频

Fig. 4 The two-dimensional time-frequency of wavelet transform of cavity models with different shapes

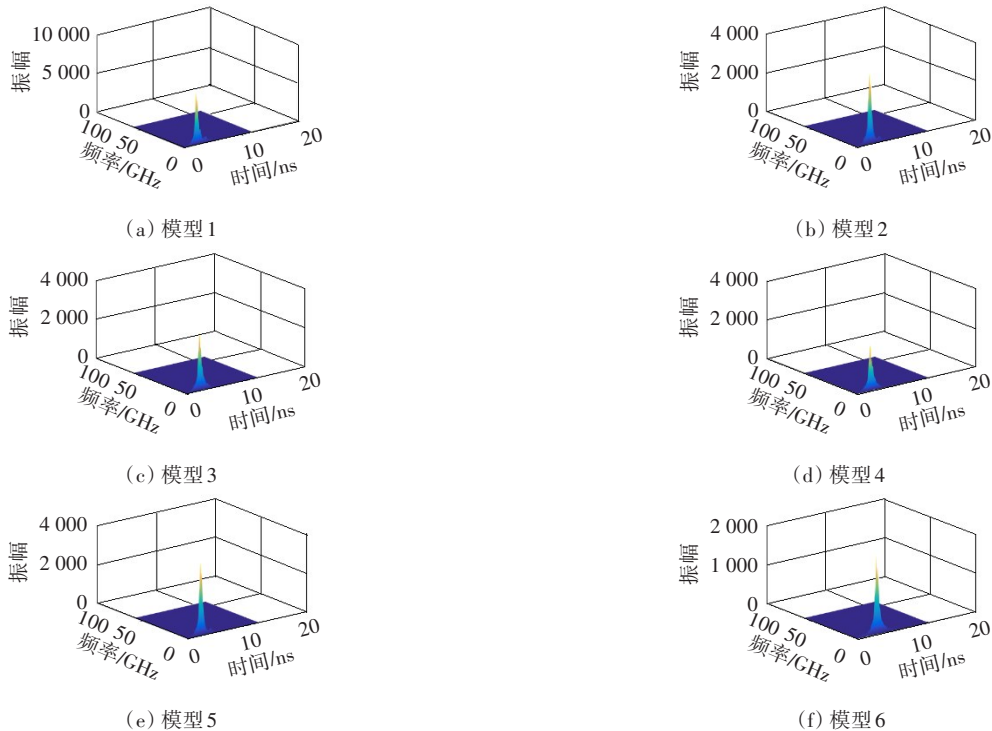


图5 不同形状空洞的小波变换三维时频

Fig. 5 The three-dimensional time-frequency of wavelet transform of cavity models with different shapes

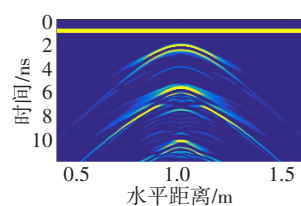
上部边界由直线过渡至圆弧形或尖角形而减小。当上部边界为直线时,接收到的反射电磁波最多,能量值最大,随着边界的逐渐圆滑,能量值下降并逐渐趋于平稳。当上部边界为尖角形时,接收到的反射电磁波最少,能量值最小。与上部边界由直线逐渐过渡至圆弧形情况相比,当上部边界由直线分步切割至尖角形时,所对应空洞的小波变换时频图中的能量值递减速度更快。在上部边界由直线逐渐过渡至圆弧形时,空洞边界的削切度小,边界变化缓慢。当上部边界由直线分步切割至尖角形时,边界与水平方向之间的夹角变化较大,能量值相对减小得较多。

## 2.2 不同充填介质空洞模型正演模拟及时频分析

以空洞模型4为例进行不同充填介质空洞模型正演模拟及时频分析。充填介质分别为空气、干砂、湿砂和水,对应的相对介电常数分别为1、4、27、81。空洞上部边界距地表0.10 m,模拟激励源选用中心频率为1 600 MHz的Ricker子波,其他参数不变。不同充填介质空洞模型正演模拟结果如图6所示。

