

doi: 10.11720/wtyht.2015.4.32

肖都,李文杰,郭鹏.基于 GPRMax 的隧道衬砌检测数值模拟及应用[J].物探与化探,2015,39(4):855-859.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.4.32

Xiao D, Li W J, Guo P. The tunnel lining detection numerical simulation based on GPRMax and its application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(4): 855-859. http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.4.32

# 基于 GPRMax 的隧道衬砌检测数值模拟及应用

肖都,李文杰,郭鹏

(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊 065000)

**摘要:** 利用基于时间域有限差分法(FDTD)的 GPRMax,针对常用的 400、900、1 500 MHz 三种不同中心频率的天线,数值模拟了隧道衬砌不同钢筋网密度、不同钢筋直径及其下方的钢拱架、空气界面等目标体的探地雷达反射及干扰信号图像特征;在混凝土试件上开展实验研究,并运用克希霍夫积分偏移处理了数值模拟和实验数据,压制了钢筋的绕射波和多次波,提高了钢筋网下方弱反射信号的成像效果;通过对比分析数值模拟、实验测量和工程实测结果,为探地雷达在隧道衬砌检测中取得更好的探测效果提供了借鉴。

**关键词:** 探地雷达;时间域有限差分法;隧道衬砌;数值模拟;钢筋网;天线中心频率

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)04-0855-05

现代隧道衬砌以钢筋、钢拱架等金属体作为支护,以确保隧道衬砌能够具备足够的承压强度。由于施工方面的不确定因素,如不能及时发现和判明较易出现的钢筋和钢拱架缺失,钢筋和钢拱架间距与位置不符合设计要求等方面工程施工质量问题,会对隧道衬砌的稳定性及完工后隧道正常使用带来影响。探地雷达方法由于克服了传统隧道衬砌质量检查方法效率不高、样本量少和具有破坏性的问题,已成为了隧道衬砌施工质量检测中的主要方法<sup>[1-5]</sup>。电磁波在传播过程中遇到不同电性界面时会产生反射与透射,探地雷达就是基于这一特性,通过发射高频电磁波并记录反射信号来实现探测预期目标体的方法技术。在探地雷达工程检测和资料解释中,受现场条件、噪声干扰以及解释人员经验的制约,常会导致在具体异常的推断方面出现分歧,且缺乏足够的数值模拟和试件实验数据支持。因此,笔者将数值模拟、混凝土试件实验和工程实例三项工作结合起来进行对比分析,为探地雷达在隧道衬砌检测中取得更好的探测效果提供了借鉴依据。

## 1 基于时间域有限差分法的 GPRMax

任何电磁现象都可以在宏观尺度上用麦克斯韦方程组来描述。1966 年 K.S.Yee 将麦克斯韦方程

连续形式的微分方程转化为离散方式,提出了时间域有限差分法(finite difference time domain, FDTD)<sup>[6]</sup>。电磁波的二维数值模拟一般有横磁(TM)或横电(TE)两种模式,分别由  $E_z$ 、 $H_x$ 、 $H_y$  或  $H_z$ 、 $E_x$ 、 $E_y$  组成,此处使用的 TM 模式可由麦克斯韦方程组推导表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial D_z}{\partial t} &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right), \\ D_z(\omega) &= \epsilon_r^*(\omega) \cdot E_z(\omega), \\ \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial E_z}{\partial y}, \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial E_z}{\partial x}. \end{aligned}$$

通过二阶精度中心差分,可将上述各式转换为在特定边界条件下求解二维电磁波场各分量的有限差分表达式

$$\begin{aligned} \frac{D_z^{n+1/2}(i,j) - D_z^{n-1/2}(i,j)}{\Delta t} &= \\ \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{H_y^n(i+1/2,j) - H_y^n(i-1/2,j)}{\Delta x} &- \\ \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{H_x^n(i,j+1/2) - H_x^n(i,j-1/2)}{\Delta x} &, \end{aligned}$$

$$\frac{H_x^{n+1}(i, j + 1/2) - H_x^n(i, j + 1/2)}{\Delta t} = -\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{E_z^{n+1/2}(i, j + 1) - E_z^{n+1/2}(i, j)}{\Delta x},$$

$$\frac{H_y^{n+1}(i + 1/2, j) - H_y^n(i + 1/2, j)}{\Delta t} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{E_z^{n+1/2}(i + 1, j) - E_z^{n+1/2}(i, j)}{\Delta x}。$$

