DOI: 10.11720/j.issn.1000-8918.2014.1.34

高铁隧道 GPR 技术研究与应用

周奇才,周杰,范思遐,张根雷

(同济大学机械与能源工程学院,上海 201804)

摘要:应用基于时间域有限差分法模拟软件 GPRMax2D,对高铁隧道衬砌典型的不良情况,如厚度不足、空洞和钢筋布置不合理等进行了正演模拟,得到了隧道衬砌典型不良情况的正演模拟雷达图像。结合某高铁隧道工程实际检测得到的雷达图像,对两者图像作了对比分析,总结得到了隧道衬砌不良情况雷达图像的特征规律,完善了探地雷达图像资料特征解释库,提高了识别高铁隧道衬砌典型不良情况雷达图像的可信度,为高速铁路隧道的无损检测提供了有效的依据。

关键词:探地雷达;高铁隧道;时域有限差分;正演模拟;隧道衬砌检测

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2014)01-0185-04

随着高速铁路的快速发展,新建高速铁路隧道 的数量和规模逐年增加,对高铁隧道检测技术提出 了更高的要求。探地雷达(GPR)是一种依据地下 介质对广谱电磁波的不同响应来识别地下介质分布 特征的技术,由于具有无损、快速、高效和高精度等 优点,已经被广泛的应用于隧道衬砌质量检测中。 笔者应用基于时间域有限差分法(finite-different time-domain,FDTD)的软件 GPRMax2D,对隧道衬砌 典型不良情况进行仿真模拟,并结合某高铁隧道检 测实例,对这些典型雷达图像进行分析对比并总结 特征规律,以完善探地雷达图像资料特征库,为高速 铁路隧道的无损检测提供有效的依据。

1 典型不良情况雷达图像正演模拟

受诸多因素的影响,隧道衬砌往往存在厚度不 足、空洞和脱空以及钢筋布置不合理等不良情况。 1996 年爱丁堡大学的 Dr Antonis Giannopoulos 推出 一款基于 FDTD 算法和 PML 边界吸收的探地雷达 正演数值模拟软件,用于探地雷达成像研究^[1]。我 们采用该模拟仿真软件 GPRMax2D 进行建模并生 成二进制雷达图像文件,用 MATLAB 软件编程来读 取显示正演模型和雷达图像^[2-3]。对模拟得到的雷 达图像进行特征分析,总结衬砌典型不良情况的特 征规律,增加识别高铁隧道典型图像的可靠性。

1.1 钢筋布置不合理

在隧道的施工过程中,经常会出现钢筋布置不 合理、偷工减料造成的钢筋布设的数量不足或钢筋 缺失等现象^[4-5]。采用探地雷达正演模拟的天线频 率为 600 MHz,模型尺寸为 2.5 m×0.45 m(图 1a), 混凝土的介电常数 ε_1 = 6,电导率 σ_1 = 0.01 S/m,钢 筋的直径 8 mm,间距 0.2 m,中间钢筋间距较大处是 模拟钢筋缺失。模拟网格单元步长 $\Delta x = \Delta y = 2.5$ mm,时窗 $t_w = 14 \times 10^{-9}$ s,计算步数为 100。探地雷达 发射端初始位置为(0.367 5,0.452 5),接收端初始 位置为(0.407 5,0.452 5),发射端和接收端的移动 步长为 20 mm。

图 1b 给出了该模型的探地雷达图像模拟结果。 钢筋是金属良导体,电磁波遇到钢筋网会形成连续



的双曲线状强反射信号。从模拟结果可见,衬砌中 的钢筋网在雷达图像上产生的双曲线反射信号清晰 可见,钢筋的位置就是双曲线顶点所在位置,因此可 以根据双曲线信号顶点的数量来判断在某段范围内 的钢筋数量是否足够;当中间钢筋存在缺失时,双曲 线反射信号不连续,从而得到此处钢筋的布设不合 理。另外,在图像上部存在连续、层次分明的直线, 这是直达波在图像上的反映。

1.2 二次衬砌厚度不足

二次衬砌的厚度检测是隧道质量检测的一个主要指标。该模型采用探地雷达正演模拟的天线频率为 600 MHz。模型尺寸为 2.5 m×0.45 m(图 2a),二次衬砌两侧的厚度为 0.3 m,中间厚度为 0.23 m(假设小于设计厚度),介电常数 $\varepsilon_1 = 6$,电导率 $\sigma_1 = 0.01$ S/m。下层初期支护的 $\varepsilon_2 = 8$, $\sigma_2 = 0.01$ S/m。模拟 网格单元步长 $\Delta x = \Delta y = 2.5$ mm,时窗 $t_w = 14 \times 10^{-9}$ s, 计算步数为100。探地雷达发射端初始位置为(0.367 5,0.452 5),接收端初始位置为(0.407 5, 0.452 5),发射端和接收端的移动步长为 20 mm。