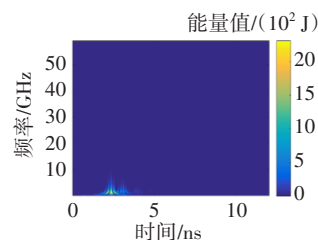
利用双正交小波基函数Bior2.6对空洞模型探地雷达实测信号的单道信号进行连续小波变换,得到对应的二维、三维时频图如图7~8所示。

从图6可以看出,与空洞充填介质为空气和干砂相比,当充填介质为水和湿砂时,空洞的反射波信号强烈且多次波明显,这主要是由空洞充填介

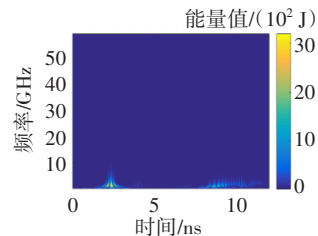


(d) 充填介质为湿砂

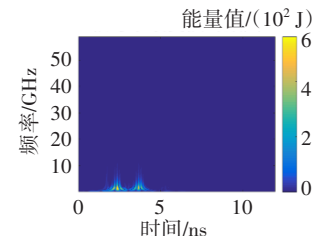
图6 不同充填介质空洞模型的正演模拟结果  
Fig. 6 Forward simulation results of the cavity model with different filling media



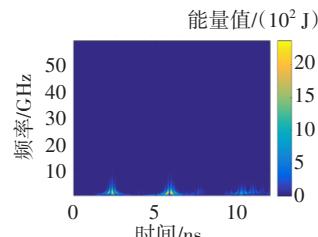
(a) 充填介质为空气



(b) 充填介质为水

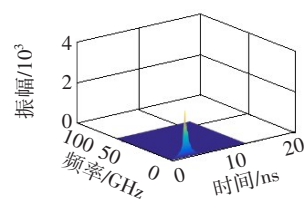


(c) 充填介质为干砂

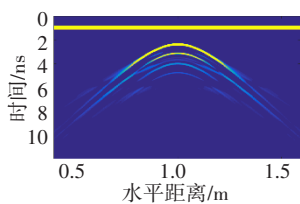


(d) 充填介质为湿砂

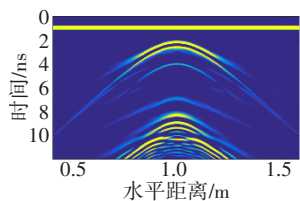
图7 不同充填介质空洞模型的小波变换二维时频  
Fig. 7 The two-dimensional time-frequency of wavelet transform of the cavity model with different filling media



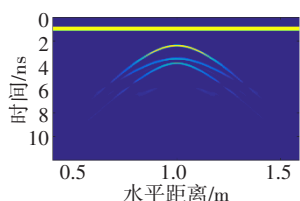
(a) 充填介质为空气



(a) 充填介质为空气



(b) 充填介质为水



(c) 充填介质为干砂

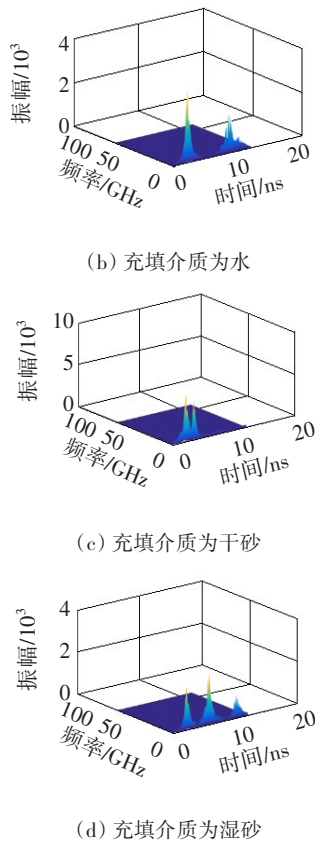


图8 不同充填介质空洞模型的小波变换三维时频

Fig. 8 The three-dimensional time-frequency of wavelet transform of the cavity model with different filling media

质的相对介电常数和电导率不同导致的。从图7~8可以看出,干砂的相对介电常数与周围介质的相对介电常数的差值最小,故其能量值最小;水的相对介电常数与周围介质的相对介电常数的差值最大,故其能量值也最大。表明:对于空洞充填介质,可根据连续小波变换时频图的能量最大值,来判断空洞内充填介质与周围介质相对介电常数的差值。