式中： $E$  为电磁强度， $D$  为电位移矢量， $H$  为磁场强度， $\epsilon$  为介电常数， $\mu$  为磁导率， $\Delta t$  为时间步长， $\Delta x$  为空间步长， $n, i, j$  分别为时间步数。

对求解空间做 Yee 氏剖分后可将空间划分为多个剖分单元，为保持数值迭代过程稳定，空间步长与时间步长之间需满足一定关系，即时间步长应小于等于电磁波在介质中最短波长的 1/10，同时空间步长应大于一个时间步长内的电磁波传播距离。基于 FDTD 算法的 GPRMax2D<sup>[7,8]</sup> 可输出横磁 (TM) 模式的  $E_z, H_x, H_y$  值，据此建立了包括混凝土、钢筋、钢拱架、空气等介质在内的有耗色散媒质数据模型，并通过编制相应程序实现了  $E_z, H_x, H_y$  值的数据转换、雷达图像显示和处理功能。下文所示的数值模拟结果均为  $E_z$  值。

## 2 数值模拟及实验测量

### 2.1 隧道衬砌典型金属体数值模拟

隧道衬砌中的典型金属体一般为钢筋网、钢拱架和预埋金属线管等。如图 1 所示，为模拟使用不同频率天线测量时均匀混凝土中埋设的钢筋和钢拱架探地雷达反射图像特征，设计的数值模型大小分别为 500 cm×100 cm (用于 400 MHz 天线)，和 500 cm×60 cm (用于 900 MHz 和 1 500 MHz 天线)，混凝土的相对介电常数为 6；400 MHz 天线的收发距为 15 cm，道间距为 2 cm；900 MHz 和 1 500 MHz 天线的收发距为 10 cm，道间距为 2 cm；所埋设的钢筋直径为 20 mm，埋设深度为 10 cm。为分析不同钢筋网密

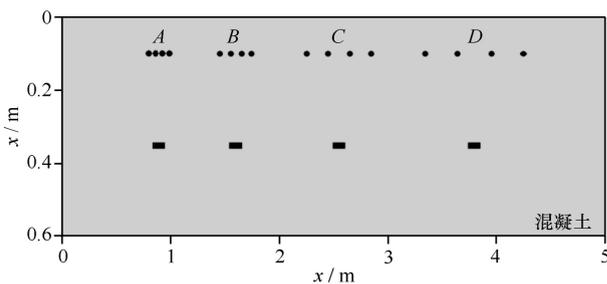


图 1 不同钢筋网密度数值模型示意

度的电磁波反射特征，以及钢筋所产生的绕射波对识别钢筋数量和位置的影响，将每 4 根钢筋设为一组，同组内的钢筋间距一致，组与组之间的间隔为 50 cm；其中，A 组钢筋间距设为 5 cm、B 组钢筋间距设为 10 cm、C 组钢筋间距设为 20 cm、D 组钢筋间距设为 30 cm。为分析不同密度钢筋网对其下方钢拱架反射信号的影响，在每组钢筋正下方设计钢拱架 1 个，宽度 10 cm，埋设深度 35 cm。