图 2b 为其探地雷达图像模拟结果。由于二次 衬砌和初期支护的介电常数存在差异,电磁波从二 次衬砌进入初期支护,反射波的信号增强,形成一个 强反射界面。在雷达图像上二次衬砌和初期支护之 间呈现出一条明显的界线,由于中间部分的二次衬 砌厚度不足,该界线呈现出两边低中间高的特征,结 合纵坐标的刻度很容易得到二次衬砌的厚度值,与 设计值进行比较,从而能够确定二次衬砌厚度不足 的地方。



图 2 衬砌厚度不足的探地雷达图像模拟

1.3 衬砌中的空洞

空洞是隧道衬砌中常见的不良情况,其形状极 不规则,由于空洞内部充满了空气,反射能量很强。 该模型采用探地雷达正演模拟的天线频率为 600 MHz。模型的尺寸 2.5 m×0.45 m,混凝土的 ε_1 = 6, σ_1 = 0.01 S/m。空洞内部为空气,介电常数 ε_2 = 1, 电导率 σ_2 = 0。模拟网格单元步长 $\Delta x = \Delta y = 2.5$ mm,时窗 t_w = 14×10⁻⁹ s,计算步数为 100。探地雷达 发射端初始位置为(0.367 5,0.452 5),接收端初始 位置为(0.407 5,0.452 5),发射端和接收端的移动 步长为 20 mm(图 3a)。

图 3b 为空洞的探地雷达图像模拟结果。图中 可见,三角形空洞在雷达图上表现为右侧的斜坡特 征;矩形空洞在雷达图左侧表现出水平和曲线特征, 曲线为矩形空洞左侧雷达波反射形成,水平部分为 矩形上部;圆形空洞在雷达图上特征明显,呈现出一 组开口向下的双曲线特征。由于雷达波的高衰减和 介质的吸收作用,下底面的能量相对来说要弱很多。



图 3 衬砌中空洞的探地雷达图像模拟

2 实际应用

目前,在国内应用于隧道检测的探地雷达产品 较多。意大利 IDS 公司的 RIS-K2 型探地雷达具有 体积小、操作简单、功能强大和环境适应性强等优 点,采用该探地雷达对某高铁隧道衬砌的厚度、衬砌 内部的缺陷和钢筋的位置分布等不良情况进了检 测,并结合前面模拟得到的雷达图像,对检测采集得 到的雷达图像用专用的雷达图像处理软件进行人工 识别,得到隧道衬砌不良情况的雷达图像并进行分 析,总结典型图像的特征规律。

2.1 现场检测参数和测线布置

天线频率越高探测深度越浅,则分辨率越高;反 之,天线频率越低探测深度越深,则分辨率越高;反 之,天线频率越低探测深度越深,则分辨率越低^[6-7]。考虑到隧道衬砌的厚度、分辨率的要求,采 用 600 MHz 的天线,选择时窗为 40 ns,扫描样点数 为 512,时间触发方式。隧道检测时分别在隧道的 拱顶、左拱腰、右拱腰、左边墙、右边墙和仰拱位置布 置 6 条连续测线,如图 4 所示。拱顶测线在隧道顶 部的正中间,仰拱测线在隧道地面的正中间,左右边 墙测线在排水沟盖板以上 1.5~2 m,左右拱腰测线 在起拱线 1 m 的范围之内^[8]。雷达在现场检测时, 采用人工抬举和车载升降台等方法,沿着测线进行 匀速、连续检测,记录下测线的编号和首末里程标 记^[9]。



图 4 探地雷达检测隧道的测线布置

2.2 检测资料分析

2.2.1 钢筋的布置

衬砌中钢筋的检测是隧道质量检测的重要内容,关系到衬砌的力学性能。衬砌中钢筋雷达图像表现为连续的双曲线状强反射信号,该隧道右拱腰 DK115+835.2~DK115+836的范围钢筋缺失,雷达 图像如图5所示。结合模拟得到的雷达图像,图中 矩形框部分双曲线状强反射信号不连续,可以判定 在双曲线信号缺失处表明钢筋缺失。

2.2.2 衬砌厚度

如果隧道欠挖,在欠挖的位置容易造成衬砌厚 度不足,影响隧道安全。因此,衬砌厚度是否满足设 计要求是隧道质量检测的主要指标。如果衬砌内部 质量良好,则雷达图像表现为同相轴连续,反射界面 连续、清晰可见。反射界面的上下起伏变化,反映了 衬砌厚度的变化。

该隧道右拱腰 DK116+444~DK116+448 的范



图 5 钢筋缺失的雷达图像



图 6 二次衬砌厚度不足的雷达图像

围二次衬砌厚度不足,围岩等级为W级,对于W级围 岩,二次衬砌的设计厚度为40 cm。雷达图像如图 6 所示,二次衬砌和初支混凝土之间的界面是一条曲 线,从雷达图像处理软件可得,从上往下第二条虚线 横坐标为40 cm,图中矩形框部分的反射界面明显 处于40 cm 以上,因此可以判断出该段范围内二次 衬砌的厚度不足。