### 2.3 不同埋深空洞模型正演模拟及时频分析

以空洞模型4为例进行不同埋深空洞模型的正演模拟及时频分析。空洞模型上部边界到地表的距离 $h$ 分别为5、10、15和18 cm,充填介质均为空气,其他参数不变。不同埋深空洞模型的示意图如图9所示,其正演模拟结果如图10所示。

利用双正交小波基函数Bior2.6,对不同埋深空洞模型的探地雷达实测信号的单道信号进行连续小波变换,得到对应的二维、三维时频图,如图11~12所示。

从图10可以看出,在其他参数相同的情况下,空洞埋得越深,电磁波在返程中的损耗就越大,探

地雷达模拟结果中的反射信号就越弱,且出现时间也越晚。从图11~12可以看出,能量值随着空洞埋深的增加而减少,且随着空洞埋深的逐渐增加,信号能量值的递减速率逐渐变小。表明:在用探地雷达进行衬砌结构质量缺陷的检测时,可根据正演模拟结果中反射波信号的强弱、缺陷反射波出现时间的早晚及能量最大值的大小来判断空洞的埋深。

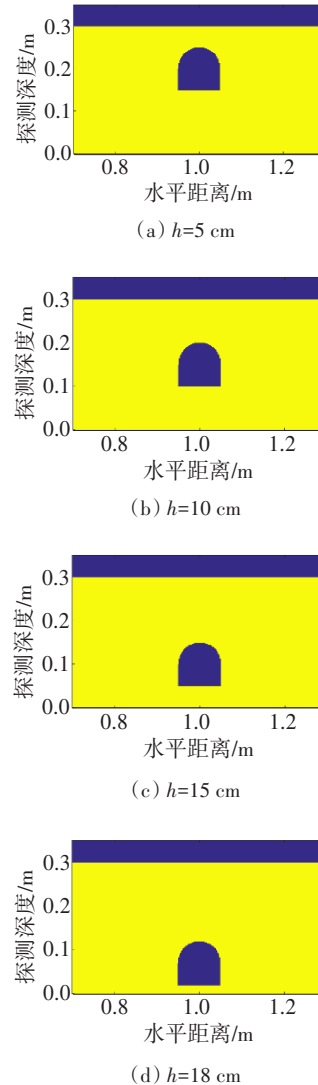
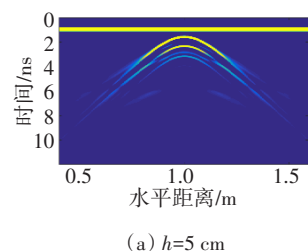


图9 不同埋深空洞模型示意图

Fig. 9 Schematic diagrams of the cavity model with different burial depths



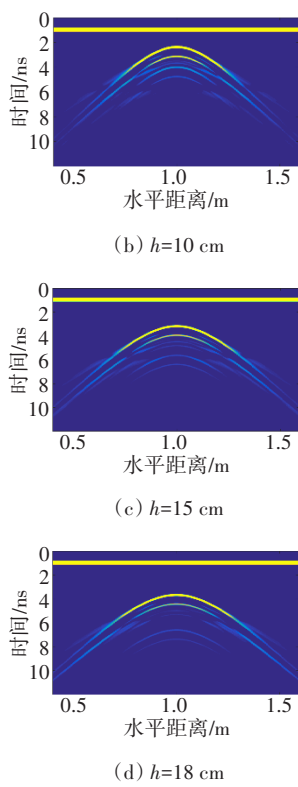


图10 不同埋深空洞模型的正演模拟结果

Fig. 10 Forward simulation results of the cavity model with different burial depths