由数值模拟结果 (图 2~图 4) 可知，在钢筋存在的位置会出现强能量反射波和绕射波，下方有明显的多次波干扰信号，完整的单个钢筋雷达图像呈类

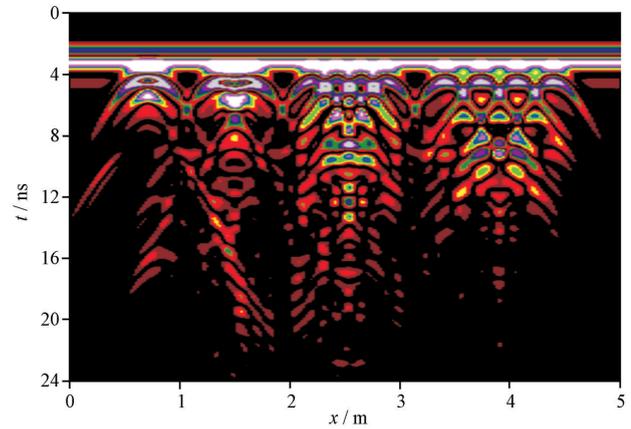


图 2 400 MHz 天线钢筋和钢拱架数值模拟结果

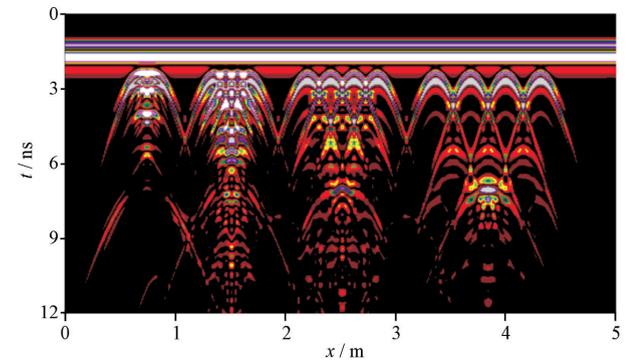


图 3 900 MHz 天线钢筋和钢拱架数值模拟结果

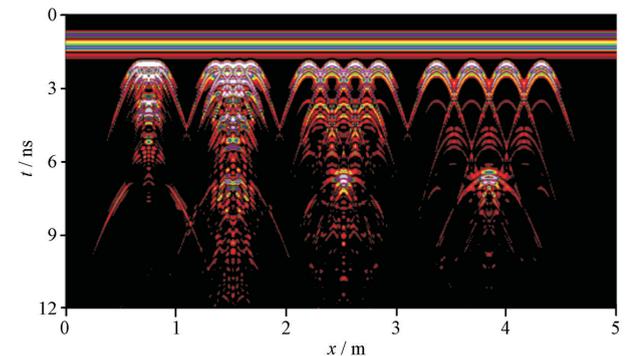


图 4 1 500 MHz 天线钢筋和钢拱架数值模拟结果

双曲线的开口向下的弧形特征,弧形顶部是来自钢筋顶部的反射信号,据此可以判读钢筋的埋深和水平位置。图中显示,当钢筋网密度较小时,钢筋绕射信号相互干扰明显,严重时绕射波会完全压制来自相邻钢筋的反射波;当钢筋间距为 5 cm 时,三种频率的天线均不能识别钢筋的数量和位置,反射信号类似整块钢板反射;当钢筋间距为 10 cm 时,模拟结果显示 900 MHz 和 1 500 MHz 天线可以识别钢筋的数量和位置,但 400 MHz 天线比较困难,在进行适当数据处理后也可勉强识别。由此可见,当钢筋间距大于 10 cm 时可以使用探地雷达来识别钢筋数量和位置,钢筋密度变化对识别单个钢筋的影响程度要大于天线中心频率变化所带来的影响。

当钢筋网所产生的多次波严重时,会明显地干扰或湮没来自下方目标体的反射信号。由数值模拟结果可知,随着钢筋网密度的变化,位于钢筋网正下方的钢拱架反射信号受到了不同程度的影响,钢筋网越稀疏影响越小,反之越大。由图 2~图 4 可见,当钢筋网密度小于 10 cm 时,无论是哪种频率的天线,钢拱架均是难以识别的;在满足探测深度要求的前提下,所使用天线的中心频率越高,分辨率将越高,钢拱架反射信号也会更加越明显。钢筋网所产生的多次波对识别处于其下方的空洞、离析等隧道衬砌常见隐患的影响更大,这是由于这些隐患的顶界面反射系数要远小于钢拱架、第二排钢筋网的反射系数,所以在实际工程测量中,这些隐患的反射信号更容易被多次波信号所淹没而变得难以识别。

**2.2 混凝土构件数值模拟及实验测量**

为研究不同直径钢筋及其下方空气层的探地雷达反射图像特征,在被悬空支起的混凝土试件上开展了探地雷达实验测量工作,并建立相应数值模型用于对比分析。如图 5 所示,混凝土试件设计大小为 160 cm×30 cm×30 cm,共埋设 7 根不同直径的钢筋,间距为 20 cm,埋深 12 cm;钢筋的编号和直径依次为:A,Ø28 mm;B,Ø25 mm;C,Ø22 mm;D,Ø20 mm;E,Ø18 mm;F,Ø14 mm;G,Ø10 mm。受混凝土试件

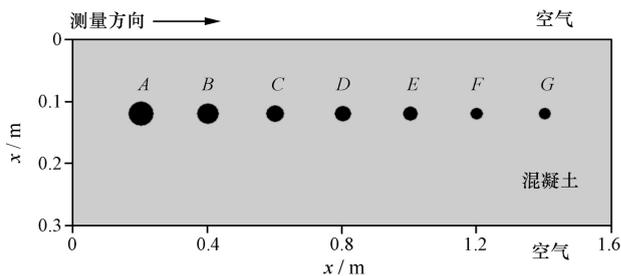


图 5 混凝土试件模型设计示意

尺寸和天线尺寸的限制,仅使用美国 GSSI 公司探地雷达的 900 MHz 和 1 500 MHz 天线,对编号为 B~F 的 5 根钢筋进行了测量,由于两种频率均能满足实验测量要求,故选择分辨率较高的 1 500 MHz 天线为例进行说明。