2.2.3 衬砌空洞

由于衬砌和空气的介电常数不同,电磁波从衬 砌传播到空气再传播到衬砌时,反射波的信号会增



图 7 衬砌内空洞的雷达图像

强,电磁波在空洞内多次来回反射,形成强反射界 面,该隧道左拱腰 DK118+766.8 处衬砌内存在空 洞,雷达图像如图 7 所示。结合模拟得到的空洞雷 达图像可得,空洞在雷达图像上表现为强反射,同相 轴错位,呈现出开口向下的一组曲线,特征明显,容 易识别。因此可以判断出图中矩形框部分是衬砌中 存在空洞。

2.3 检测结果验证

本次检测以铁路里程定位,运用 IDS 公司专用 的雷达图像处理软件对采集得到的雷达图像进行一 系列的处理,然后运用人工识别的方法对隧道衬砌 不良情况进行识别。检测结果表明,该隧道里程 DK120+370~DK120+450 段衬砌有多处厚度未达到 设计厚度,还有一些部位存在钢筋缺失、钢筋数量不 足和空洞的缺陷。提交隧道检测报告以后,工程指 挥部对该隧道衬砌存在缺陷的部位进行了现场抽芯 检验,几个衬砌缺陷处和雷达检测的结果基本一致。

3 结语

对正演模拟和工程实际测得的雷达图像的对比 分析表明,利用 GPRMax2D 正演模拟得到的高铁隧 道衬砌典型不良情况模拟图像的效果良好,比较清 晰地反映了各自成像的特征,与工程实际测得的雷 达图像相似,完善了探地雷达图像资料特征解释库, 提高了识别高铁隧道衬砌典型不良情况雷达图像的 可信度,为实际高铁隧道工程无损检测提供了理论 依据和经验。

参考文献:

- [1] Giannopoulos A. The investigation of transmissionline matrix and finite-difference time-domain method for the forward problem of ground probing radar[D].York: University of York, 1997.
- [2] 汤炜,李清亮,吴振森,等.有耗平面和三维目标复合散射的 FDTD 分析[J].电波科学学报,2004,19(4):438-443.
- [3] 吴宝杰,姬美秀,杨桦.基于 matlab 的探地雷达数据三维显示 [J].物探与化探,2009,33(3):343-345.
- [4] 剧红斌,周永胜,闫小兵,等.探地雷达在隧道质量检测中的应用[J].工程地球物理学报,2009,6(1):119-124.
- [5] 吴波鸿,白雪冰,孔祥春.探地雷达在隧道衬砌质量检测中的应用[J].物探与化探,2008,32(2):229-231.
- [6] 袁明德.浅析探地雷达的分辨率[J].物探与化探,2003,27(1): 28-32.
- [7] 李孟娟,李川.探地雷达检测隧道衬砌厚度的研究[J].物探化 探计算技术,2008,30(3):231-234.
- [8] 周黎明,王法刚.探地雷达法检测隧道衬砌混凝土质量[J].岩 土工程界,2003,6(3):74-76.
- [9] 钟世航.隧道衬砌质量的检测[J].现代隧道技术,2001,38(5): 36-40.
- [10] 景喜林,张琳,于增宝.探地雷达在铁路隧道衬砌质量检测中的应用[J].工程地球物理学报,2007,4(4):345-349.
- [11] Ruggiero A, Anna S D. Modeling and Imaging of Ground Penetrating Radar data[D]. Austin: The University of Texas, 2004.
- [12] 杨峰,苏红旗,探地雷达技术及其在公路隧道质量检测中的应用[J].筑路机械与施工机械化,2007,27(4):8-10.
- [13] 李大心.探地雷达技术与应用[M].北京:地质出版社,1994.
- [14] 董延朋.探地雷达在混凝土施工质量无损检测中的应用[J].物 探与化探,2006,30(5):468-470.
- [15] 李二兵,谭跃虎,段建立.探地雷达在隧道工程检测中的应用 [J].地下空间与工程学报,2006,2(2):267-270.

THE STUDY AND APPLICATION OF GPR TECHNOLOGY FOR HIGH-SPEED RAILWAY TUNNEL

ZHOU Qi-cai, ZHOU Jie, FAN Si-xia, ZHANG Gen-lei

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The high-speed railway tunnel lining always suffers from some adverse conditions, such as thickness lack, cavity, and unreasonable reinforcement arrangement. In this paper, simulation of the typical adverse lining condition was introduced by using the simulation software GPRMax2D based on finite-different time-domain method (FDTD), and the forward simulation radar images of the typical adverse lining condition were obtained. In combination with the typical radar images from detection examples of a high-speed railway tunnel, a comparative analysis was made between them, the features and rules of the adverse lining condition were summarized, the ground-penetrating radar data feature library was improved, and the credibility of recognizing typical adverse conditions of highspeed railway tunnel was increased. These results provide the effective basis for the high-speed railway tunnel non-destructive testing. **Key words:** GPR; high-speed railway tunnel; finite-difference time-domain; forward simulation; tunnel lining test

作者简介:周奇才(1962-),男,江苏宜兴人,教授,博士生导师,主要从事机电一体化、大型装备及复杂系统的检测与诊断。