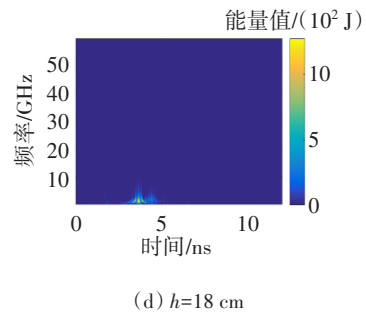
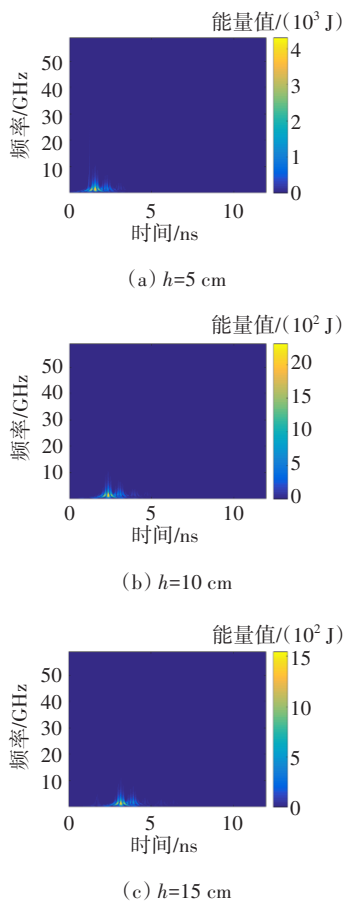


图11 不同埋深空洞模型小波变换二维时频

Fig. 11 The two-dimensional time-frequency of wavelet transform of the cavity model with different burial depths

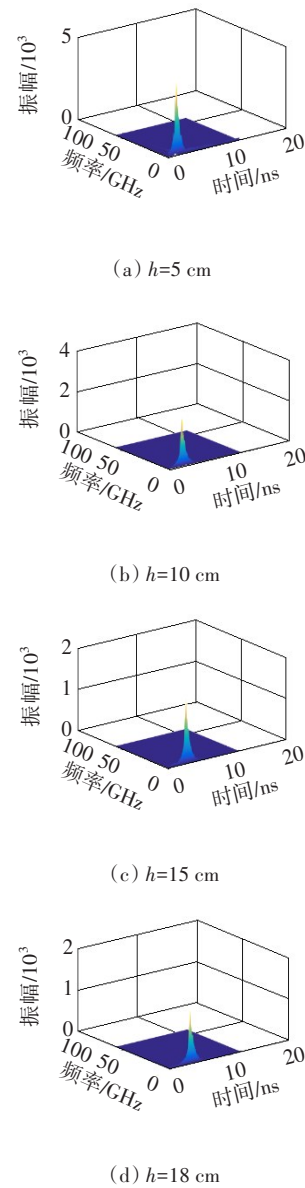


图12 不同埋深空洞模型小波变换三维时频

Fig. 12 The three-dimensional time-frequency of wavelet transform of the cavity model with different burial depths



### 3 室内模型试验

#### 3.1 空洞模型设计

为验证数值模拟结果的准确性,本研究进行了室内模型试验和时频分析。为方便进行试验操作,混凝土模型材料选择了与其介电常数相近的干砂,空洞外壳材料选择的是与混凝土介电常数相近的树脂材料。树脂模型的内边长为10 cm,空洞模型顶部埋深为10 cm,将空洞模型埋入干砂中进行试验,如图13所示。



图13 室内空洞模型试验示意图

Fig. 13 Schematic diagrams of cavity models in laboratory test

本次试验选用的雷达为意大利IDS公司研制的RIS型探地雷达。雷达天线中心频率为1 600 MHz,离散时间间隔为10 ns,共512个采样点,采集方式为连续采集,接收、发射天线一体。