由数值模拟剖面 and 实测剖面(图 6)可见,当钢筋间距为 20 cm 时,图像上钢筋之间的反射信号基本无明显干扰;由于钢筋中心位置高度相同而直径不同,可发现钢筋顶部高度依次下降,反射波振幅强度也依次下降;同时,钢筋下方的多次波较强,干扰和掩盖了其正下方应有的空气界面弱反射信号。为压制钢筋产生的绕射波和多次波干扰,还原下方空气反射界面信号,对雷达数据进行克希霍夫积分偏移处理。经偏移处理后的探地雷达剖面(图 7)实现了对钢筋绕射波的归位,达到了聚焦目标的目的,在一定程度上压制了多次波干扰,使得约位于 6 ns 处

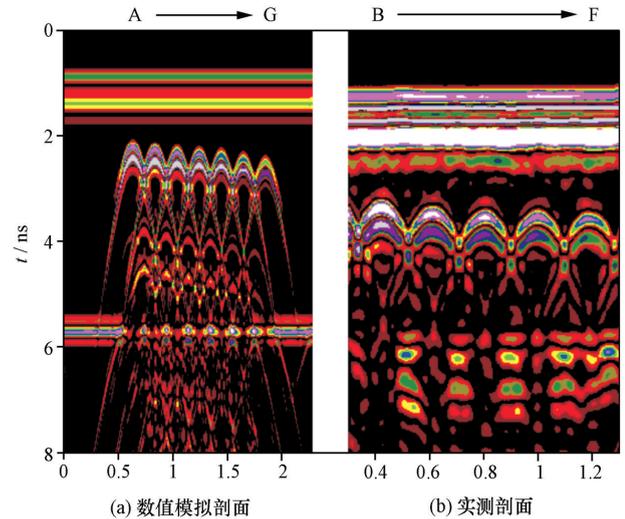


图 6 1 500 MHz 天线的剖面图像

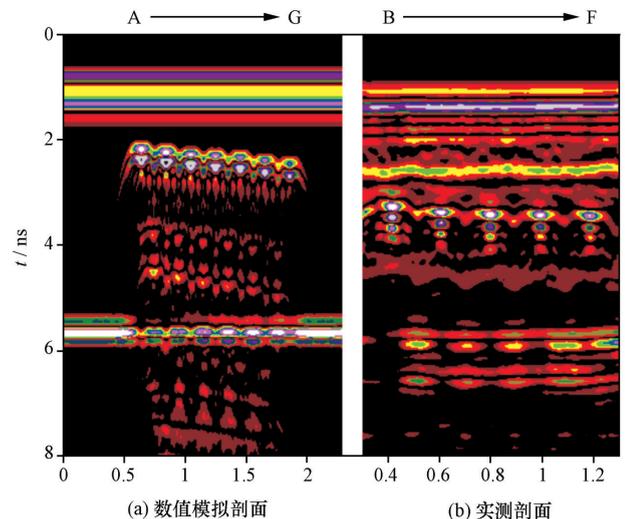


图 7 经偏移处理后的 1 500 MHz 天线的剖面图像

的空气反射界面得以被识别。故当检测目标为隧道衬砌钢筋网下方的空洞、离析等缺陷体时,也可运用这一方法来压制钢筋网多次波的干扰以突出缺陷体的反射信号。但如果钢筋网密度较大,即使作偏移处理也很难完全压制多次波,使得分辨处于其下方的缺陷体仍然是困难的。

由于混凝土试件介质均一性较好,横向速度变化小,所以处理后的反射界面畸变较小,钢筋反射能量基本得以归位,故在一定程度上能够对钢筋的粗细程度进行相对比较。而在隧道衬砌实际测量中,由于不同区段或分次施工浇筑的混凝土之间有一定的电性变化,加上埋设钢筋的深浅变化、钢筋与测量方向夹角变化等因素均会对带来较大影响,所以在工程中直接利用雷达来判断钢筋尺寸是难以实现的。