雷达主机直接与计算机相连,扫描图像直接在计算机上呈现。利用Reflexw软件对探地雷达原始信

号进行预处理,处理后的空洞模型探地雷达实测图如图14所示。

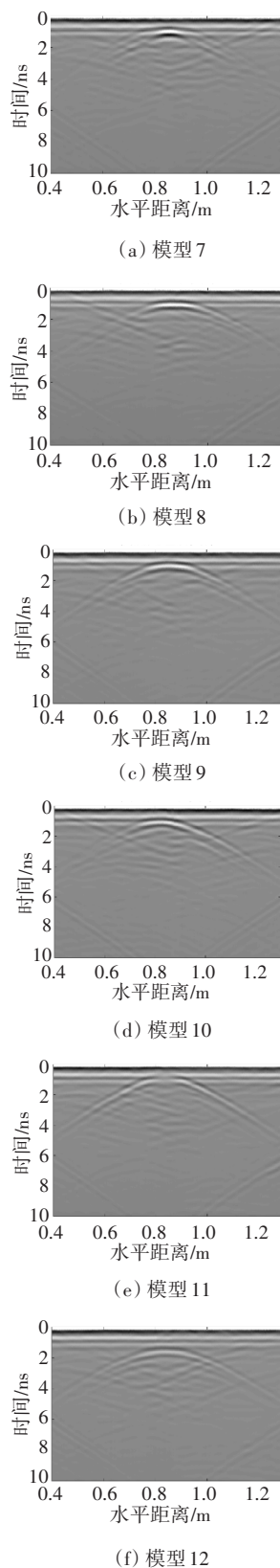


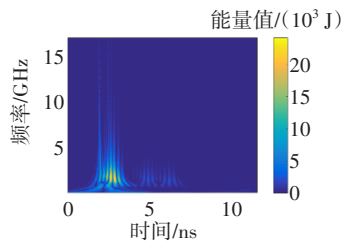
图14 空洞模型探地雷达实测图

Fig. 14 The GPR images of cavity models

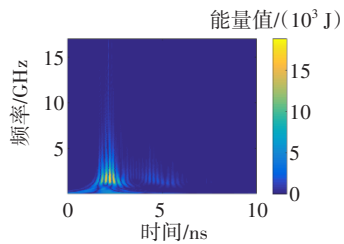
从图14可以看出,处理后的探地雷达实测图的特征与正演模拟图像反射响应特征一致。表明:GPRMax软件能够有效模拟探地雷达的探测信号,但在实际工程应用时需要一些辅助工具来消除杂波的影响。

### 3.2 基于连续小波变换的信号时频分析

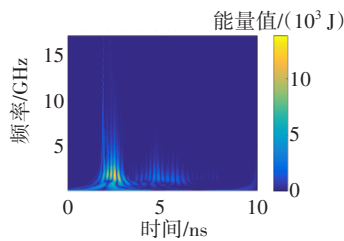
利用双正交小波基函数Bior2.6对空洞模型探地雷达实测信号的单道信号进行连续小波变换,得到对应的二维、三维时频图如图15~16所示。



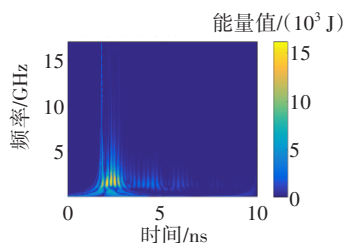
(a) 模型7



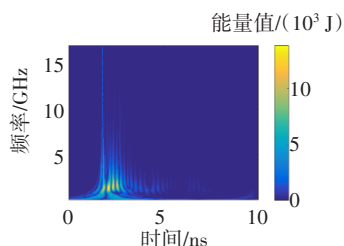
(b) 模型8



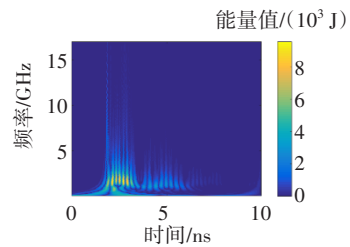
(c) 模型9



(d) 模型10



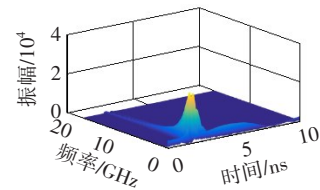
(e) 模型11



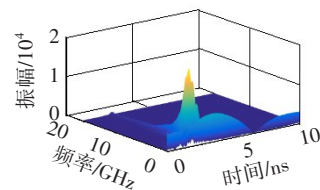
(f) 模型12

图15 小波变换二维时频

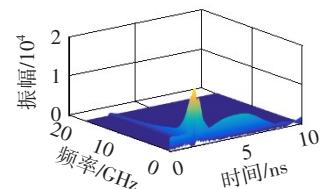
Fig. 15 The two-dimensional time-frequency of wavelet transform



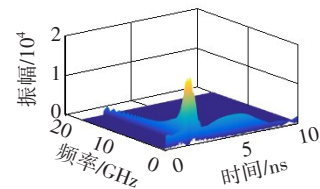
(a) 模型7



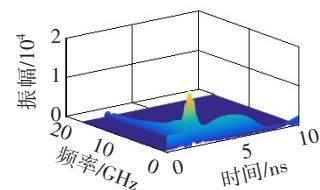
(b) 模型8



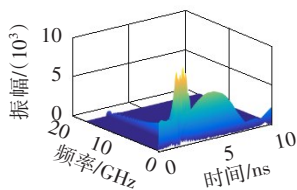
(c) 模型9



(d) 模型10



(e) 模型11



(f) 模型 12

图 16 小波变换三维时频

Fig. 16 The three-dimensional time-frequency of wavelet transform

提取正演模拟信号和实测信号时频图中的能量最大值,结果见表 1~2。

表 1 不同形状空洞模型模拟信号和实测信号能量最大值  
Table 1 The maximum energy of simulated signal and measured signal in cavity models with different shapes J

上部边界由直线过渡为圆弧形			上部边界由直线分步切削至尖角形		
模型编号	模拟信号能量最大值	实测信号能量最大值	模型编号	模拟信号能量最大值	实测信号能量最大值
1(7)	6 553	24 110	1(7)	6 553	24 110
2(8)	3 586	18 830	5(10)	3 726	16 150
4(9)	2 305	13 820	6(11)	1 994	13 860

表 2 不同埋深圆弧形空洞模型模拟信号和实测信号能量最大值

Table 2 The maximum energy of simulated signal and measured signal in circular cavity model with different buried depths

埋深/cm	模拟信号能量最大值/J	实测信号能量最大值/J
10	2 305	13 820
15	1 546	9 559

结合实测信号图 14,可由图 15~16、表 1~2 分析判断空洞的形状和埋深。空洞模型的形状不同,反射波信号强弱的位置点就会不同。在模型 7、8、9 的实测图中,反射波信号最强处位于双曲线顶部,随着空洞上部边界由直线逐渐过渡至圆弧形,反射波的信号逐渐减弱,时频图的能量最大值呈降低趋势;在模型 10 的实测图中,反射波信号最强处位于双曲线右侧;在模型 11 的实测图中,反射波信号最强处位于双曲线两侧。当空洞模型边界为斜面时,

斜面的反射信号强烈,随着空洞上部边界由直线分步切削至尖角形时,时频图的能量最大值呈下降趋势。上部边界为直线的空洞的能量值最大,而上部边界为其他形状的空洞的能量值相对较小,这是因为上部边界为其他形状的空洞相比于上部边界为直线的空洞,其切削面多,产生的能量被分散,故能量值较低。空洞模型埋设越深,返程损耗能量就越多,接收到的能量就越少。但是模拟信号能量最大值和实测信号能量最大值相差较大,这主要是因为正演模拟环境为理想环境,无噪声干扰,而试验过程受诸多因素影响,图像需进行增益处理,故模拟信号能量最大值和实测信号能量最大值存在差异,但不同形状和埋深空洞的正演模拟和实测信号能量值的变化规律一致,这说明将 GPRMax 软件用于模拟探测隧道衬砌结构内部空洞缺陷是有效的、准确的。

4 结论

基于 GPRMax 软件,利用时域有限差分法,对隧道衬砌结构内不同形状、充填介质和埋深的空洞进行正演数值模拟,并结合室内模型试验进行对比分析,得到如下结论:

1) 对不同形状的空洞进行正演模拟,其结果图像反射响应特征均表现为开口向下的抛物线,空洞缺陷区多次出现反射波。可由正演模拟结果图及实测图顶部是否发生多条曲线叠合、叠合位置及多次反射波的情况来判断空洞的形状、位置、充填介质等特性。

2) 从空洞模型信号时频图可以看出,当空洞上部边界为直线时,能量值最大。当空洞上部边界由直线过渡至圆弧形或分步切削至尖角形时,能量值有所下降。充填介质的相对介电常数越大,波形图中的反射波越明显。可根据能量值的大小,结合数值模拟得到的波形图和实测波形图来判断空洞的边界形状及充填介质,以制定相应的处理、检测措施。