### 3 工程实例

探地雷达工作在隧道边墙衬砌上开展,在选取的一小块区域内分别使用美国 GSSI 公司探地雷达的 400 MHz、900 MHz、1 500 MHz 天线沿相同测线进行对比测量,测线长度为 8 m。400 MHz 天线的道间距为 2.5 cm,时窗大小为 40 ns;900 MHz 天线的道间距为 1 cm,时窗大小为 12 ns;1 500 MHz 天线的道间距为 0.5 cm,时窗大小为 10 ns。衬砌钢筋设计间距为 20 cm,第一排钢筋埋深为 10 cm,第二排钢筋埋深为 20 cm;钢拱架水平位置约在剖面的 3.3 m 处,埋深 35 cm。

图 8~图 10 分别为 400 MHz、900 MHz、1 500 MHz 天线的探地雷达实测剖面,均能够发现埋设于混凝土衬砌中的第一排钢筋,钢筋网规律并呈连续起伏状,深部的钢拱架呈近似月牙形的图像特征也被清晰地探测到。由于钢筋埋设深度仅为 10cm,图

8~图 9 中的钢筋反射波与地表反射波相互存在一定程度的叠加,而图 10 的钢筋反射波与地表反射波则能被完整地区分开来,这是因为在同一介质中的 1 500 MHz 天线子波长要小于 400 MHz 和 900 MHz 天线子波长,垂向分辨率较高决定的,所得结果与图 2~图 4 数值模拟图像基本一致。此外,由于上下两排钢筋距离仅 10 cm,垂向位置对应较好,受上层钢筋反射信号的干扰,第二排钢筋除少数因位置错位或距离稍大而能被识别外,多数难以识别。限于篇幅,在此对上下排钢筋的干扰不作进一步探讨。

由此可见,探地雷达能够被有效地用于隧道衬砌质量检测,但也会受天线特性、介质电性以及信号干扰等客观因素的制约。为了取得较好的探测效果和提高解释推断的可靠性,应在数值模拟和实验测量的基础上,根据探测目标的实际情况选取适当频率的天线来进行测量,或是使用不同频率的天线进行组合测量以解决探地雷达检测中分辨率与探测深度之间的矛盾。