3) 通过对比正演模拟及模型试验中不同类型的空洞探测图像,结合小波变换的时频对信号能量变化规律进行分析,提高了探地雷达对隧道衬砌内空洞缺陷识别的准确性,研究结果对于识别不同形状的空洞、判别空洞周围的病害发育具有重要作用。

## 参考文献(References):

- [1] 陈赟, 陈玉斌. 基于HHM-RFRM的地铁隧道施工安全风险情景识别[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(1): 7-15. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxxbzk. 2021.01.002.  
CHEN Yun, CHEN Yubin. Safety risk scenario identification of subway tunnel construction based on HHM-RFRM [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(1): 7-15. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxxbzk.2021.01.002.
- [2] 洪开荣, 冯欢欢. 中国公路隧道近10年的发展趋势与思考[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 62-76. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.12.005.  
HONG Kairong, FENG Huanhuan. Development trends and views of highway tunnels in China over the past decade [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 62-76. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372. 2020.12.005.
- [3] 严金秀. 中国隧道工程技术发展40年[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(4): 537-544. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2019.04.002.  
YAN Jinxiu. Achievements and challenges of tunneling technology in China over past 40 years [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 537-544. DOI: 10.3973/j. issn.2096-4498.2019.04.002.
- [4] 田四明, 王伟, 巩江峰. 中国铁路隧道发展与展望(含截至2020年底中国铁路隧道统计数据)[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 308-325, 11, 28. DOI: 10.3973/j. issn.2096-4498.2021.02.018.  
TIAN Siming, WANG Wei, GONG Jiangfeng. Development and prospect of railway tunnels in China (including statistics of railway tunnels in China by the end of 2020) [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 308-325, 11, 28. DOI: 10.3973/j. issn. 2096-4498.2021. 02.018.
- [5] 杨志刚, 周智辉, 凌同华, 等. 隧道衬砌裂缝对结构受力的影响规律研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4): 43-53. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020. 04.007.  
YANG Zhigang, ZHOU Zhihui, LING Tonghua, et al. Research on the influence law of tunnel lining cracks on structural forces [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 43-53. DOI: 10.16544/j. cnki.cn43-1494/u.2020.04.007.
- [6] WAI-LOK LAI W, DÉROBERT X, ANNAN P. A review of ground penetrating radar application in civil engineering: a 30-year journey from locating and testing to imaging and diagnosis [J]. NDT & E International, 2018, 96: 58-78. DOI: 10.1016/j.ndteint. 2017.04.002.
- [7] GIANNOPOULOS A. Modelling ground penetrating radar by GPRMax [J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(10): 755-762. DOI: 10.1016/j. conbuildmat.2005.06.007.
- [8] 周陈婴. 隧道衬砌检测探地雷达图像分析与工程应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48(4): 61-68. DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2017.015.  
ZHOU Chenying. Image analysis and engineering application of ground penetrating radar in tunnel lining detection [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2018, 48(4): 61-68. DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2017.015.
- [9] 刘宗辉, 刘毛毛, 周东, 等. 基于探地雷达属性分析的典型岩溶不良地质识别方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3282-3290. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0796.  
LIU Zonghui, LIU Maomao, ZHOU Dong, et al. Recognition method of typical anomalies in karst tunnel construction based on attribute analysis of ground penetrating radar [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3282-3290. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0796.
- [10] 张崇民, 张凤凯, 李尧. 隧道施工不良地质探地雷达超前探测全波形反演研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(1): 102-109. DOI: 10.3973/j. issn. 2096-4498.2019. 01.013.  
ZHANG Chongmin, ZHANG Fengkai, LI Yao. Study of full waveform inversion of advance tunnel geological prediction by ground penetrating radar [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(1): 102-109. DOI: 10.3973/j. issn.2096-4498.2019.01.013.
- [11] 蒋建国, 刘程, 陈媛, 等. 地质雷达正演模拟及在断层富水带超前地质预报的应用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(11): 2801-2808. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2019.11.020.  
JIANG Jianguo, LIU Cheng, CHEN Yuan, et al. Study on GPR forward modeling and its application in advanced geological prediction of fault water-rich zone [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(11): 2801-2808. DOI: 10.19713/j. cnki. 43-1423/u. 2019.11.020.
- [12] KLEWE T, STRANGFELD C, KRUSCHWITZ S. Review of moisture measurements in civil engineering with ground penetrating radar: applied methods and signal features [J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 122250. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2021. 122250.
- [13] BARYSHNIKOV V D, KHMELIN A P, DENISOVA E