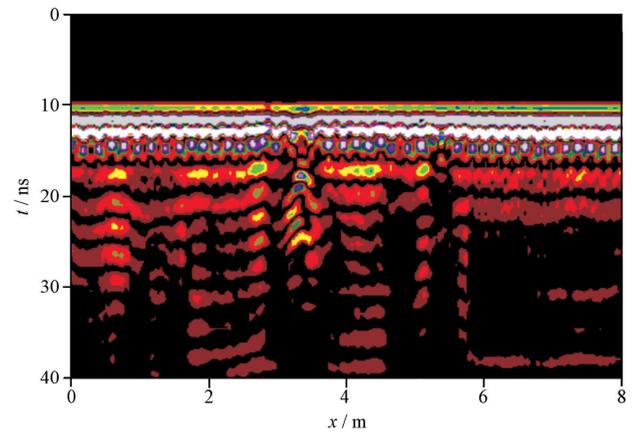


图 8 400 MHz 天线隧道衬砌实测剖面图像

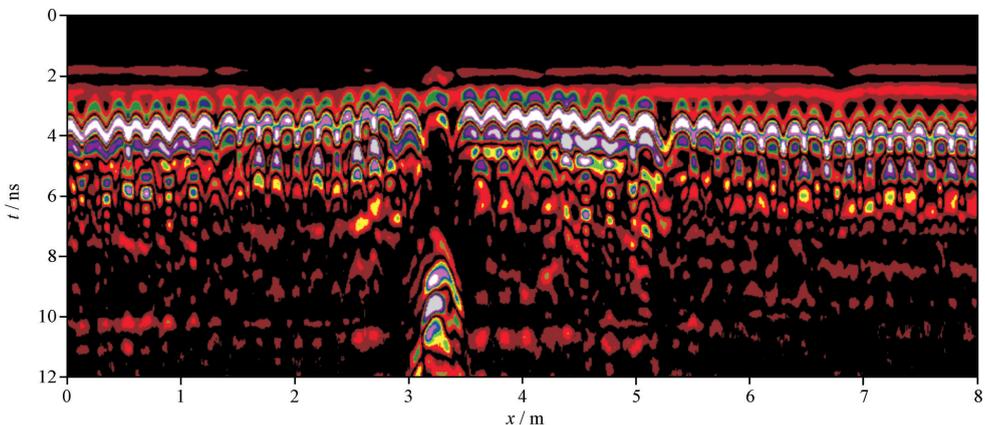


图 9 900 MHz 天线隧道衬砌实测剖面图像

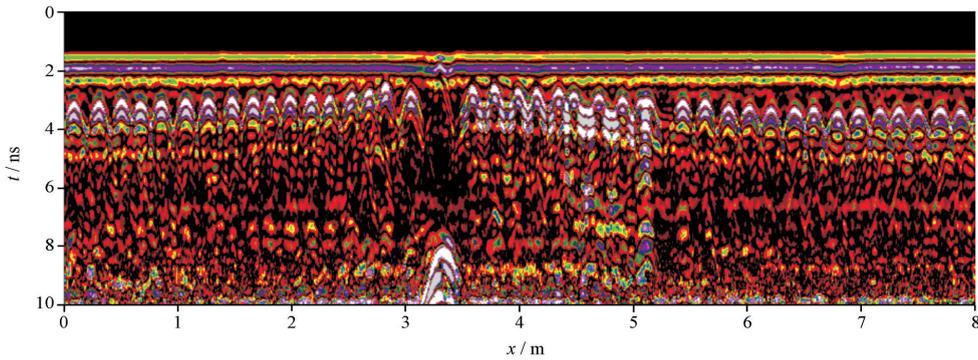


图 10 1500 MHz 天线隧道衬砌实测剖面图像

## 4 结论

通过一系列的研究工作发现,在隧道衬砌检测中,探地雷达在一定条件下能够较好地发现钢筋、钢拱架乃至空洞、离析等缺陷体。故应在工程测量前,开展目标体图像特征数值模拟、混凝土试件实验测量和数据预处理工作,为选择适当的天线频率、工作参数以及数据处理方法提供必要的依据,最终使得能够在隧道衬砌检测中获得较好的探地雷达探测效果。

### 参考文献:

- [1] 徐浩,刘江平,范承余,等.隧道衬砌病害的探地雷达波场模拟与特征分析[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(11):4581-4587.
- [2] 黄玲,曾昭发,王者江,等.钢筋混凝土缺陷的探地雷达检测模

拟与成像效果[J].物探与化探,2007,31(2):181-185.

- [3] 徐茂辉,谢慧才.混凝土结构雷达检测中的钢筋相互干扰研究[J].四川建筑科学研究,2006,32(6):98-102.
- [4] 王正成,吴晔.探地雷达隧道衬砌质量检测技术[J].物探与化探,2013,37(6):1152-1156.
- [5] 李大心.探地雷达方法及应用[M].北京:地质出版社,2000.
- [6] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problem involving Maxwell equations in isotropic media[J]. IEEE Trans Antennas Propagate, 1966, 14(3):302-307.
- [7] Giannopoulos A. The investigation of transmissionline matrix and finite-difference time-domain methods for the forward problem of ground probing radar[D]. University of York, Department of Electronics, York, UK; 1997.
- [8] GPRMax2D: <http://www.gprmax.org>.
- [9] 胡平,肖都,方慧.高频探地雷达技术在香港工程检测中的应用[J].物探与化探,2004,28(4):361-364.
- [10] 曾绍发,刘四新,王者江,等.探地雷达方法原理及应用[M].北京:科学出版社,2000.

## The tunnel lining detection numerical simulation based on GPRMax and its application

XIAO Du, LI Wen-Jie, GUO Peng

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, GAGS, Langfang 065000, China)

**Abstract:** Using GPRMax based on the theory of finite difference time domain (FDTD), and taking into account three different frequency antennae of 400 MHz, 900 MHz, and 1500 MHz, the author simulated the image characteristics of the ground penetrating radar reflection and interference signal obtained from the objects inside tunnel lining, including different steel mesh densities, different rebar diameters, steel arches and air layers. An experiment of ground penetrating radar survey was carried out on concrete specimen, the Kirchhoff migration was used to process the numerical simulations and experimental data, so as to suppress the diffracted wave and multiple wave coming from rebar mesh and improve range resolution of weak reflection signal under steel mesh. Based on the comparative analysis of the numerical simulation data and the experimental data on concrete specimen and tunnel lining detection results, the authors reached some conclusions which can be used as a reference for obtaining better detection results of ground penetrating radar survey in tunnel lining.

**Key words:** ground penetrating radar; finite different time domain (FDTD); tunnel lining; numerical simulation; concrete; steel mesh

作者简介:肖都(1976-),男,高级工程师,从事电磁法等地球物理方法技术应用与研究工作。