- V. GPR detection of inhomogeneities in concrete lining of underground tunnels[J]. Journal of Mining Science, 2014, 50(1): 25-32. DOI: 10.1134/S1062739114010049.
- [14] 李尧, 李术才, 刘斌, 等. 钻孔雷达探测地下不良地质体的正演模拟及其复信号分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 300-308. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.01.038.
- LI Yao, LI Shucai, LIU Bin, et al. Forward simulation and complex signal analysis of borehole radar detection for underground adverse geological bodies[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 300-308. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.01.038.
- [15] LIUH R, LINGT H, LID Y, et al. A quantitative analysis method for GPR signals based on optimal biorthogonal wavelet [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(4): 879-891. DOI: 10.1007/s11771-018-3791-y.
- [16] 张胜, 何文超, 黎永索, 等. 基于小波变换时能密度法的隧道空洞充填物识别[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3504-3514. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0921.
- ZHANG Sheng, HE Wenchao, LI Yongsuo, et al. Identification of tunnel cavity fillings by time-energy density analysis based on wavelet transform[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3504-3514. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0921.
- [17] 张胜, 李宁羽, 黎永索, 等. 隧道掌子面前方空洞的正演模拟与模型试验研究[J]. 四川建材, 2019, 45(8): 64-66. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4011.2019.08.030.
- ZHANG Sheng, LI Ningyu, LI Yongsuo, et al. Forward simulation and model test of cavity in front of the tunnel [J]. Sichuan Building Materials, 2019, 45(8): 64-66. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4011.2019.08.030.
- [18] 甯艳, 肖宏跃, 邓唯渐, 等. 地质雷达对隧道衬砌空洞检测的正演研究及实例分析[J]. 勘察科学技术, 2018(5): 54-57. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3946.2018.05.012.
- NING Yan, XIAO Hongyue, DENG Weixi, et al. Research on forward simulation and example analysis of tunnel lining cavity detection by GPR [J]. Site Investigation Science and Technology, 2018(5): 54-57. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3946.2018.05.012.
- [19] 陈婕, 凌同华, 刘浩然, 等. 探地雷达混凝土空洞目标正演模拟与试验分析[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(3): 31-37. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.03.006.
- CHEN Jie, LING Tonghua, LIU Haoran, et al. Forward simulation and experimental analysis of ground penetration radar for the underground cavities[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(3): 31-37. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.03.006.
- [20] 刘新荣, 舒志乐, 朱成红, 等. 隧道衬砌空洞探地雷达三维探测正演研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2221-2229.
- LIU Xinrong, SHU Zhile, ZHU Chenghong, et al. Study of forward simulation for ground penetrating radar three-dimensional detection of tunnel lining cavity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2221-2229.
- [21] YEE K E. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 302-307. DOI: 10.1109/TAP.1966.1138693.
- [22] 杨成忠, 罗坤, 王威, 等. 隧道衬砌内部空洞探测的FDTD正演模拟与试验研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 114-117, 124. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201712140002.
- YANG Chengzhong, LUO Kun, WANG Wei, et al. FDTD forward simulation and experimental study of tunnel lining internal cavity detection [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(11): 114-117, 124. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201712140002.
- [23] 王敏会, 常桂娟. 基于小波方法的时频域分析[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2021, 38(3): 229-233. DOI: 10.3969/J.ISSN.1674-148X.2021.03.011.
- WANG Minhui, CHANG Guijuan. Time-frequency domain analysis based on wavelet method[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2021, 38(3): 229-233. DOI: 10.3969/J.ISSN.1674-148X.2021.03.011.
- [24] 王兴. 基于小波变换方向性分量重构的复杂环境公路裂缝识别方法[J]. 山西交通科技, 2021(4): 52-55.
- WANG Xing. Road crack identification method in complex environment based on directional component reconstruction of wavelet transform [J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2021(4): 52-55.

(责任编辑:欧兆虎;英文编辑:陈璐)